

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національна академія наук України

Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шубний Олександр Іванович

УДК 537.868

ДИСЕРТАЦІЯ

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

01.04.01 - Фізика приладів, елементів і систем

Фізико-математичні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Науковий керівник Фісун Анатолій Іванович, доктор фіз.-мат. наук, професор

Харків – 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 і систем». Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України, 2017.

Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017.

Комплексна діелектрична проникність є важливою характеристикою, яка описує електричні властивості діелектриків. Аналогічно, для опису магнітних властивостей вводиться поняття комплексної магнітної проникності. 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.

4. 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.

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 флуктуацій КДП в флуктуації частоти та амплітуди коливань. 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 твердотільного підсилювача мікрохвильового діапазону, який застосований для вимірювання динаміки нестационарних змін індексу заломлення повітря.

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.

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 (PhD) in specialty 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 complex permittivity is an important characteristic that describes the electrical properties of dielectrics. Similarly, to describe the magnetic properties there is a concept of complex magnetic permeability. The thesis deals with a problem of determining the changing permeability effect in material filling the volume of 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 in 2 times.

2. The dimensions of waveguide matching cell which is the impedance transformer of a semiconductor diode with open resonator have been first optimized. 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 %.

3. It was found for the first time that an important factor which affects the sensitivity and accuracy of measurements in the quasi-optical a high-Q resonator, optimized for diffraction loss at the edges of the mirror and for ohmic losses, is the energy loss by non-resonant radiation and scattering of the resonance field on the coupling elements.

4. It was established that in a system “rectangular waveguide - dielectric cylinder”, which immersed in a high-loss liquid, a family of four wave modes can be excited; however, the HE_{11} -mode excited with minimum losses propagates along the cylinder with the lowest attenuation.

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 the Gunn-diode with the output first- or second-mode signal with a frequency noise of $\delta f_{rms} \sim 0.028 \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ tuning out 10 kHz of the carrier frequency 30 GHz and serve as a basis of 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 open resonator of the generator.

It was designed a prototype of autogeneration measuring system based on the 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.

Key words: permittivity, measurement, resonator, quality-factor, generator, waveguide, cavity, refractometer, microwave.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:
Publications with the main scientific results of the thesis:

1. А. И. Бородкин, Б. М. Булгаков, М. П. Натаров, В. Н. Скresанов, 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. Скresанов, и А. И. Шубный, “Эффективность возбуждения квазиоптического открытого резонатора из волновода”, *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, Т. 52, № 3, с. 231-249, 2009.
3. 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.
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. В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. Н. Скresанов и А. И. Шубный, “Радиационные потери сосредоточенных элементов связи открытых резонаторов”, *Радиофізика та електроніка, –Харків: Ін-т радіофізики та електроніки НАН України*, т. 2(16), №3, с. 12-25, 2011.
6. В. Н. Скresанов, 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*, – 75, N(1), pp. 83-98, 2016.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

The list of publications in support of the thesis results approval:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. В. Н. Скресанов, 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.
5. 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.

6. 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.
7. 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.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

The list of publications with supplementary results of the thesis:

- 1 Б. М. Булгаков, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, В. И. Ткаченко и А. И. Шубный, "Генератор", *А.с. № 1568206, Б.И. № 20*, 1990
- 2 А. И. Бородин, Б. М. Булгаков, В. Н. Макаров, М. П. Натаров и А. И. Шубный, "Полупроводниковый генератор", *А.с. №1658370 Б.И. №23*, 1991
- 3 Б. М. Булгаков, А. П. Кусайкин, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, и А. И. Шубный, "Генератор", *А.с. № 1774460, Б.И. № 41*, 1992
- 4 Б. М. Булгаков, В. В. Гламаздин, В. А. Карпович, М. П. Натаров, О. Г. Нечаев, В. М. Родіонова, В. Н. Скресанов и О. І. Шубний, "Квазіоптичний суматор потужностей", *Патент на винахід №84164 Бюл. №18*, 25.09.2008
- 5 В. Н. Скресанов, О. А. Баранник, В. В. Гламаздин, В. А. Золотарьов, М. П. Натаров, М. Т. Черпак, О. І. Шубний та ін., "Смуго-пропускальний фільтр", *Патент на винахід №109490. Бюл. №16*, 25.08.2015
- 6 В. Н. Скресанов, О. А. Баранник, В. В. Гламаздин, М. Т. Черпак, О. І. Шубний та ін., «Вимірювальний резонатор з хвилями шепочучої галереї», *Патент на винахід №110214. Бюл. №23*, 10.12.2015.

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ПРИЛАДІВ І СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ДІАПАЗОНІ	21
1.1. Резонаторні методи	21
1.2. Хвилеводні методи	30
1.3. Висновки до розділу 1	36
РОЗДІЛ 2. АКТИВНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА 8-ММ ДІАПАЗОНУ З РЕЗОНАТОРОМ ФАБРИ-ПЕРО В КОЛІ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ПІДСИЛЮВАЧА	38
2.1. Застосування мікросхеми СНА3093С99F в автоколивальному режимі.....	38
2.2. Розробка високодобротного термостабільного квазіоптичного резонатора	48
2.3. Результати вимірювання слабких змін КДП газового середовища ...	54
2.4. Випробування рефрактометра автоколивального типу з відкритим резонатором	58
2.5. Диференційний радіорефрактометр	66
2.6. Висновки до розділу 2	71
РОЗДІЛ 3. АВТОГЕНЕРАТОРНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ РЕЗОНАТОРІВ І ТВЕРДОТІЛЬНИХ АКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	72
3.1. Розробка високостабільного квазіоптичного генератора	73
3.2. Розробка квазіоптичного генератора з виходом другої гармоніки ...	80
3.3. Розробка радіопрозорої кювети	87
3.4. Висновки до розділу 3	97
РОЗДІЛ 4. ХВИЛЕВОДНИЙ ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ДІЕЛЕКТРОМЕТР	99
4.1. Вибір схеми вимірювань	99

4.2. Вимірювальна кювета	101
4.3. Розробка елементів НВЧ-схеми, їх характеристики	111
4.4. Мікропроцесорне управління НВЧ-вузлами та автоматизація процесу вимірювання	115
4.5. Аналіз джерел похибок і оцінка точності вимірювань	118
4.6. Результати вимірювання КДП модельних рідин	124
4.7. Висновки до розділу 4	129
ВИСНОВКИ	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	135
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації	150
ДОДАТОК Б Відомості про апробацію результатів дисертації	152
ДОДАТОК В Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.....	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

- АВС – активна вимірювальна система
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ВР – відкритий резонатор
ГКН – генератор керований напругою
ДГ – діод Ганна
КДП – комплексна діелектрична проникність
КОГ – квазіоптичний генератор
КСП – комплексна стала поширення
НВЧ – надвисокі частоти
ОЧГ – основна частота генерації
ТКЧ – температурний коефіцієнт частоти
ТП – твердотільний підсилювач
ФАПЧ – фазове автопідстроювання частоти
ШГ – шепочуча галерея
А – амплітуда коливань
F – коефіцієнт приведення
 f – частота коливань
 n – комплексний показник заломлення
 Q – добротність резонатора
 α – коефіцієнт загасання
 β – фазова стала поширення
 γ – комплексна стала поширення
 ε – комплексна діелектрична проникність
 λ – довжина хвилі
 μ – комплексна магнітна проникність
Ф – фаза коливань

ВСТУП

Актуальність теми. До діелектриків відносяться гази, рідкі та аморфні речовини і більшість кристалів. Основною фізичною властивістю, що об'єднує ці різні по фізичній природі речовини, є їх особлива поведінка в електричному полі. Під впливом електричного поля в діелектриках відбувається зміщення електричних зарядів - поляризація i , практично, відсутнє переміщення цих зарядів - електропровідність. У той час як струм електропровідності змінюється синфазно з електричним полем і існує весь час, поки докладено поле, поляризація призводить до струмів зміщення, зсунутих по фазі на $\pi/2$ щодо синусоїдального електричного поля, причому, струм зміщення існує тільки при зміні електричного поля і відсутній при постійній напрузі [1]. Здатність діелектрика до поляризації в зовнішньому електричному полі характеризується відносною діелектричною проникністю ϵ , яка показує, у скільки разів електрична індукція, що виникає в діелектрику під впливом електричного поля, більше, ніж у вакуумі [2].

З електричних властивостей діелектриків, крім поляризації і електропровідності, у фізиці діелектриків детально вивчаються діелектричні втрати - процеси поглинання діелектриками електричної енергії. Для опису втрат в діелектрику використовується така величина, як тангенс кута втрат ($tg\delta$), який чисельно дорівнює відношенню струму провідності до струму зміщення. Введено поняття комплексної діелектричної проникності (КДП) $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$, де ϵ' характеризує складову струму зміщення, а ϵ'' - складову струму провідності, і $tg\delta = \epsilon''/\epsilon'$ [3].

Комплексна діелектрична проникність ϵ є важливою характеристикою, яка описує електричні властивості діелектриків. Аналогічно, для опису магнітних властивостей вводиться поняття комплексної магнітної проникності μ . У техніці надвисоких частот (НВЧ) для опису поширення електромагнітної хвилі в діелектрику вводиться поняття комплексної сталої поширення γ , яка пов'язана з комплексною діелектричною і комплексною магнітною

проникністю співвідношенням $\gamma = i\omega = \alpha + i\beta$, де α - коефіцієнт загасання, β - фазова стала поширення. Проводячи вимірювання цих компонент КДП, 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 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$. Для середовищ з $\mu = 1$ $n = \sqrt{\epsilon' - i\epsilon''}$. 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 [4, 5]. 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 [6, 7, 8]. Визначення КДП на НВЧ 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 позначаються на поглинанні електромагнітного поля. Діелектрометрія в області дисперсії вільної води дозволяє отримати інформацію про стан води в біологічних об'єктах в умовах, що виключають їх руйнування [9, 10]. Останнім часом все більше застосування методи діелектрометрії знаходять в медичних дослідженнях [11].

Можливості діелектрометрії, поряд з іншими методами, з успіхом застосовуються при аналізі якості нафтопродуктів [12], зокрема, для дослідження експлуатаційних характеристик автомобільних палив.

За допомогою вимірювання діелектричної проникності можна визначати 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, зокрема вин і соків, є важливою проблемою, оскільки якість продукції безпосередньо впливає на здоров'я споживачів [12, 13]. Не існує універсального методу ідентифікації таких продуктів. Кожен з відомих способів контролю (методи аналітичної хімії, дегустація, фізико-хімічні методи), маючи свої переваги і недоліки, передбачають певну область використання [14]. Тому, розробка нових методів контролю, до яких може бути віднесена і діелектрометрія, продовжує залишатися актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, що проводилися в ІРЕ НАН України у відділі твердотільної електроніки: «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 також 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 цілі 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 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. Промодельовати 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 зміну 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 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 у хвилеводних і резонаторних структурах.

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

Наукова новизна отриманих результатів. 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 (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 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 резонаторів 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 диференційної кювети при створенні діелектрометра для експрес-аналізу КДП 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 $\delta f_{rms} \sim 0,028 \Gamma_{\psi} / \sqrt{\Gamma_{\psi}}$ 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 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 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 [16 – 23]. Проаналізовано причини нестабільності резонансної частоти резонаторів типу Фабрі-Перо і розроблений спосіб термостабілізації такого резонатора з метою проведення прецизійних вимірювань діелектричної проникності повітря резонаторним методом [24 - 33]. Також автором досліджена залежність сталої поширення хвилі, що поширюється вздовж 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. [34 – 39]. В написанні статей 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: 10-а конференція «Електроніка НВЧ», Мінськ, 1983; 11-а конференція «Електроніка НВЧ», Орджонікідзе, 1986; 20th European Microwave Conference, Budapest, 1990; 3rd Asia-Pacific Microwave conference, Токуо, 1990; 16-а Міжнародна конференція «НВЧ техніка і телекомунікаційні технології» (CriMiCo 2006), Севастополь, 2006; 22-а 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 спеціалізованих наукових виданнях, що входять до списку ВАК 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.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ПРИЛАДІВ І СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ДІАПАЗОНІ

1.1. Резонаторні методи

Відкриті електродинамічні структури широко використовуються в техніці вимірювань електрофізичних характеристик різних матеріалів і середовищ, починаючи з надвисокочастотного і закінчуючи терагерцовим діапазоном радіохвиль. З великої різноманітності типів і класів відкритих резонаторів в цій роботі використовуються відкриті резонатори з двома металевими дзеркалами [40], які будемо називати резонаторами Фабрі-Перо. Безліч прикладів застосування резонаторів Фабрі-Перо для вимірювань можна знайти в оглядах [41, 42].

Резонаторні вимірювання КДП засновані на залежності резонансної частоти вимірювального резонатора того чи іншого типу від величини діелектричної проникності середовища, що частково або повністю заповнює об'єм резонатора. Для збудження коливань в резонаторі завжди потрібно джерело НВЧ коливань (генератор), частота якого перестроюється в діапазоні зміни резонансної частоти. При цьому, однак, можливі різні схеми включення генератора по відношенню до вимірювального резонатора. Найбільш відома схема, в якій вимірювальний резонатор розв'язують від джерела потужності, генератор перестроюють по частоті і досліджують амплітудно-частотну або фазово-частотну характеристику резонатора (рис. 1.1). Ряд переваг дає рішення, коли вимірювальний резонатор використовується як еталон в схемі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) генератора керованого напругою (ГКН) (рис. 1.2). Для схеми ФАПЧ частота генерації дорівнює резонансній частоті вимірювального резонатора. В обох схемах вимірювальний резонатор не

повинен змінювати частоту джерела коливань, тобто потрібна розв'язка між генератором і резонатором. Ця обставина має принциповий характер. Подібні вимірювальні системи широко відомі, і їх можна назвати «пасивними», на відміну від менш відомих «активних» вимірювальних систем [43].

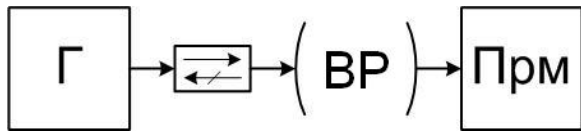


Рис. 1.1. – Пасивна вимірювальна система

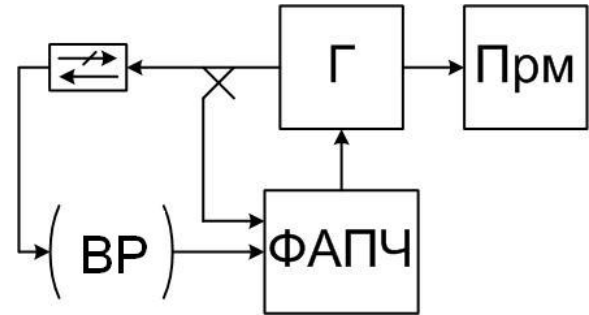


Рис. 1.2. – Пасивна вимірювальна система з ФАПЧ

Побудова активних вимірювальних систем (АВС) принципово заснована на наявності кінцевого зв'язку між вимірювальним резонатором і джерелом НВЧ потужності. Збудження автоколивань в системі відбувається при цілком певних співвідношеннях параметрів джерела потужності, резонатора і кола зв'язку [44]. Про зміну резонансної частоти і втрати, що вносяться в вимірювальний резонатор судять по зміні частоти і потужності автоколивань.

Одним із способів побудови активних систем є рішення, які відомі в техніці стабілізації частоти як схеми «затягування» НВЧ і НДВЧ напівпровідникових генераторів високочастотними резонаторами (рис. 1.3). Очевидно, що, підключивши замість стабілізуючого резонатора резонансну кювету, ми отримаємо активну вимірювальну систему

Ще одне з можливих рішень АВС – вимірювальний резонатор в колі зворотного зв'язку твердотілого підсилювача (ТП) НВЧ діапазону (АВС ТП) (рис. 1.4).

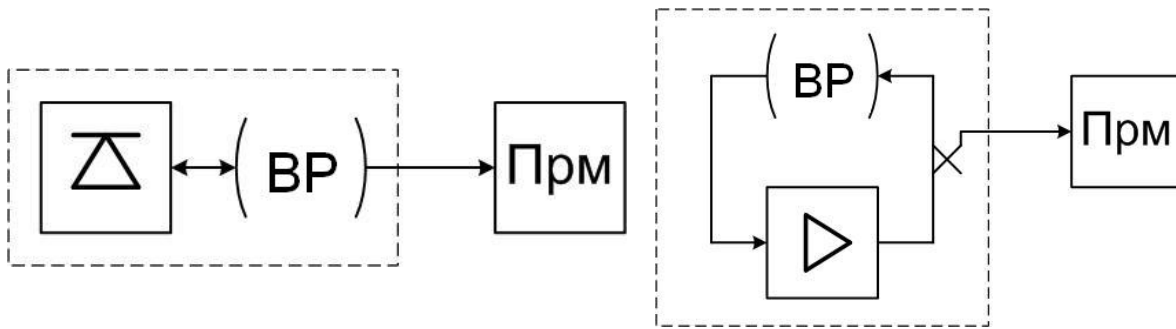


Рис. 1.3. – Активна вимірювальна система з резонатором в колі стабілізації генератора

Рис. 1.4. – Активна вимірювальна система з резонатором в колі зворотного зв'язку підсилювача

Вимірювальний резонатор 5 (рис. 1.5) включений в коло зворотного зв'язку твердотільного підсилювача 1. Якщо на частоті f_1 модуль коефіцієнта передачі всієї петлі більше одиниці, а набіг фази кратний 2π - у системі збуджуються автоколивання з частотою f_1 . Допустима потужність на вході підсилювача і, відповідно, на виході спрямованого відгалужувача 3 встановлюється атенюатором 4 кола зворотного зв'язку. Баланс фаз всієї петлі для частоти f_1 встановлюється фазообертачем 7 кола зворотного зв'язку. Частота генерації лежить в смузі АЧХ коефіцієнта передачі резонатора для обраного типу коливань. Якщо використовується широкодіапазонний підсилювач - необхідний смугопропускаючий фільтр 2 для селекції робочого типу коливань. У хвилеводах кола зворотного зв'язку відбувається запізнювання сигналу, що відображено на схемі елементом лінії затримки 6.

Якщо дійсна і уявна частини діелектричної проникності середовища що заповнює вимірювальний резонатор змінюються, то, відповідно, змінюються модуль і фаза коефіцієнта передачі кола зворотного зв'язку. Автовідновлення порушеного балансу амплітуд і фаз супроводжується зміною потужності і частоти генерації. Таким чином, за зміною частоти і потужності генерації можна судити про зміну коефіцієнта поглинання і показника заломлення середовища, що заповнює резонатор.

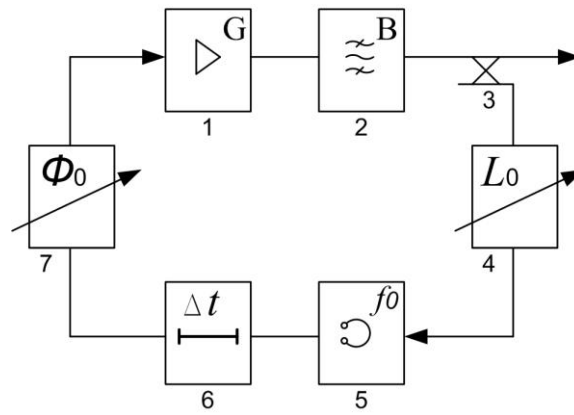


Рис. 1.5. – Узагальнена схема АВС з резонатором в петлі зворотного зв'язку підсилювача

Для інтерпретації даних вимірювань, тобто розрахунку комплексного показника заломлення за допомогою АВС ТП, необхідно вирішити два завдання. Суть першого завдання полягає у встановленні залежності комплексного коефіцієнта передачі вимірювального резонатора від комплексного показника заломлення середовища що заповнює резонатор. Це завдання є традиційним для будь-яких резонаторних методів вимірювань. Суть другого завдання - встановлення залежності частоти і потужності генерації від резонансної частоти і добротності вимірювального резонатора. Це звичайна задача теорії автогенераторів, і для її повного вирішення потрібен нелінійний аналіз. Проведемо рішення другого завдання, дотримуючись [43].

Якщо час проходження сигналу по колу зворотного зв'язку дорівнює Δt , вимірювальний резонатор вносить фазовий зсув $\Phi_r(f)$, а Φ_0 - фіксована фаза регульованого фазообертача, то частота генерації f в стаціонарному режимі визначається умовою кратності повного набігу фаз 2π (рівняння балансу фаз):

$$2\pi f \cdot \Delta t + \Phi_r(f) + \Phi_0 = 2\pi n, \quad (1.1)$$

де n - ціле позитивне число.

Вираз (1.1) записано в наближенні відсутності залежності зсуву фаз в мікросхемі підсилювача від амплітуди коливань. Фазовий зсув, що вноситься

резонатором, є фазовий кут коефіцієнта передачі резонатора $T(f)$, який без урахування втрат в елементах зв'язку, може бути записаний як

$$T(f) = \frac{(1 + Q_{ex}/Q_0) \cdot Q_{ex}/Q_0 + Q_{ex}^2 (f/f_0 - f_0/f)^2 + jQ_{ex}(f/f_0 - f_0/f)}{(1 + Q_{ex}/Q_0)^2 + Q_{ex}^2 (f/f_0 - f_0/f)^2}, \quad (1.2)$$

де f_0 - резонансна частота вимірювального резонатора; Q_0 і Q_{ex} - його власна і зовнішня добротності, відповідно.

З (1.2) запишемо фазовий зсув

$$\Phi_r(f) = \arctg \left(\frac{Q_0 (f/f_0 - f_0/f)}{(1 - Q_{ex}/Q_0)^2 + Q_{ex}^2 (f/f_0 - f_0/f)^2} \right) \quad (1.3)$$

При $|f_1 - f_0| \ll 1$ вираз (1.3) зводиться до

$$\Phi_r(f) = \frac{4\pi(f - f_0)Q_0}{1 + Q_{ex}/Q_0} \quad (1.4)$$

Вирішуючи рівняння (1.1) з урахуванням (1.4) можна обчислити частоту генерації в АВС з порожнім резонатором. Якщо внаслідок заповнення резонатора досліджуваним матеріалом або середовищем частота резонатора змінилася на величину $\Delta f_0 = f_{02} - f_{01}$, то диференціюванням рівняння балансу фаз можна обчислити відповідну зміну частоти генерації Δf

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{\Delta f_0}{1 + \frac{\pi f_1 (1 + Q_{ex}/Q_0) \Delta t}{Q_0}} = \frac{\Delta f_0}{F}, \quad (1.5)$$

де f_2 - частота генерації в АВС резонатора зі зразком; F - коефіцієнт приведення зсуву частоти генерації до зсуву резонансної частоти.

Величина коефіцієнта приведення може бути оцінена по відомим власній і зовнішній добротності резонатора і часу затримки Δt в колі зворотного зв'язку, однак практично простіше виміряти F безпосередньо на макеті АВС в процесі калібрування.

АВС являє собою нелінійне коло з запізнювальним зворотним зв'язком. Щоб точно обчислити амплітуду A усталених в АВС коливань $y(t) = A \sin(2\pi f \cdot t)$, необхідно вирішити нелінійне диференційно-різницеві рівняння. Тут ми проведемо аналіз в першому наближенні, обмежившись малою нелінійністю. В цьому випадку справедливі простіші методи аналізу, такі як метод повільно змінних амплітуд або метод гармонійної лінеаризації. Уявімо підсилювач чисто активним елементом з коефіцієнтом посилення

$$G(y) = g_1 y - g_3 y^3 \quad (1.6)$$

Комбінуючи передавальні функції підсилювача (1.6), лінії затримки з запізненням $(t - \Delta t)$ і передавальну функцію резонатора (1.2) для великих коефіцієнтів зв'язку $2\beta \gg 1$ (або $2Q_0 \gg Q_{ex}$), отримаємо диференційне рівняння

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\pi f_0}{Q_0} \frac{dy}{dt} + (2\pi f_0)^2 y = \frac{2\pi f_0}{Q_{ex}} \frac{d}{dt} [g_1 y(t - \Delta t) - g_3 y^3(t - \Delta t)] \quad (1.7)$$

Методом повільно мінливих амплітуд можна отримати таку умову самозбудження синусоїдальних коливань в АВС:

$$g_1 \beta \cos(2\pi f \Delta t) > 1 \quad (1.8)$$

Фізичний сенс нерівності (1.8) полягає в тому, що коефіцієнт посилення повинен перевищувати коефіцієнт втрат в петлі автогенератора, для чого, в свою чергу, потрібно, щоб $\cos(2\pi f \Delta t) > 0$.

Підставляючи $y(t - \Delta t) = y \cos(2\pi f \Delta t) - \frac{dy}{dt} \frac{\sin(2\pi f \Delta t)}{2\pi f}$ і записавши рішення у вигляді $y(t) = A \sin(2\pi f \cdot t)$, отримаємо систему рівнянь

$$\left[1 + \frac{f_0}{f_{ex}} \frac{1}{Q_{ex}} \left(g_1 - \frac{3}{4} g_3 A^2 \right) \sin(2\pi f \Delta t) \right] - \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 = 0 \quad (1.9)$$

$$1 - \beta \left(g_1 - \frac{3}{4} g_3 A^2 \right) \cos(2\pi f \Delta t) = 0 \quad (1.10)$$

З першого рівняння (1.9) системи з урахуванням умови (1.8) отримаємо рівняння для частоти, з якої починається генерація в АВС:

$$Q_0(f/f_0 - f_0/f) = \operatorname{tg}(2\pi f \Delta t) \quad (1.11)$$

Якщо $2Q_0 \gg Q_{ex}$, рівняння (1.11) зводиться до умови (1.1). Знаючи, тепер частоту генерації з (1.10) знаходимо амплітуду автоколивань

$$A^2 = \frac{4}{3} \frac{g_1}{g_3} \frac{(g_1 \beta \cos(2\pi f \Delta t) - 1)}{\cos(2\pi f \Delta t)} \quad (1.12)$$

Останнє рівняння визначає ряд смуг генерації шириною $2\pi f \Delta t$, центри яких відповідають значенням, кратним 2π . Однак, припустимі лише ті рішення (1.10), які відповідають умові (1.8).

Резонаторні методи засновані на реєстрації резонансної частоти і добротності резонатора спочатку без діелектрика, а потім з розміщеним в резонаторі зразком. Методи вважаються ефективними при вивченні речовин, для яких ε' має значення від 1 до 15-20, а тангенс діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ - від 10^{-4} до 0,5 [45]. Однак, для речовин зі значними втратами їх точність зазвичай невисока – 2-3% для ε' і 10% для ε'' .

Якщо конструкція вимірювальної комірки дозволяє знайти для неї рішення електродинамічної задачі, то для визначення КДП не потрібно використовувати метод малих збурень. Наприклад, в [46] Гаташем описаний прецизійний діелектрометр резонансного типу і приведена функціональна схема установки в трисантиметровому діапазоні для дослідження швидких динамічних процесів в дисперсних водних суспензіях і біологічних розчинах. В роботі використані два циліндричних резонатора з коливанням H_{01n} , що включені в диференційну схему вимірювання. Один резонатор порожній, а в іншому містилася вимірювальна капілярна трубка, заповнена речовиною (наприклад, водою). Різниця відповідних резонансних частот становила до 400 кГц. У статті містяться результати вимірювань КДП, отримані при безперервній зміні діелектричної проникності в процесі агрегації тромбоцитів, що містяться в плазмі крові. Метод забезпечує високу точність по ε' - до 0,05%. Точність по ε'' становить 0,5% - 1%.

У міліметровому діапазоні Афсаром розроблені також методи визначення КДП сильно поглинаючих речовин за допомогою відкритих резонаторів [47]. Останнім часом розроблені резонансні методи, які використовують коливання типу шепочучої галереї (ШГ) в дискових і сферичних діелектричних резонаторах (ДР) [48, 49]. В роботі [50] досліджується дисковий квазіоптичний ДР з неоднорідністю у вигляді капіляра з водою. Виявлено, що характер поведінки власних частот резонатора з різними рідинами (етиловий спирт і вода) залежить від діаметра капіляра. В [51] вивчено вплив металевого дзеркала на вимушені коливання ШГ напівсферичного ДР. В [52] показано можливість управління резонансними частотами азимутальних коливань в складовому дисковому ДР за рахунок зміни товщини і вибору матеріалу допоміжного диска при визначенні КДП сильно поглинаючих рідин.

В роботі [53] розглянуто квазіоптичний дисковий діелектричний резонатор ДР радіусом 78 мм, обмежений по аксіальній координаті металевими площинами що збуджується на коливаннях ШГ. Вимірювана рідина містилася в

центральної області резонатора, що дозволило, не вдаючись до наближених методів, знайти характеристичне рівняння, що зв'язує резонансні частоти резонатора і КДП досліджуваної рідини. Схожа конструкція була застосована в роботі [54], де використовувався двошаровий тефлоновий дисковий резонатор у внутрішньому шарі якого може міститися досліджувана рідина, присутність якої викликає зсув резонансної частоти і зміну добротності резонатора, які чисельно залежать від КДП цієї рідини.

Дещо інше рішення, що дозволяє використовувати для вимірювань мікродози досліджуваної рідини, запропоновано в [55]. Тут також застосований дисковий діелектричний резонатор з коливаннями ШГ, але рідина поміщається в мініатюрному каналі, розташованому поза резонатором, і, в той же час, в полі цього резонатора, що дає можливість регулювати ступінь взаємодії досліджуваної рідини з полем.

В роботі [56] використовувався напівсферичний металевий резонатор, заповнений вставкою з тефлону в центрі якої знаходиться напівсферична порожнина, що заповнюється вимірюваною рідиною. У разі порушення в резонаторі TE_{111} моди присутність рідини в порожнині має найбільший, у порівнянні з більш високими модами, вплив на зсув резонансної частоти і зниження добротності резонатора, що дозволяє проводити вимірювання КДП сильно поглинаючих рідин. В [57] для проведення таких вимірювань використовується циліндричний резонатор.

Розглядаючи роботи з дослідження слабо поглинаючих середовищ резонаторними методами, можна відзначити, наприклад, роботу [58], в якій запропонований метод для вивчення спектральних і поляризаційних властивостей відкритого резонатора (ВР) з розташованим в ньому плоскому шарі ізотропного діелектрика. Отримано дисперсійне рівняння, за допомогою якого можна визначити діелектричну проникність такого діелектрика. У статті [59] запропонований метод вимірювання діелектричної сталої тонких плівок, нанесених на підкладку з оптично щільного матеріалу, за допомогою відкритого резонатора. Запропоновано диференційний метод, заснований на

вимірюванні зсувів резонансної частоти, викликаних наявністю діелектричної плівки. В роботі [60] резонатор Фабрі-Перо використано для вимірювання параметрів діелектричних матеріалів з малим поглинанням.

Відкриті резонатори (ВР) з успіхом застосовуються для визначення імпедансу надпровідних плівок. Так, в роботі [61] описується конструкція напівконфокального резонатора на частоті 36 ГГц, в якому в якості плоского дзеркала використовується досліджувана плівка з високотемпературного надпровідника (ВТНП). В [62] наведені результати подібних вимірів з використанням напівконфокального ВР на частоті 94 ГГц, а в [63] – на частоті 100 ГГц. Чутливість таких вимірювань обмежувалася втратами в сферичному дзеркалі, оскільки воно було виконано з металу зі звичайним типом провідності. Істотно більш висока чутливість досягнута в роботі [64], де застосовано сферичне дзеркало з ніобію, охолоджуване до температури рідкого гелію.

В роботі [65] описана конструкція активної системи для вимірювання фізичних властивостей матеріалів на базі квазіоптичного генератора. Наведено результати експериментального дослідження приладу для вимірювання вологості матеріалів.

1.2. Хвилеводні методи

Вектор електричної індукції в ізотропних діелектриках паралельний вектору напруженості прикладеного електричного поля. При досить швидкій зміні електричного поля зміна електричної індукції відбувається з запізненням, яке потрібно для переорієнтації молекул середовища. Таке запізнення є однією з фундаментальних фізичних властивостей речовини і носить назву часу діелектричної релаксації [66]. Для випадку, коли зовнішнє електричне поле має синусоїдальний характер і частота його занадто велика, щоб можна було знехтувати релаксацією, електричну індукцію можна представити у вигляді:

$$D = \varepsilon E \sin(\omega t + \varphi) = \varepsilon' E \sin \omega t + \varepsilon'' E \cos \omega t, \quad (1.13)$$

де $\varepsilon' = \varepsilon \cos \varphi$; $\varepsilon'' = \varepsilon \sin \varphi$.

Величини ε і φ в достатній мірі описують ефект запізнювання поляризації діелектрика під впливом зовнішнього електричного поля. Не менш правильно цей процес описує і пара величин ε' і ε'' . Вони описують різні фізичні процеси, що відбуваються в діелектрику, які зрушені відносно один одного по фазі на 90° . Якщо ввести комплексні величини для полів і комплексної діелектричної проникності ε , можна записати вираз для електричної індукції у вигляді:

$$D = \varepsilon \bar{E}^{i(\omega t + \varphi)} = (\varepsilon' + i\varepsilon'') \bar{E} e^{i\omega t} = (\varepsilon' + i\varepsilon'') \bar{E} \quad (1.14)$$

Вода на частотах сантиметрового або міліметрового діапазону довжин хвиль є найбільш відомим прикладом сильно поглинаючих рідин. До частот короткохвильового частини міліметрового діапазону діелектричні властивості вільної води добре описуються формулою Дебая другого порядку [67]. Перший час релаксації $\tau_1 \approx 8 \text{ pS}$ при температурі 25°C , обумовлений перебудовою системи водневих зв'язків водних кластерів, визначає максимум поглинання на частоті близько 18 ГГц [67, 68]. Розчинені молекули можуть змінити час релаксації як за рахунок зв'язування частини молекул вільної води (гідратація), так і за рахунок перебудови водневих зв'язків в кластерах. Останній механізм характерний для водно-спиртових сумішей [13, 68].

Практично можна виконати абсолютні вимірювання КДП сильно поглинаючих рідин з похибками порядку десятих часток відсотка. Наприклад, в серії робіт Букмастера по розробці техніки вимірювань КДП води на частоті 9,335 ГГц досягнута абсолютна похибка вимірювань дійсної частини КДП близько 0,1%, а уявної частини - близько 0,2% [69, 70]. Однак, установка [70] являє собою унікальний вимірювальний комплекс і мало придатна для

проведення вимірювань КДП в умовах біохімічних лабораторій. Особливо це відноситься до кювети діелектрометра, утвореної прямокутними хвилеводами, що всуваються один в інший, поміщеними в термостат з прецизійним підтриманням температури робочої зони (близько $\pm 0,005^\circ \text{C}$).

Хвилеводні методи широко застосовуються в діапазоні міліметрових хвиль, з їх допомогою вивчено багато різних хімічних і біологічних речовин. Гранична частота, при якій ще можливе застосування хвилеводних методів з прийнятною похибкою, становить 140 ГГц [71]. Більшість таких методів засновано на вимірі імпедансу хвилеводної системи, в якій розташований досліджуваний зразок (рис. 1.6). Можливо вивчення в широкому частотному діапазоні як твердих, так і рідких речовин. Найбільш придатними об'єктами є речовини з середніми втратами ($0,1 < \text{tg} \delta < 1$). Похибка вимірювання ε' найчастіше становить 0,5%, а $\text{tg} \delta$ – 3-5%. Відомо кілька різновидів хвилеводних методів. Так, у варіанті повного заповнення перетину вивчається картина стоячих хвиль в хвилеводі [45].

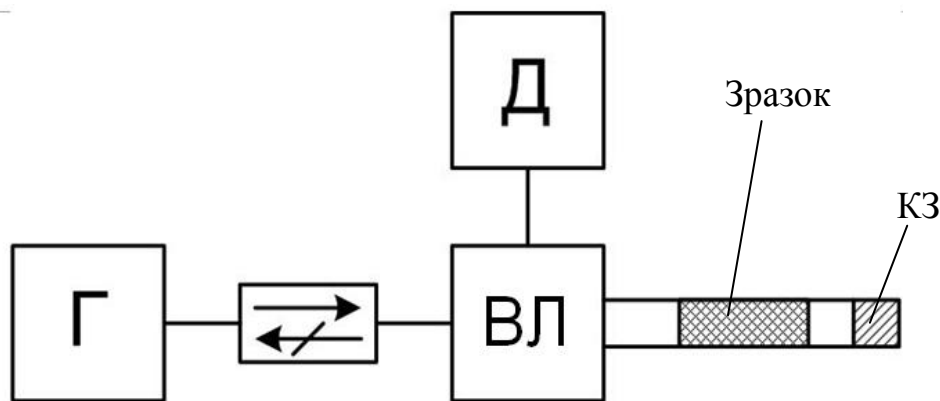


Рис. 1.6. – Узагальнена схема хвилеводного методу вимірювання КДП

За відсутності зразка в лінії існує стояча хвиля. Якщо ж у короткозамкненому кінці хвилеводу поміщається зразок, то відбувається зміщення стоячої хвилі, а амплітуда відбитої від зразка хвилі стає менше

амплітуди падаючої. Вимірювання таких змін дозволяють знайти діелектричні параметри зразка.

Ван Лун і Фінсі застосували подібну методику для вивчення рідких зразків в області частот від 5 до 40 ГГц і від 60 до 150 ГГц. [72]. При цьому вони відзначили практичні труднощі при використанні хвилеводних методів на частотах вище 40 ГГц через недостатню механічну міцність і зростання втрат в хвилеводі. Автори бачать дві основні перешкоди для досягнення високої точності: незважаючи на ретельне виготовлення вимірювальної секції, в хвилеводі відбуваються небажані віддзеркалення, в хвилеводних стінках є втрати, а на неоднорідностях збуджуються вищі моди.

Красовим П. С. був створений автоматизований дослідницький апаратно-програмний комплекс для проведення медико-біологічних експериментів з використанням хвилеводного методу вимірювання КДП [73], який знайшов широке застосування в практичних роботах по вивченню діелектричних характеристик еритроцитів пацієнтів з дисциркуляторною енцефалопатією до і після лікування [74, 75]. Проблема розробки датчиків для діагностики на ранній стадії захворювань серцево-судинної системи шляхом вимірювання діелектричної проникності крові пацієнтів теоретично опрацьована в [76]. Запропонована вдосконалена модель чвертьхвильових резонансних датчиків для спрощення їх проектування.

У роботах Афсара та інших [77, 78] і Фукса та Каатце [79] також велика увага приділена аналізу можливих помилок і рекомендацій щодо підвищення точності вимірювань. Для довгохвильової частини міліметрового діапазону вдалося знизити похибку визначення $\Delta \varepsilon' / \varepsilon'$ і $\Delta \varepsilon'' / \varepsilon''$ до величини 0,02. Алексеев і Зіскін [80] вимірювали відбиття, проходження і поглинання електромагнітних хвиль при взаємодії з плівковими зразками (вода і водно-спиртові розчини). При 42,25 ГГц і 53,35 ГГц вивчався вплив товщини плівки, а також характер поглинання в комірці в залежності від товщини і конструкції ізолюючих прокладок. Автори виявили, що оптимальною товщиною зразка, при

якій відбувається рівномірне поглинання електромагнітної енергії, є інтервал 0,28 – 0,33 мм.

Алісон і Шеппард [81] сконструювали хвилеводний діелектрометр, в якому шар рідини змінювався за допомогою короткозамикаючого поршня, що переміщується в рідині. Товщина шару варіювалася з кроком 0,06 мм. Проникність в частотному діапазоні 29 – 44 ГГц знаходили за допомогою вимірювання коефіцієнта відбиття для двох різних товщин. Рідина відокремлювалася від порожньої частини хвилеводу за допомогою віконця з органічного скла. Виникнення вищих мод в перехідній секції автори не спостерігали. Пізніше цим же методом Алісон і Шеппард виміряли проникність людської крові в більш широкій смузі 29 – 90 ГГц [82]. Питання про вплив електромагнітного опромінення на біологічні об'єкти та, зокрема, на організм людини, широко досліджуються, і результати таких досліджень знаходять відображення у відповідних рекомендаціях [83, 84].

У статті, опублікованій Занфорліном [85], описується вимірювальний пристрій, що дозволяє визначати КДП рідин з великими втратами в області міліметрових хвиль. Основою діелектрометра є хвилеводний інтерферометр (міст), в якому в вимірювальному каналі знаходиться комірка з рідиною, що опромінюється з відкритого кінця прямокутного хвилеводу. Товщина зразка змінюється за допомогою поршня, що переміщується мікрометричним гвинтом. В результаті вихідний сигнал на мості виявляється функцією товщини рідини. У всьому частотному діапазоні, в якому поширюється основний тип коливань, забезпечена висока чутливість. Автор наводить результати, отримані для етанолу, метанолу і чистої води при 20° С і 70 ГГц. Пізніше діелектрометр був вдосконалений. У варіанті, що наведений в [69] була застосована двоканальна супергетеродинна система з подвійним перетворенням частоти. Автори проаналізували джерела похибок і розробили способи їх зменшення. З цією метою проводилося максимально точне вимірювання довжини зразка, були збільшені частота і стабільність сигналу, підвищено якість робочих характеристик НВЧ вузлів і блоків обробки вихідного сигналу.

А.А. Ашеко та інші [86] сконструювали експериментальний стенд відбивного типу на частоті 35,5 ГГц в інтервалі температур 271 - 353 К. Систематичні помилки у визначенні дійсної та уявної складових діелектричної проникності в їх установці не перевищують 0,5% і 0,8% відповідно. За допомогою стенду досліджені температурна і концентраційна залежності проникності води та водних моно- і поліелектролітних систем.

Диференційні вимірювання КДП мають перевагу перед абсолютними в разі, коли необхідно виміряти малі зміни КДП в досліджуваних сильно поглинаючих розчинах. При цьому хвилеводні методи в порівнянні з резонаторними мають перевагу, оскільки похибки останніх досить великі в міліметровому діапазоні. Так, цікаві результати одержані у відділі біофізики ІРЕ НАН України за допомогою оригінального диференційного діелектрометра при вирішенні задач молекулярної біофізики [87, 88]. Показано, що диференційний діелектрометр найбільш ефективний для дослідження невеликих змін у взаємодії біомолекул з розчинником, викликаних дією зовнішніх чинників.

Для вимірювання діелектричної проникності водних розчинів біомолекул, як рідин з великими втратами, може з успіхом застосовуватися метод змінної товщини, застосований Грантом і Шеком для визначення КДП води на частоті 35 ГГц [89]. Використовувалася комірка, в якій довжина шляху, що проходить хвиля в рідині, може змінюватися. Метод заснований на визначенні за допомогою хвилеводного моста зміни поглинання і фази сигналу, що пройшов через досліджуваний зразок при зміні його довжини. Потім з вимірних величин автори знаходили значення КДП.

Відомі хвилеводно-диференційні методи вимірювання КДП відрізняються типом використовуваних вимірювальних комірок, вибір яких диктується досліджуваною рідиною, умовами і метою проведених вимірювань. Так, широке застосування знаходять кювети на основі порожнистих хвилеводів, повністю заповнених рідинами, які сильно поглинають [69], а також кювети з хвилеводами, в поперечному перерізі яких встановлено капіляр з

досліджуваною рідиною [14]. Відомо і використання діелектричних хвилеводів для вимірювання КДП сильно поглинаючих рідин [90].

В роботі [91] розглянуто застосування хвиль НВЧ діапазону для аналізу електричних властивостей багатокомпонентних водних розчинів. Показано, що для цих цілей бажано використовувати вимірювання діелектричної проникності на двох частотах (сантиметрового і міліметрового діапазонів) зі співвідношенням частот близько 4. Запропонована методика апробована при дослідженні діелектричної проникності 12 зразків сухих вин на частотах 9,2 ГГц і 34,6 ГГц.

1.3. Висновки до розділу 1

Актуальність використання методу вимірювання діелектричної проникності для дослідження речовин обумовлена тим, що діелектрометрія поєднує в собі можливості отримати уявлення про структуру речовини, її хімічний склад, вплив різних зовнішніх факторів з достатньою простотою в порівнянні з використовуваними для цих же цілей, наприклад, методами ЯМР або ЕПР.

Не дивлячись на різноманітність розглянутих методів вимірювання КДП сильно поглинаючих рідин, проблема залишається досить актуальною через труднощі отримання необхідної точності вимірювання КДП для надійної ідентифікації водних розчинів хімічних і біологічних речовин і відмінностей між ними.

Застосування резонаторного методу в міліметровому діапазоні в разі сильно поглинаючих речовин дуже ускладнюється тим, що при використанні класичного варіанту малих збурень тільки малі (в порівнянні з розмірами резонатора) зразки дозволяють уникнути помітного спотворення поля резонатора і зміни його добротності, що важко враховується. Крім того, в разі речовин з великими значеннями втрат (тангенс діелектричних втрат $\text{tg}\delta \sim 1$)

резонансна крива стає дуже пологою, що ускладнює вимір добротності і, відповідно, визначення КДП зразка.

Існуючі способи вимірювання КДП сильно поглинаючих рідин в мікрохвильовому діапазоні мають як переваги, так і певні недоліки. В більшості своїй для лабораторних вимірювань використовується габаритне обладнання.

РОЗДІЛ 2

АКТИВНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА 8-ММ ДІАПАЗОНУ З РЕЗОНАТОРОМ ФАБРІ-ПЕРО В КОЛІ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Одне з можливих рішень АВС - вимірювальний резонатор в колі зворотного зв'язку підсилювача НВЧ діапазону. Розробка твердотільних, а значить і малогабаритних, АВС такого типу в НВЧ діапазоні довго стримувалася відсутністю транзисторних підсилювачів в цьому діапазоні. В даний час ситуація докорінно змінилася.

У розділі коротко описано побудову і роботу АВС з використанням резонатора Фабрі-Перо, особливості застосування стандартного модуля НВЧ-підсилювача для застосування в складі АВС. Висвітлено питання розробки квазіоптичного резонатора для такої системи. Наведено також результати вимірювання слабких змін КДП газового середовища і результати натурних випробувань прототипу радіорефрактометра.

Результати досліджень, що увійшли до розділу 2, доповідалися на конференціях [30, 31], опубліковані в статтях [17, 24, 25, 26].

2.1. Застосування мікросхеми СНА3093С99F в автоколивальному режимі

Узагальнена схема АВС з резонатором в колі зворотного зв'язку підсилювача не залежить від типу використаного резонатора і приведена на рис. 1.5 (див. Розділ 1). В діапазоні НВЧ досліджувалася робота схеми з резонатором Фабрі-Перо (рис. 2.1). Як приклад іншого типу резонатора, який може бути застосований для побудови АВС, може виступати циліндричний резонатор з модами типу шепочучої галереї (рис. 2.2)

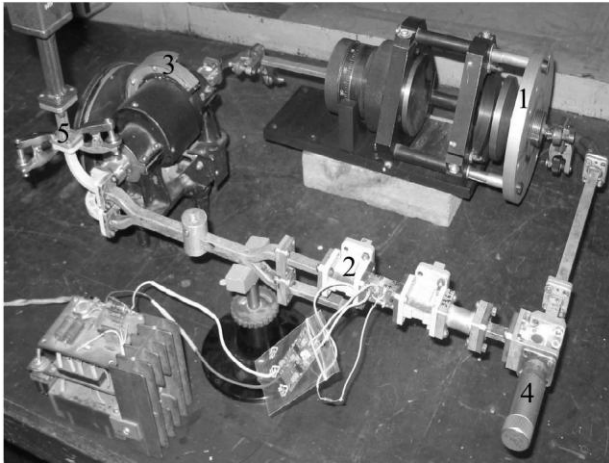


Рис. 2.1. – АВС з резонатором Фабрі-Перо (1) в колі зворотного зв'язку твердотільного підсилювача (2); (3) - зворотного зв'язку вимірювальний атенюатор; (4) підсилювача; (2) - отвір для вимірювальний фазообертач; (5) - заповнення рідиною; вихідний фланець пристрою

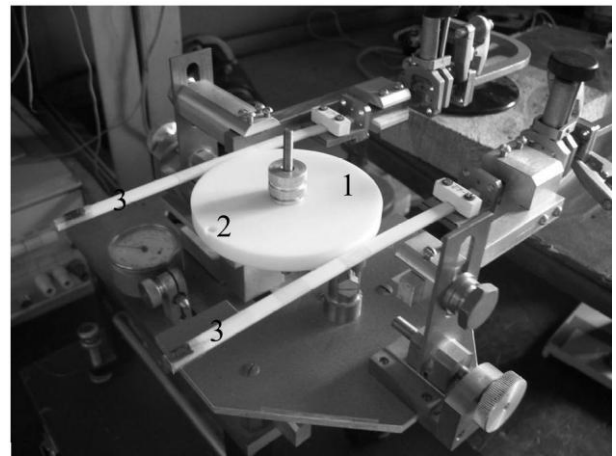


Рис. 2.2. – АВС з тефлоновим дисковим резонатором (1) в колі зворотного зв'язку твердотільного підсилювача; (2) - отвір для вимірювальний фазообертач; (3) - діелектричні хвилеводи зв'язку

Твердотільний підсилювач, який використовувався в даному дослідженні, був розроблений на основі GaAs монолітної інтегральної мікросхеми СНА3093С99F. Мікросхема є 4-х каскадним підсилювачем середньої потужності на польових транзисторах в діапазоні 20...40 ГГц з вихідною потужністю до 100 мВт і змонтована в хвилеводному корпусі з перетином хвилеводу 7,2x3,4 мм. Зовнішній вигляд підсилювача показано на рис. 2.3. На рис. 2.4 представлена залежність малосигнального коефіцієнта підсилення розробленого підсилювача. У складі АВС мікросхема застосовується в позаштатному - автоколивальному режимі роботи. Динамічний діапазон потужності, що генерується в режимі автоколивань з одного боку обмежений допустимою розробником мікросхеми потужністю на вході підсилювача близько 1 мВт [92]. З іншого боку динамічний діапазон обмежений умовою (1.8) (див. Розділ 1) збудження автоколивань.

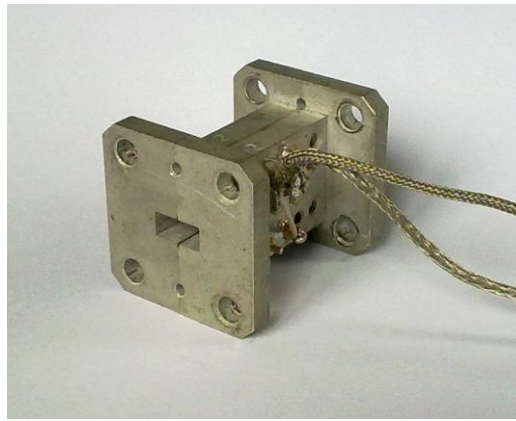


Рис. 2.3. – Зовнішній вигляд твердотільного підсилювача

В результаті, в номінальному (рекомендованому розробником) режимі живлення мікросхеми, динамічний діапазон автогенератора виявляється малим (не більше 1,5 дБ). Цього явно не досить, коли потрібно проводити вимірювання в більш широкому діапазоні зміни коефіцієнта загасання в колі зворотного зв'язку.

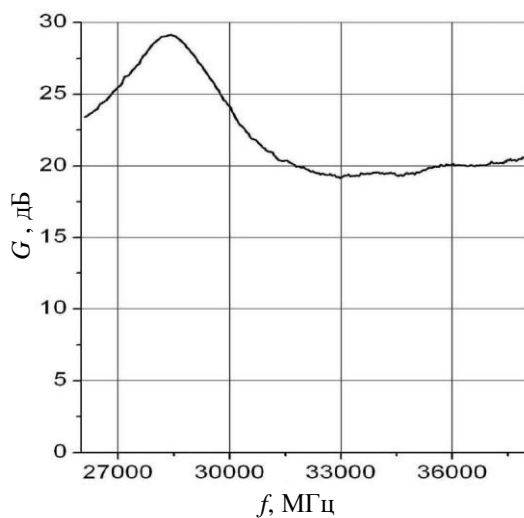


Рис. 2.4. – Коефіцієнт підсилення твердотільного підсилювача в смузі частот стандартного хвилеводу

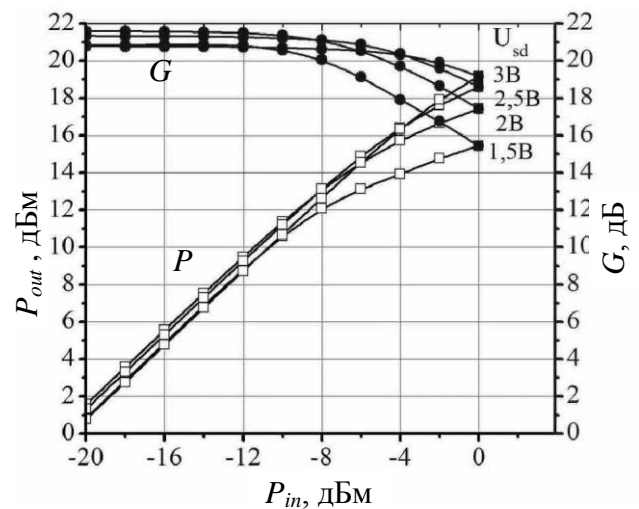


Рис. 2.5. – Коефіцієнт підсилення G та вихідна потужність P підсилювача для ряду напруг «стік-витік»

Розширення динамічного діапазону було досягнуто зміною штатного режиму живлення мікросхеми. Для цього було замовлено виготовлення

спеціального примірника підсилювача з можливістю зміни параметрів живлення трьох каскадів.

Експериментальним шляхом було встановлено, що серед всього діапазону змін напруги «стік-витік» максимум підсилення при малому сигналі і максимум насичення підсилення відбувається при $U_{sd}=1,8$ В. Потім для експериментально знайденого оптимального значення «стік-витік» $U_{sd}=1,8$ В були досліджені залежності вихідної потужності від вхідної для різних напруг «затвор-витік» і залежності коефіцієнта підсилення від вхідної потужності для цих же значень напруг «затвор-витік».

За результатами проведених вимірювань було встановлено, що максимальне значення коефіцієнта підсилення при малому сигналі і максимум насичення підсилення досягається при напрузі «затвор-витік» всіх трьох регульованих каскадів що дорівнює 200 мВ. На рис. 2.5 представлено сімейство залежностей амплітудних характеристик підсилювача для різних напруг «стік-витік» при фіксованих напругах «затвор-витік» чотирьох каскадів польових транзисторів мікросхеми.

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

Частота генерації в схемі рис. 2.1 контролюється одним з типів коливань резонатора Фабрі-Перо. На рис. 2.6 наведено сімейство залежностей «резонансна частота-довжина резонатора», розраховане для TEM_{00q} типів коливань. Діапазон зміни довжини резонатора відповідає використаному макету резонатора. Точками відкладені виміряні резонансні частоти резонатора Фабрі-Перо для двох фіксованих відстаней між дзеркалами. Бачимо, що розрахунок дає задовільну відповідність з даними вимірювань.

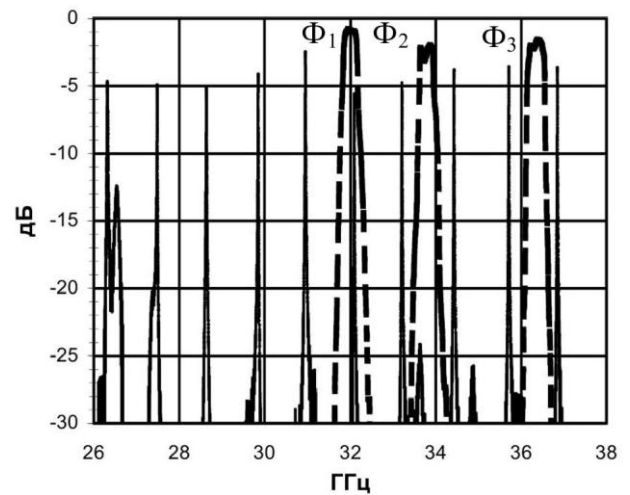
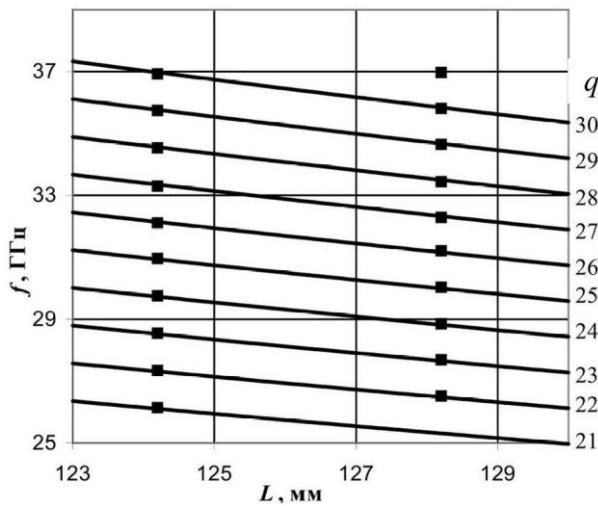


Рис. 2.6. – Власні частоти TEM_{00q} мод резонатора Фабрі-Перо: розрахунок і дані вимірювань – точки

Рис. 2.7. – Ділянка спектра резонатора та АЧХ фільтрів Φ_1 , Φ_2 та Φ_3

Оскільки використовується широкодіапазонний твердотільний підсилювач, то генерація можлива на будь-якій частоті стандартного хвилеводу перетином $7,2 \times 3,4$ мм в одномодовому режимі. При фіксованій довжині резонатора самозбудження коливань може статися на різних резонансних частотах TEM_{00q} типів коливань. Щоб уникнути небажаних перескоків частоти між різними гілками дисперсійних кривих резонатора (рис. 2.6), діапазон частот, на яких може статися самозбудження генератора, був обмежений за допомогою смугопрускаючого фільтра.

Синтез фільтра виконувався без використання строгого електродинамічного аналізу структури в цілому. Був використаний, так званий, гібридний метод синтезу фільтра, що включав в себе синтез нормованого фільтра-прототипу і послідовний ітераційний синтез геометрії. Синтез нормованого фільтра-прототипу ґрунтується на апроксимації необхідної амплітудно-частотної характеристики мікрохвильового смугового фільтра з залученням методів інтерполяції і наближення функцій з використанням загальної теорії синтезу електричних кіл [93]. Ітераційний синтез геометрії проводився чисельним методом з використанням програми для

електродинамічного моделювання. За результатами розрахунків були виготовлені три смугопускаючих фільтра. Зовнішній вигляд одного з фільтрів і його конструктивні елементи показані на рисунках 2.8 і 2.9.

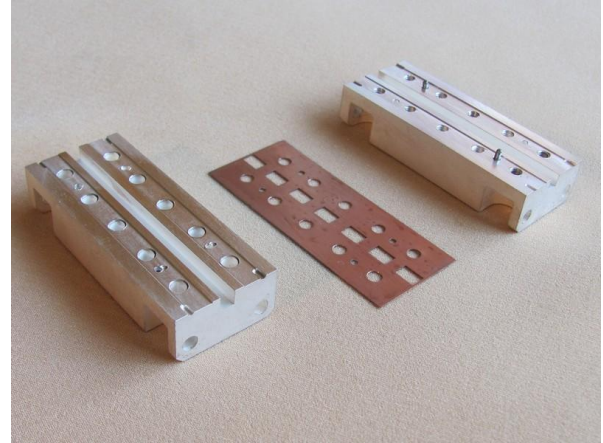
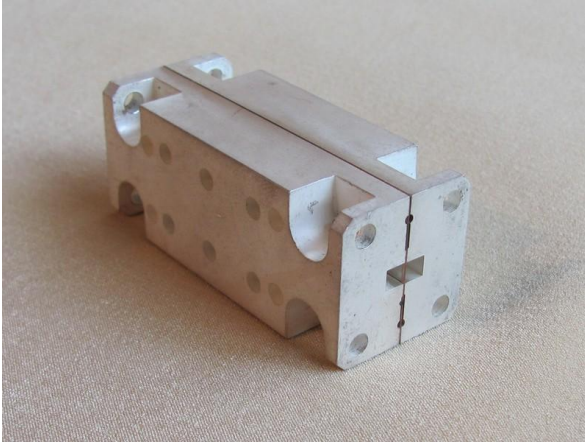


Рис. 2.8. – Зовнішній вигляд зібраного фільтра
Рис. 2.9. – Конструктивні елементи смугопускаючого фільтра

На рис. 2.7 представлена вимірня ділянка спектра резонатора Фабрі-Перо. Апертура дзеркал і довжина резонатора обрані такими, що коефіцієнти передачі вищих типів коливань як мінімум на 25 дБ нижчі, ніж коефіцієнти передачі основних типів коливань. На цьому ж рис. 2.7 показані АЧХ трьох розроблених смугопускаючих фільтрів. Бачимо, що використання фільтра дозволить зафіксувати частоту генерації в межах зміни частоти лише одного наперед заданого типу коливань резонатора.

У смузі пропускання смугопускаючого фільтра будуть спостерігатися коливання з частотою, яка визначається рівнянням (1.11) (див. Розділ 1). Зміна часу затримки Δl сигналу в колі зворотного зв'язку буде викликати зміну частоти генерації. Амплітуда автоколивань буде змінюватися відповідно до виразу (1.12) (див. Розділ 1). На рис. 2.10 представлені результати відповідних вимірювань. Зміна часу затримки досягалася шляхом переміщення короткозамикаючого поршня. Спостерігаємо ряд зон генерації шириною $\Phi = 4\pi f \Delta l / \lambda_g \approx 180^\circ$, де λ_g - довжина хвилі в хвилеводі, Δl - переміщення поршня.

Центри зон відповідають положенням короткозамикаючого поршня фазообертача, які вирізняється на π , оскільки хвиля двічі проходить відрізок хвилеводу в конструкції фазообертача.

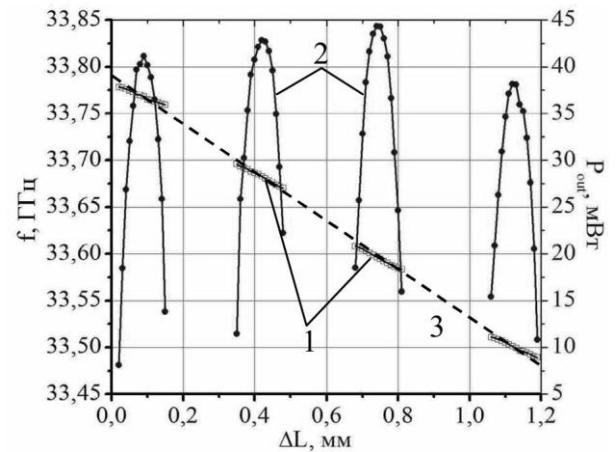
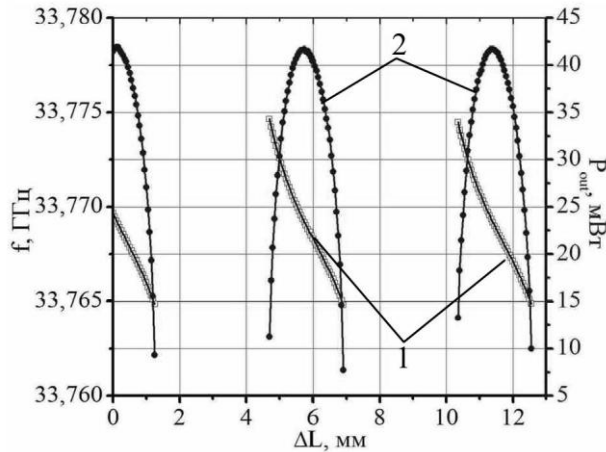


Рис. 2.10. – Залежність частоти генерації (1) і потужності на виході підсилувача (2) від збільшення фази в кола зворотного зв'язку

Рис. 2.11. – Залежність частоти генерації (1) і потужності (2) на виході підсилувача від довжини резонатора. Пунктир - розрахункова дисперсійна крива

Зміна частоти і потужності генерації в результаті зміни власної частоти резонатора Фабрі-Перо представлена на рис. 2.11. Також спостерігається ряд зон генерації в смузі пропускання фільтра. Однак, в цьому випадку частоти в центрах сусідніх зон різні. По різниці частот можна обчислити час затримки кола зворотного зв'язку з рівняння $n\lambda_{g1} = (n+1)\lambda_{g2}$, де n - кількість довжин хвиль, що укладаються по контуру кола зворотного зв'язку на довжині хвилі λ_{g1} , а довжини хвиль в хвилеводі λ_{g1} і λ_{g2} обчислюються по частотах центрів сусідніх зон генерації (рис. 2.11). З рівняння також випливає, що відстань між центрами зон буде збільшуватися в міру укорочення петлі як $(1/n)$. У межах кожної зони діапазон перебудови частоти також буде збільшуватися, оскільки відповідно до виразу (1.12) (див. Розділ 1) буде збільшуватися ширина зон у міру зменшення часу затримки Δt в петлі.

Зменшення крутизни перестроювання частоти в межах зон генерації (рис. 2.11) у порівнянні з крутизною перестроювання власної частоти резонатора також обумовлено наявністю довгої петлі зворотного зв'язку в макеті. Це твердження безпосередньо впливає з рівняння (1.11) (див. Розділ 1). У міру укорочення петлі крутизна перестроювання частоти буде прагнути до крутизни дисперсійної кривої резонатора. Однак, при вимірах показника заломлення повітря автогенераторним методом необхідно враховувати вплив петлі зворотного зв'язку. Для цього необхідно виміряти коефіцієнт приведення F (див. (1.5) Розділ 1) змін частоти генерації до відповідних змін власної частоти резонатора.

Ідея методики вимірювань проста. Досить виміряти зсув частоти генерації Δf і зсув власної частоти резонатора Δf_0 при однакових впливах на резонатор Фабрі-Перо, і провести обчислення $F = \Delta f_0 / \Delta f$. Однак, практична реалізація ідеї вимагає ретельного опрацювання деталей експерименту. Перестроювання частоти резонатора здійснювалася за допомогою переміщення плоскої пластини пінопласту. Дані вимірювань представлені на рис. 2.12 точками. Потім синусоїдальні зміни частоти методом середніх квадратів апроксимувались формулою $a_0 \cos(a_1 x + a_2) + a_3$, і, тим самим, обчислювалися коефіцієнти a_i . Шукане значення розраховувалося за формулою $F = a_{0r} / a_{0g}$, де a_{0r} - амплітуда варіацій власної частоти резонатора, а a_{0g} - амплітуда варіацій частоти в автогенераторних вимірах. Отримано $a_{0g} = 4,6345\text{E-}3$, $a_{0r} = 6,8675\text{E-}3$ і $F = 1,482 \pm 0,002$. Оцінка коефіцієнта приведення по зовнішній і власній добротностям і часу затримки дає приблизно таке ж значення.

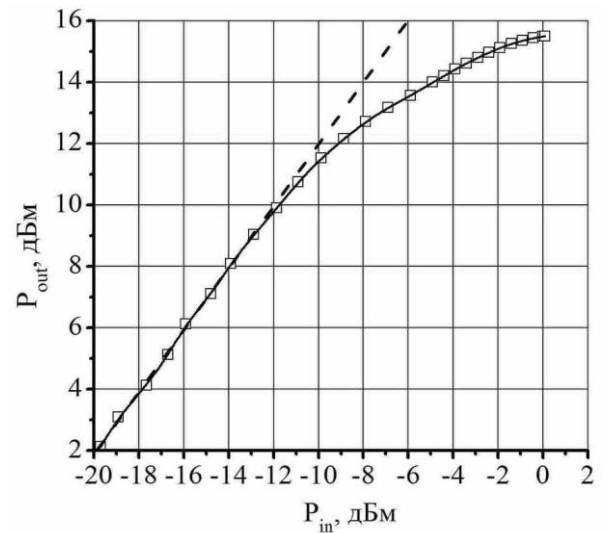
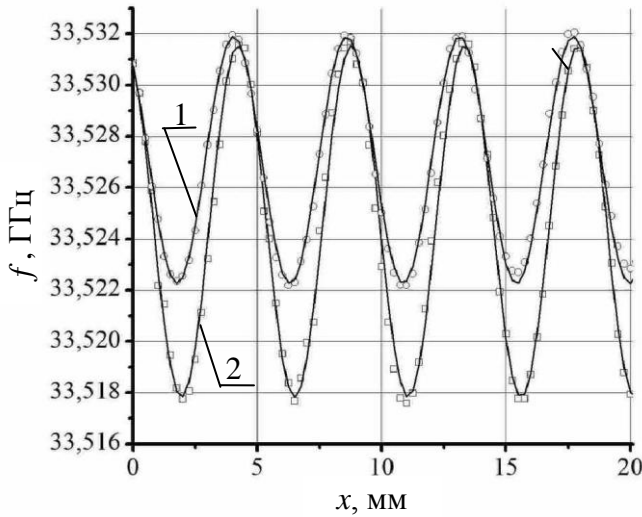


Рис. 2.12. – Залежність частоти генерації (1) і резонансної частоти резонатора Фабрі-Перо (2) від переміщення пінопластової пластини вздовж осі. Точки – дані вимірювань, суцільні криві – апроксимація синусоїдою

Рис. 2.13. – Залежності вихідної потужності від рівня потужності на вході підсилювача

Для того, щоб судити про втрати в досліджуваних середовищах, помічених в резонатор, необхідно або вимірювати зміну власної добротності резонатора, або зміну модуля коефіцієнта передачі через резонатор. Автогенераторні методи вимірювань безпосередньо дають інформацію про коефіцієнт передачі, якщо вимірювати відношення потужностей на виході і вході підсилювача $G_{os} = P_{out} / P_{in}$ в режимі автоколивань. Перерахунок G_{os} в коефіцієнт передачі резонатора з теоретичних моделей не надійний. Краще провести пряме калібрування автоколивальної вимірювальної системи. Важливо, щоб в процесі калібрування були незмінними частота і фаза. Таке калібрування проводилося за допомогою прецизійного вимірювального атенюатора, регулювання якого з ослаблення сигналу не змінює фазу. Вимірювальний резонатор Фабрі-Перо при цьому, був виключений з кола зворотного зв'язку. Результати калібрування представлені на рис. 2.13. У широкому діапазоні зміни загасань залежність приблизно лінійна.

При розробці вимірювальної системи автоколивального типу важливо знати, як впливає зміна температури корпусу твердотільного підсилювача на частоту і потужність автоколивань. Такий експеримент був також проведений. За допомогою батареї термоохолоджувачів Пельтьє підсилювач охолоджувався до температури нижче кімнатної приблизно на 10°C (рис. 2.14). Далі, у міру збільшення температури корпусу в процесі теплообміну з навколишнім середовищем, вимірювалися частота і потужність генерації. Виміри проведені при наявності і за відсутності резонатора в колі зворотного зв'язку. Температура корпусу вимірювалася терморезистором, встановленим на корпусі підсилювача.

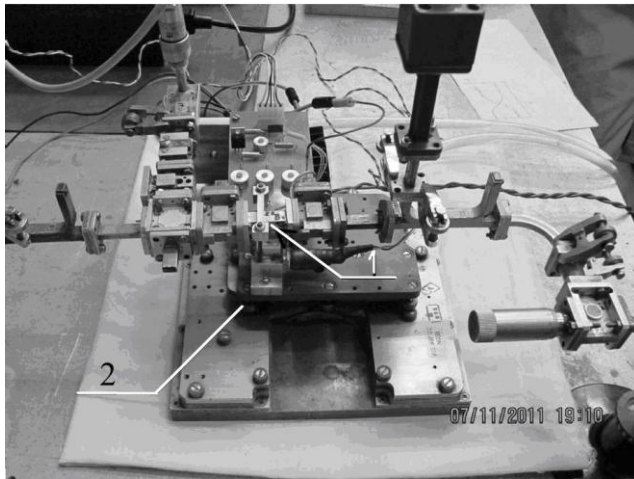


Рис. 2.14. – Фотографія макета автогенератора в експерименті по охолодженню підсилювача батареєю елементів Пельтьє (2)

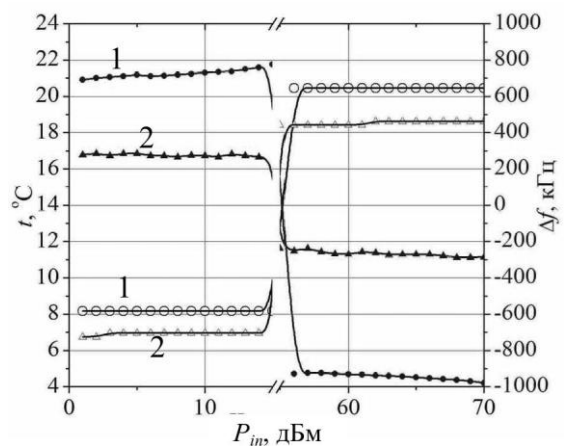


Рис. 2.15. – Динаміка зміни частоти і температури корпусу підсилювача від самопрогріву спочатку охолодженого підсилювача при наявності (1) і відсутності (2) резонатора в колі зворотного зв'язку

Результати вимірювань представлені на рис. 2.15. З графіків можна визначити температурний коефіцієнт частоти АВС. У присутності резонатора він склав $47,5 \text{ кГц} / ^{\circ}\text{C}$, а без резонатора в колі зворотного зв'язку – $136 \text{ кГц} / ^{\circ}\text{C}$. Мала відмінність (три рази) температурних коефіцієнтів пояснюється

стабілізуючою дією самої петлі зворотного зв'язку. Вона тим більше, чим більше час затримки.

Звертає на себе увагу також факт, що середньоквадратична девіація частоти автоколивань системи з резонатором виявилася більшою, ніж системи без резонатора. Вимірювання частоти проводилися електроннолічильним частотоміром ЧЗ-66 при часі рахування (усереднення) 1 с протягом 15 хвилин в умовах, коли встановлювався стаціонарний температурний режим корпусу підсилювача. Пояснюється це тим, що в процесі експерименту з резонатором відчувався вплив малих конвекційних потоків повітря в кімнаті, а отже, і в резонаторі Фабрі-Перо

2.2. Розробка високодобротного термостабільного квазіоптичного резонатора

Теорія резонаторів Фабрі-Перо міліметрового діапазону до теперішнього часу розроблена досить повно з тим, щоб успішно виконати конструювання резонаторів з заданими характеристиками. У квазіоптичному наближенні (апертура дзеркал багато більше довжини хвилі) в резонаторі Фабрі-Перо збуджуються типи коливань, резонансні частоти яких задовільно описуються формулою [111]

$$f_{n,m,q} = \frac{c}{2L} \left[q + 1 + \frac{1}{\pi} (2n + m + 1) \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)} \right], \quad (2.1)$$

де L - довжина резонатора, R_1, R_2 - радіуси кривизни дзеркал.

В правильно сконструйованому резонаторі дифракційні втрати δ_{0d} основних $TEM_{0,0,q}$ типів коливань можуть бути зроблені малими в порівнянні з тепловими втратами δ_{0t} в дзеркалах і діелектричними втратами δ_{0m} в об'ємі резонатора. Навантажену добротність Q_L можна обчислити за формулою [94]:

$$Q_L = \frac{2\pi L}{\lambda_r \delta_L}, \quad (2.2)$$

де δ_L - відносна потужність втрат запасеної енергії за час $\tau = L/c$, що дорівнює часу проходження хвилі від дзеркала до дзеркала. Таким чином, втрати навантаженого резонатора $\delta_L = (\delta_0 + \delta_{EXT} + \delta_{SC})$ є сума втрат в матеріалі дзеркал, дифракційних втрат на апертурах дзеркал і діелектричних втрат в середовищі заповнення резонатора $\delta_0 = (\delta_{or} + \delta_{od} + \delta_{om})$, а також втрат в хвилеводах зв'язку δ_{EXT} і втрат через розсіювання резонансного типу коливань на елементах зв'язку (ЕЗ) резонатора з хвилеводами δ_{SC} . Крім того, зниження ефективності збудження ВР через наявність нерезонансного випромінювання також знижує чутливість вимірювань.

Щоб зробити втрати внаслідок розсіювання на ЕЗ настільки ж малими в порівнянні з діелектричними втратами, як і дифракційні втрати, були досліджені ЕЗ у вигляді щілини і у вигляді отвору в діафрагмі різних розмірів на дзеркалі ВР [26]. Результати досліджень ефективності збудження резонатора і ефективності виведення енергії з нього представлені на рис. 2.16.

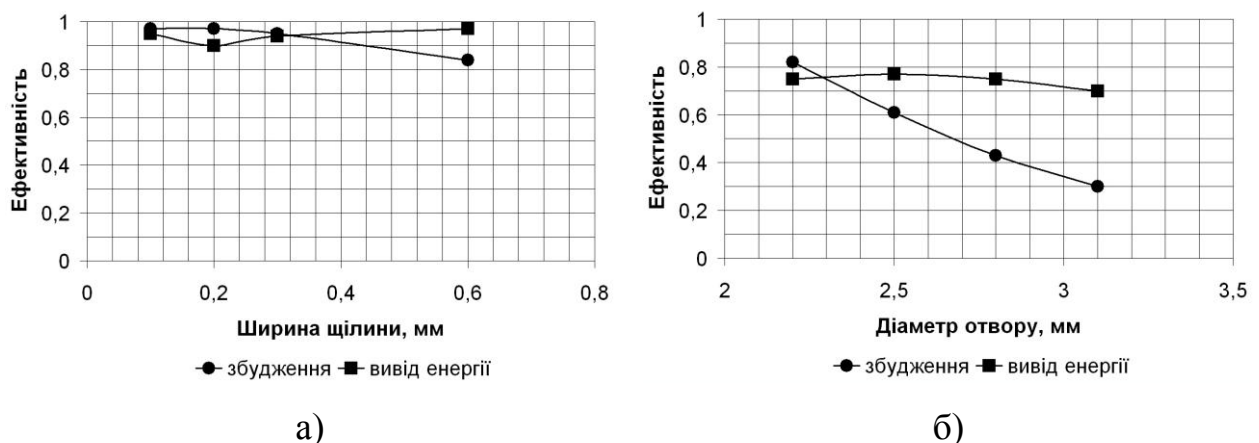


Рис. 2.16 – Залежність ефективності збудження відкритого резонатора і ефективності виведення енергії з нього для різних розмірів ЕЗ у вигляді щілини а) і у вигляді отвору в діафрагмі б)

Як видно з рис. 2.16, ЕЗ у вигляді щілини мають більшу ефективність збудження і більшу ефективність виведення енергії $\eta_{OUT} = \delta_{EXT} / (\delta_{EXT} + \delta_{SC})$. Оптимізуючи, як показано в [26], розміри елементів зв'язку резонатора з хвилеводом, можна, таким чином, підвищувати добротність резонатора, а через це і чутливість вимірювань діелектричної проникності.

В повітрі, вільному від зважених частинок пилу і крапель води, загасання зобов'язане своїм походженням збудженню молекул газової суміші з подальшою релаксацією енергії через взаємні зіткнення молекул. У 8-мм діапазоні довжин хвиль визначальний внесок в поглинання вносять молекули кисню і водяної пари. Так, максимум поглинання в парах води поблизу довжини хвилі 1 см обумовлений переходами між 5-м і 6-м оберतालними рівнями молекули H_2O [95].

З формули (2.1) явно випливає, що зміна довжини резонатора на величину ΔL призведе до зміни резонансної частоти основних $TEM_{0,0,q}$ типів коливань на величину Δf , яку з достатньою точністю можна оцінити за формулою

$$\Delta f = -f(\Delta L / L) . \quad (2.3)$$

Внаслідок теплового розширення корпусу резонатора при зміні температури навколишнього середовища буде відбуватися зміна резонансної частоти відповідно до формули (2.3), що може замаскувати корисний ефект зміни резонансної частоти внаслідок зміни діелектричної проникності повітря в об'ємі резонатора. Ця обставина є головною проблемою при конструюванні вимірювального резонатора Фабрі-Перо.

Як наслідок загальної теорії збудження відкритих резонаторів будь-якого типу, розвиненою в [96], можна отримати, що резонатори, повністю заповнені середовищем з діелектричної сталою ε , змінюють резонансну частоту при зміні діелектричної сталої на малу величину $\Delta\varepsilon$ так, що

$$\Delta f / f = -(\Delta \varepsilon / 2\varepsilon) . \quad (2.4)$$

Точно така ж зміна частоти відбувається і в об'ємних резонаторах будь-якої геометрії, збуджених на довільному типі коливань [97]. Формула (2.4) для об'ємних резонаторів безпосередньо впливає з рівнянь Максвела і граничних умов на металевих стінках.

Скориставшись формулами для діелектричної проникності повітря, можна показати, що температурний коефіцієнт відносної зміни резонансної частоти внаслідок ізобаричної зміни температури повітря постійного складу дорівнює $(\Delta f / f) / \Delta T = 0,4 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$.

Температурний коефіцієнт відносної зміни резонансної частоти внаслідок розширення корпусу резонатора, як впливає з (2.3), має негативний знак, а за абсолютною величиною дорівнює температурному коефіцієнту лінійного розширення матеріалу корпусу резонатора. Для більшості металів температурний коефіцієнт лінійного розширення по порядку величини складає $10^{-5} / ^\circ C$, і тільки для інвару дорівнює $(0,8 - 0,9) \cdot 10^{-6} / ^\circ C$. Таким чином, для прецизійних вимірювань діелектричної проникності повітря резонаторним методом повинні бути вжиті заходи щодо усунення впливу теплового розширення корпусу на результати вимірювань.

У вимірювальній техніці широко відомі різні способи термокомпенсації зміни резонансної частоти резонаторів різних типів [98]. Для резонатора Фабрі-Перо цей прийом також може бути з успіхом застосований (рис. 2.17 і рис. 2.18). Принцип термокомпенсації резонатора Фабрі-Перо зрозумілий з рис. 2.17. Довжина L резонатора дорівнює різниці довжини інварових стрижнів 3 і довжини латунної частини конструкції $l_c = (l_{c1} + l_{c2})$: $L = (l_I - l_c)$. Зміна довжини резонатора при підвищенні температури на один градус складе $\Delta L = (\sigma_I l_I - \sigma_c l_c)$, де σ_I і σ_c - температурні коефіцієнти лінійного розширення інвару та латуні, відповідно.

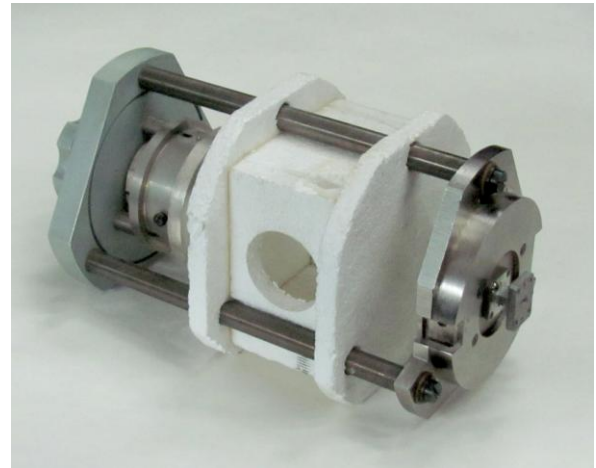
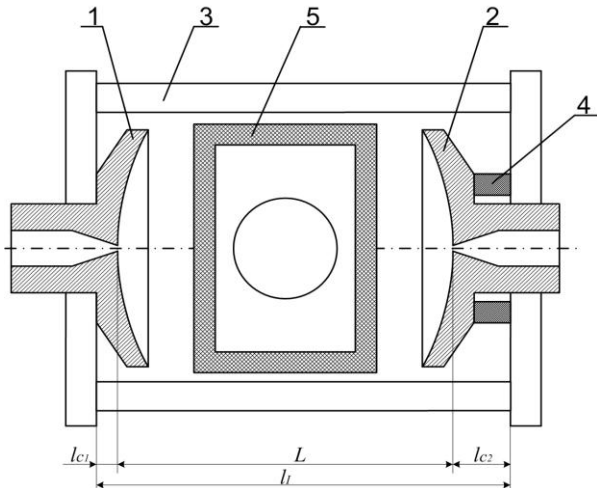


Рис. 2.17. – Схема конструкції вимірювального резонатора Фабрі-Перо для радіорефрактометра: 1, 2 сферичні дзеркала; 3 інварові стрижні; 4 латунні вставки; 5 пінопластова камера (кювета) для прокачування повітря через резонатор

Рис. 2.18. – Вимірювальний резонатор Фабрі-Перо

З умови термокомпенсації $\Delta L = 0$ отримаємо:

$$l_c = \frac{\sigma_I}{\sigma_c - \sigma_I} L . \quad (2.5)$$

Практично налаштувати систему термокомпенсації резонатора Фабрі-Перо, тобто виконати умову (2.5), зручно способом підбору довжини латунних вставок 4 для заданої довжини резонатора. Контроль налаштування зручно проводити по значенню резонансної частоти, яку можна точно вимірювати за допомогою еталонного синтезатора частоти на частоті максимуму амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) резонатора. Під час налаштування особливу увагу слід приділяти контролю зміни резонансної частоти внаслідок зміни діелектричної проникності повітря. Це означає, що слід або мінімізувати зміну

частоти, обумовлену зміною діелектричної проникності, до нехтовно малої величини, або враховувати величину цієї зміни, скориставшись (2.4) і відомими виразами для діелектричної проникності повітря.

На рис. 2.18 представлена практична реалізація термокомпенсованого резонатора Фабрі-Перо. Проведені експерименти показали можливість досягнення температурного коефіцієнта зміни резонансної частоти порядку $10^{-7} / ^\circ\text{C}$. Для більш точного налаштування системи термокомпенсації потрібні подальші зусилля, наприклад, створення стенду, що включає професійну камеру тепла і холоду з системою контролю складу газового середовища в цій камері.

Друга необхідна модифікація резонатора Фабрі-Перо, що застосовується для створення радіорефрактометра полягає в поєднанні резонатора з камерою для прокачування атмосферного повітря. Призначення камери - захист дзеркал резонатора від впливу атмосфери і просушування елементів конструкції від крапель води, що з'являються при охолодженні газу, який знаходиться в камері, нижче точки роси. Перетин камери схематично показано на рис. 2.17. Через камеру буде примусово прокачуватися повітря.

Плоскопаралельні стінки камери повинні бути виконані з радіопрозорого матеріалу. Конструкція і розміри камери забезпечують максимальний коефіцієнт заповнення об'єму резонатора досліджуваним повітрям. У лабораторному прототипі радіорефрактометра камера була виготовлена з пінопласту із закритою порою. Останнє пов'язано з необхідністю усунути гігроскопічний ефект проникнення вологи до пластин. Таким чином, електродинамічно камера являє собою тришарову кювету, у якій діелектрична проникність середнього шару дорівнює діелектричній проникності досліджуваного повітря. Більш детально питання розрахунку і виготовлення радіопрозорої камери висвітлено в наступному розділі.

2.3. Результати вимірювання слабких змін КДП газового середовища

Схема побудови термокомпенсованого вимірювального резонатора Фабрі-Перо і його зовнішній вигляд наведені на рис. 2.17 і рис. 2.18, відповідно. Кімнатне повітря прокачується феном через камеру, змонтовану в об'ємі резонатора Фабрі-Перо. Пінопластові стінки камери ізолюють інварові стрижні резонатора від впливу температури повітря, що прокачується. Спостерігається зміна температури повітря в камері, а також зміна частоти і потужності АВС в циклах «нагрів-охолодження». У початковий момент встановлюється максимальна потужність нагріву спіралі фена, а через 15-20 хвилин – мінімальна потужність, далі цикл повторюється. Температура вимірювалася ртутним термометром з ціною поділки $0,1^{\circ}\text{C}$, а частота і потужність – електроннолічильним частотоміром і термоелектричним вимірником потужності, відповідно. Дані одного з експериментів представлені на рис. 2.19.

Очевидно, що динаміка зміни індексу заломлення і коефіцієнта поглинання повітря в резонаторі легко відслідковуються зі зміни частоти і потужності АВС. Аналізуючи ці виміри, можна констатувати, що поряд з різкою зміною температури повітря в моменти перемикавання режиму роботи фена з подальшим процесом встановлення теплового балансу, в камері також відбувається більш повільний процес монотонної зміни складу повітря за експоненціальним законом. Найімовірніше, з підвищенням температури збільшується абсолютна вологість. З часових залежностей $t^{\circ}\text{C}$ та Δf на рис. 2.19 можна зробити висновок, що стала часу ртутного термометра істотно більше сталої часу зміни температури повітря в кюветі резонатора. Флуктуації частоти генерації, які добре простежуються в майже сталих станах теплового балансу системи, пов'язані з відхиленнями усереднених за об'ємом камери макроскопічних параметрів (абсолютної вологості, тиску і температури) повітря.

Спостережувані зміни частоти генерації можна перерахувати в зміни індексу заломлення $N = (n-1)10^6 = (\sqrt{\varepsilon} - 1)10^6 \approx 0,5(\varepsilon - 1)10^6$. Зміна діелектричної

проникності повітря $\Delta\varepsilon$ обернено пропорційна K_ε - коефіцієнту перетворення вимірювального резонатора $\Delta\varepsilon = \Delta f_0 / K_\varepsilon$ де Δf_0 - зміна резонансної частоти вимірювального резонатора. Оціночно, $K_\varepsilon = -fd/2L$, де f - середня частота, d - товщина кювети (шар повітря), L - довжина резонатора. При перерахунку слід також врахувати коефіцієнт приведення F змін частоти генерації Δf до змін резонансної частоти $\Delta f_0 : \Delta f_0 = F \Delta f$. Результати розрахунку індексу рефракції $N = N_0 + (F/2K_\varepsilon)10^6 \Delta f$ представлені на рис. 2.20.

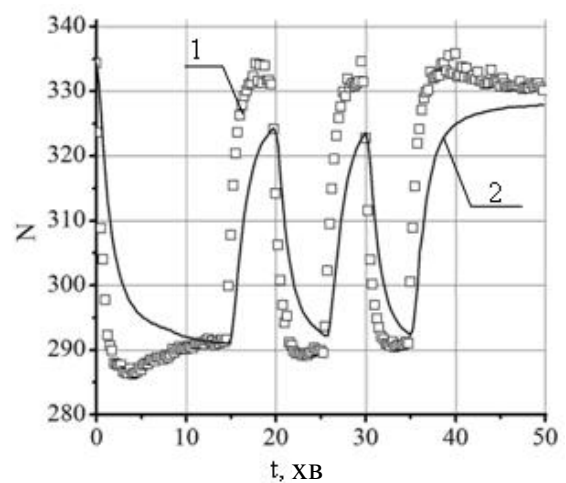
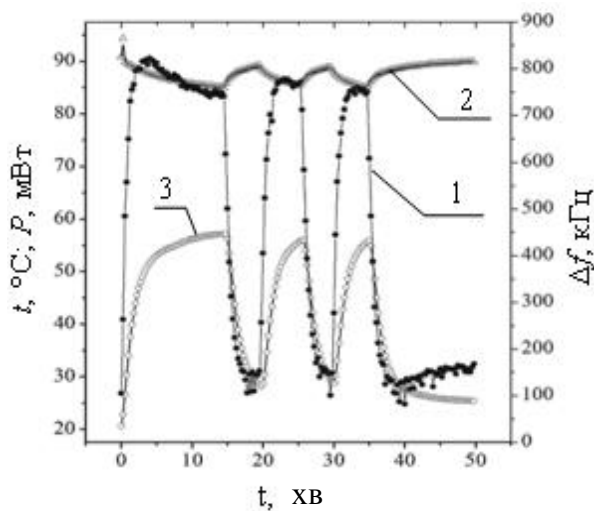


Рис. 2.19. – Динаміка зміни частоти (1) і потужності (2) АВС при заломлення повітря з даних нагріванні-охолодженні повітря, що вимірювань (рис. 2.19): (1) частоти; прокачується через кювету, (2) температури (3) - температура

На тому ж рисунку представлені результати розрахунку залежності індексу заломлення від температури в припущенні, що абсолютна вологість повітря в кюветі (концентрація водяної пари) не змінюється і дорівнює абсолютної вологості в приміщенні під час експерименту $P_w = 14$ мбар = const. Використовувалися дані вимірювань динаміки зміни температури (рис. 2.19).

Розрахунок зміни індексу заломлення проведено, з використанням відомої напівемпіричної формули [99]:

$$\varepsilon = 1 + \left[\frac{157}{T} \left(p + \frac{4800P_w}{T} \right) 10^{-6} \right], \quad (2.6)$$

де p — атмосферний тиск, $T = 273,15 + t$ — абсолютна температура повітря, P_w — парціальний тиск водяної пари.

Порівнюючи залежності на рис. 2.20 можна зробити висновок, що припущення про постійність вологості приблизно виконується тільки в періоди різкої (адіабатичної) зміни температури. У міру встановлення теплового балансу, коли температура мало змінюється в часі, визначальним стає процес зміни абсолютного вмісту парів води в резонаторі. Внаслідок цього, похідна зміни індексу заломлення змінює знак.

Поглинання електромагнітної енергії в резонаторі монотонно змінюється протягом усього періоду монотонної зміни температури повітря (див. залежність зміни потужності на рис. 2.19), починаючи з моменту перемикавання режиму нагріву спіралі фена. Для того, щоб підтвердити припущення про зміну абсолютної вологості, як причини змін поглинання в повітрі кювети, був поставлений прямий експеримент. Мініатюрний датчик вводився в кювету резонатора замість ртутного термометра, що використовувався раніше.

Вимірювалася динаміка зміни температури і відносної вологості в кюветі резонатора в циклі «нагрівання-охолодження», як у попередньому вимірі. Дані вимірювань представлені на рис. 2.21. З моменту включення фена і до моменту його перемикавання монотонно підвищується температура і зменшується відносна вологість повітря. Ґрунтуючись на цих даних, був виконаний розрахунок зміни парціального тиску парів води в повітрі кювети.

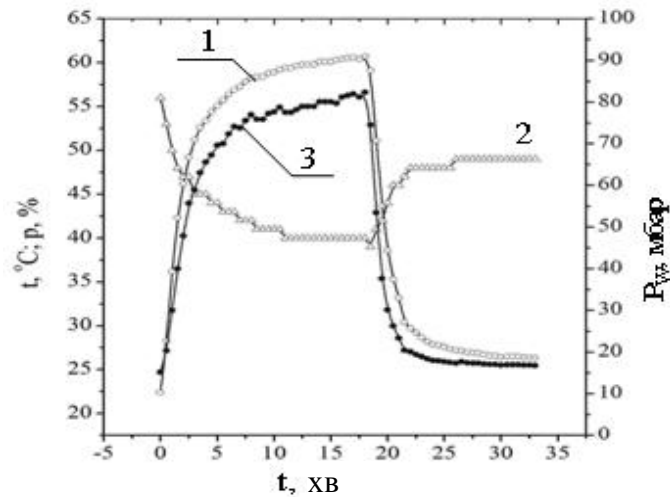


Рис. 2.21. – Динаміка зміни температури (1) і відносної вологості (2) повітря в циклах нагрівання-охолодження повітря в кюветі; (3) - розрахунковий тиск парів води

Парціальний тиск водяної пари за визначенням дорівнює $P_w = eE_w/100$, де E_w - тиск насичених парів води, який залежить тільки від абсолютної температури. У розрахунку використовувалася формула [100]:

$$\lg E_w = 10,79574 \left(1 - \frac{273,16}{T}\right) - 5,028 \lg \frac{T}{273,16} + 1,50475 \cdot 10^{-4} [1 - 10^{-8,2969(T/273,16-1)}] + 0,42873 \cdot 10^{-3} [10^{4,76955(1-273,16/T)} - 1] + 0,78614 \quad (2.7)$$

Таким чином, з рис. 2.21 випливає, що в експериментах по нагріванню повітря в кюветі відносна вологість монотонно знижувалася, проте, абсолютна вологість повітря в кюветі зростала. У процесі охолодження повітря спостерігається зворотна картина. Саме тому, в експерименті рис. 2.19 відбувалося монотонне зменшення потужності АВС при нагріванні і монотонне збільшення потужності при охолодженні. Перехід від адіабатичної зміни температури в кюветі до майже ізотермічної подачі вологого повітря в кювету пояснює зміну похідної залежності індексу заломлення в часі.

2.4. Випробування рефрактометра автоколивального типу з відкритим резонатором

Тут представлені результати натурального експерименту по вимірюванню індексу заломлення повітря за допомогою лабораторного прототипу рефрактометра автоколивального типу. Резонатор Фабрі-Перо в колі зворотного зв'язку твердотільного підсилювача розміщувався за вікном лабораторії, а всі інші елементи схеми і вимірювальні прилади знаходилися всередині приміщення (рис. 2.22).

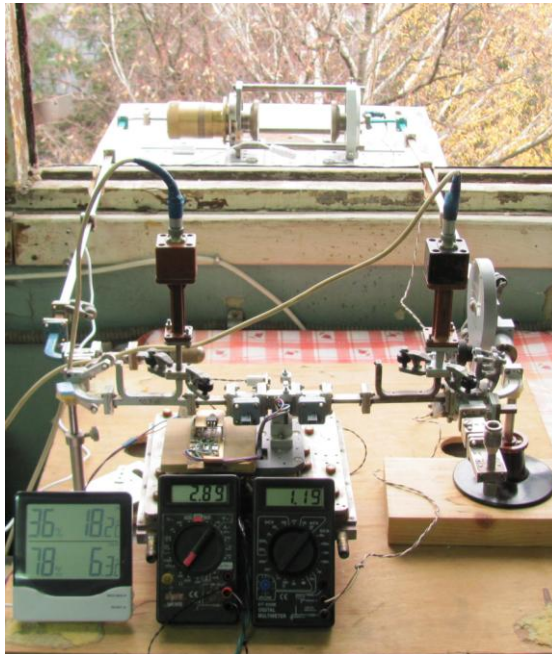


Рис. 2.22. – Фотографія сценарію натурального експерименту

Зрозуміло, що первинним датчиком змін показника заломлення і коефіцієнта поглинання тропосфери є резонатор Фабрі-Перо. У стаціонарних пунктах вимірювання показника заломлення тропосфери досить забезпечити винесення за межі приміщення тільки резонатора, що і було зроблено в цьому експерименті.

Хвилеводи кола зворотного зв'язку прокладені крізь раму вікна і в місцях фланцевих з'єднань захищені від проникнення в них атмосферного повітря.

Твердотільний підсилювач, смуговий фільтр, спрямовані відгалужувачі, атенюатор і фазозсуваюче коло розміщені в приміщенні.

Частота автоколивань вимірювалася за допомогою електронно-лічильного частотоміра ЧЗ-66. Зміни коефіцієнта передачі резонатора Фабрі-Перо внаслідок змін поглинання в тропосфері відповідають змінам коефіцієнта підсилення твердотільного підсилювача, який визначався по відношенню показань двох вимірювачів потужності на вході і на виході підсилювача.

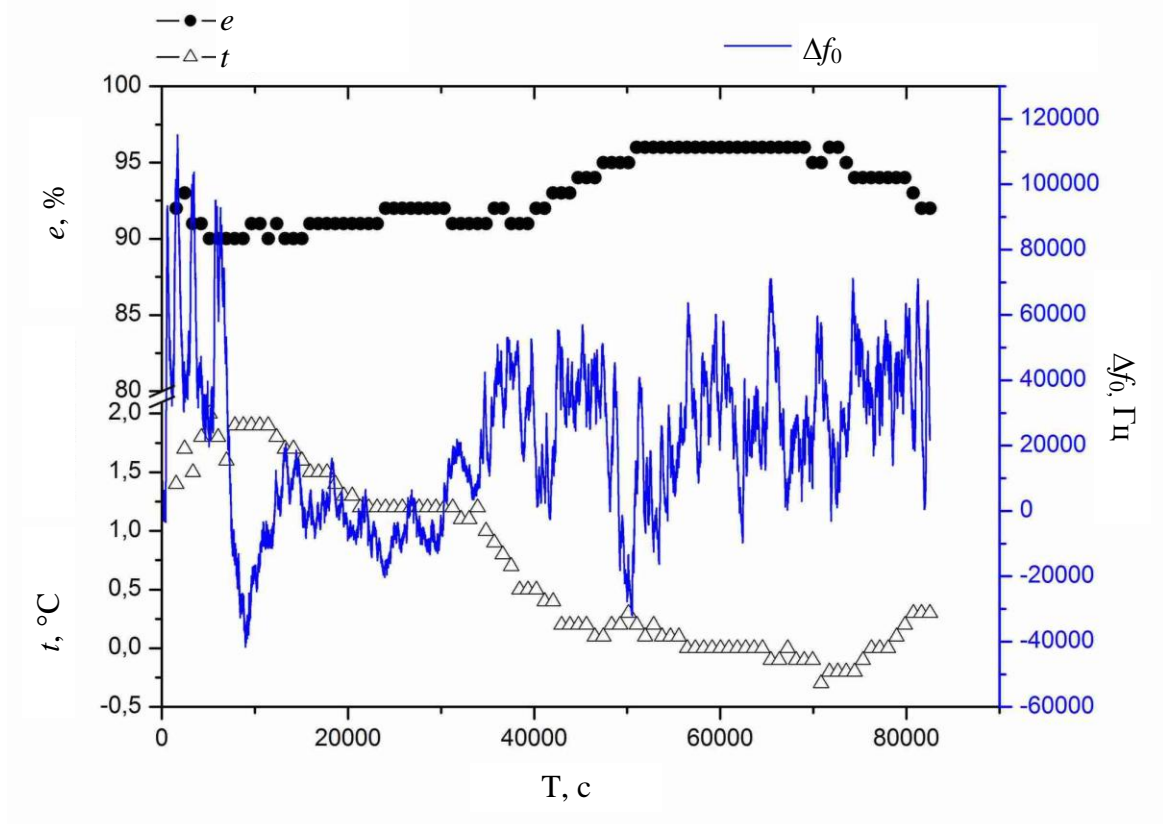


Рис. 2.23. – Зміни частоти автоколивань, температури і відносної вологості в ході експерименту

Крім частоти автоколивань і коефіцієнта підсилення вимірювалися також температура, відносна вологість і атмосферний тиск в місці установки вимірювального резонатора Фабрі-Перо. Також контролювалася і температура корпусу твердотільного підсилювача. Експеримент проводився безперервно протягом доби. Час усереднення частоти становив $\tau = 1$ с, а час очікування –

$(T - \tau) = 0,87$ с, період вимірювання частоти, таким чином, становив $T = 1,87$ с. Період вимірювання інших параметрів становив 15 хвилин. За час експерименту атмосферний тиск і температура корпусу підсилювача залишалися незмінними і становили 1010 ± 5 мбар і $19,6 \pm 0,1^\circ \text{C}$, відповідно. Первинні дані вимірювання інших величин представлені на рис. 2.23 і рис. 2.24.

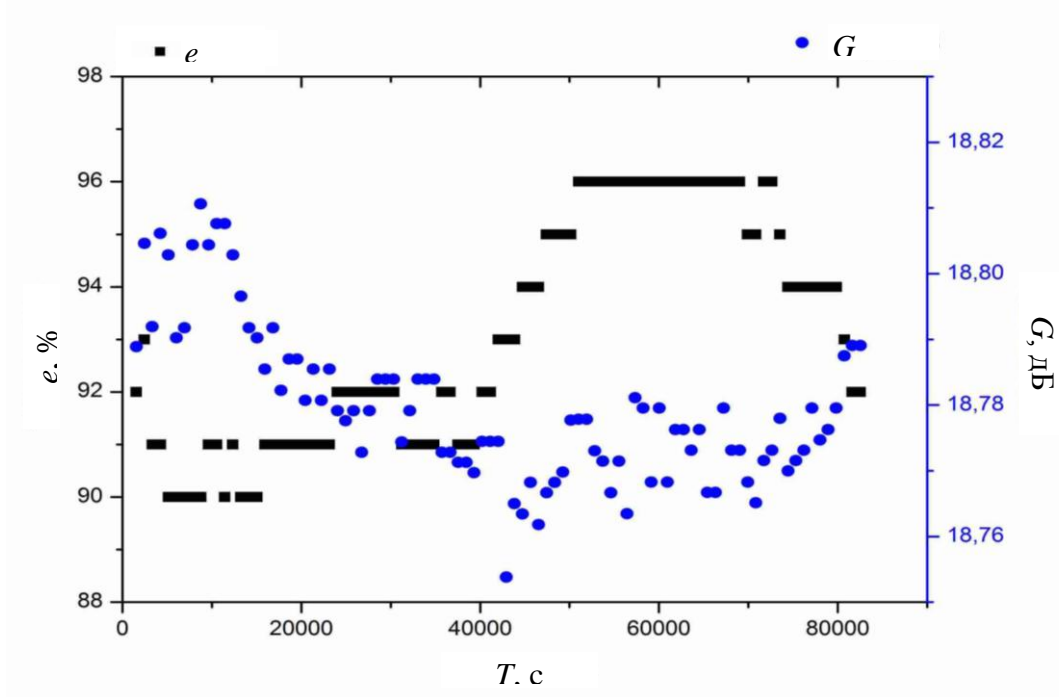


Рис. 2.24. – Зміна коефіцієнта підсилення і відносної вологості в ході експерименту

Роздільна здатність використаного термо-гігрометра TFA Dostmann/Wertheim становить $\pm 0,1^\circ \text{C}$ при вимірюванні температури і $\pm 1\%$ при вимірюванні відносної вологості, що наочно видно на графіках (рис. 2.23 і рис. 2.24). У той же час абсолютна похибка вимірювань при використанні цього приладу, згідно його технічної специфікації, становить $\pm 1^\circ \text{C}$ для температури і $\pm 5\%$ для вологості.

В ході добового експерименту відзначалися лише незначні зміни температури (близько 2°C) і відносної вологості (близько 5%) повітря (рис. 2.23), тобто стан тропосфери було близьким до стаціонарного. Зрозуміло,

що в цих умовах показник заломлення тропосфери $N = (n - 1)10^6 = (\sqrt{\varepsilon} - 1)10^6 \approx 0,5(\varepsilon - 1)10^6$, де ε - діелектрична проникність повітря, також не зазнав істотних змін, що цілком зрозуміло, враховуючи (2.6)

Результати розрахунків показника заломлення N за даними вимірювань параметрів тропосфери представлені на рисунку 2.24.

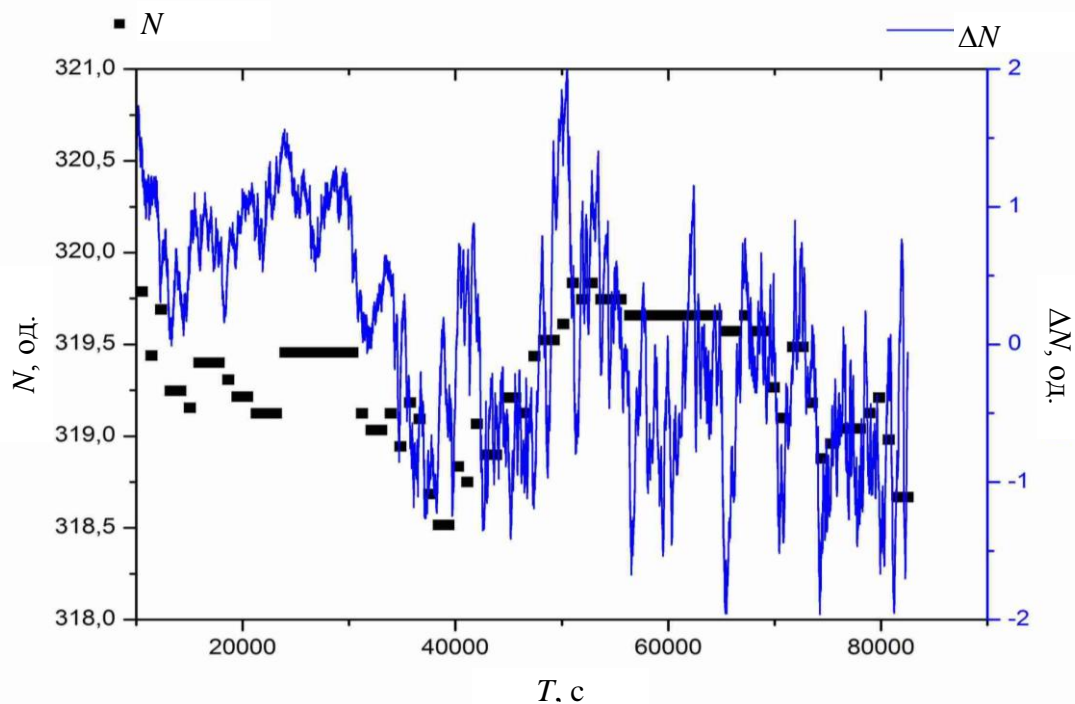


Рис. 2.25. – Показник заломлення N , розрахований за даними вимірювання параметрів тропосфери, і зміна показника ΔN , розрахована за даними вимірів частоти

На рис. 2.25 наведені також результати розрахунку зміни показника заломлення ΔN тропосфери за результатами вимірювання частоти автоколивань рефрактометра. Відомо, що зсув Δf_0 власної частоти вакуумованого резонатора Фабрі-Перо після заповнення його об'єму газовим середовищем описується формулою:

$$\Delta N = -\Delta f_0 \cdot 10^6 / f_0 . \quad (2.8)$$

Відомо що

$$\Delta f_0 = \left(1 + \frac{\pi f_1 (1 + Q_{ex} / Q_0) \Delta t}{Q_0} \right) \cdot \Delta f = F \Delta f , \quad (2.9)$$

де Δf - зміна частоти автоколивань рефрактометра внаслідок заповнення об'єму газовим середовищем, а F - так званий, коефіцієнт приведення зсуву частоти генерації до зсуву власної частоти резонатора.

Дані, що представлені на рис. 2.25, були розраховані відповідно до формул (2.8) і (2.9), при цьому вважалося, що f_0 - середня частота автоколивань за час проведення експерименту.

Порівнюючи результати вимірювань показника заломлення опосередкованим методом (за даними термо-гігрометра) і за допомогою рефрактометра (рис. 2.25) можна зробити висновок, що різниця в результатах не перевищує ± 1 N-од., За умови, що початкові показання приладів зведені до однакових показань (прокалібровані в однакових умовах). Такі показники не можуть бути використані для визначення абсолютної похибки вимірювань за допомогою рефрактометра, оскільки паспортизована похибка абсолютних вимірювань температури і вологості термо-гігрометром ТГА призводить до такої абсолютної похибки розрахунку індексу заломлення, яка перевищує згадану величину ± 1 N-од майже в два рази. У той же час, орієнтуючись на роздільну здатність термо-гігрометра ТГА, можна констатувати явну кореляційну залежність показань обох методів.

Маючи на увазі, що в термокомпенсованому резонаторі Фабрі-Перо зміна частоти автоколивань з причин зміни довжини резонатора не перевищувала $\pm \Delta f / f_0 = \mp \Delta L / L \approx \mp 3 \cdot 10^{-7} [1/^\circ C]$, допустимо зробити висновок, що абсолютна похибка вимірювань становить величину меншу, ніж ± 1 N-од. При проведенні вимірювань в широкому діапазоні змін температури в тропосфері потрібно робити поправку на температурний коефіцієнт частоти резонатора або

проводити вимірювання із застосуванням опорного резонатора з вакуумованим об'ємом, ідентичного вимірювальному.

Додатковою інформацією, яка може використовуватися для зменшення похибки вимірювань, є можливість радіорефрактометра контролювати вологість повітря. Хороша кореляційний залежність змін коефіцієнта підсилення і вологості повітря простежується на даних вимірів, представлених на рис. 2.24.

Флуктуації показника заломлення повітря в об'ємі резонатора Фабрі-Перо випадковим чином змінюють власну частоту резонатора і, тому, викликають випадкову частотну модуляцію сигналу автогенератора. Таким чином, за вимірними характеристиками частотного шуму автоколиваний можна зробити висновок про характеристики флуктуацій показника заломлення повітря. Гранична чутливість такого виміру обмежена частотним шумом автоколиваний рефрактометра, яка, в свою чергу, визначається коефіцієнтом шуму підсилювача і добротністю резонатора, що знаходиться в колі зворотного зв'язку.

Флуктуаційну чутливість, так само як і флуктуації показника заломлення тропосфери, можна охарактеризувати вибіркової дисперсією по ансамблю з K вибірок \bar{y}_k , причому $k=2,3, \dots, K$, а $t_{k+1}=t_k+T$. Цикл вимірювань K частоти складається з безпосередньо вимірювання тривалістю τ плюс проміжок часу між закінченням попереднього виміру і початком наступного, при цьому момент часу t_k вибирається довільно. Згідно з визначенням вибіркової дисперсії:

$$\langle \sigma_y^2(K, T, \tau) \rangle = \left\langle \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K \left(\bar{y}_i - \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \bar{y}_j \right)^2 \right\rangle, \quad (2.10)$$

де $\bar{y}_k = \left(\langle f(t) \rangle_{t_k, \tau} - f_0 \right) / f_0$ - вибірка середньої відносної частоти генерації \bar{y}_k за час усереднення τ .

Це визначення в окремому випадку $K=2$ і $T=\tau$ збігається з широко відомою дисперсією Алана: $\sigma_y^2(\tau) \equiv \sigma_y^2(2, \tau, \tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_2 - \bar{y}_1)^2 \rangle$. За кінцевим числом вибірок \bar{y}_k можна отримати лише оцінку вибіркової дисперсії (2.10):

$$\langle \sigma_y^2(K, T, \tau) \rangle_m = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left[\frac{1}{K-1} \sum_{i=1+(k-1)K}^{kK} \left(\bar{y}_i - \frac{1}{K} \sum_{j=1+(k-1)K}^{kK} \bar{y}_j \right)^2 \right]. \quad (2.11)$$

Величина (2.11) сама є випадковою і її дисперсією (тобто дисперсією дисперсії) можна скористатися для обчислення меж помилок на графіках залежностей $\sigma_y^2(K, T, \tau)$ від параметрів вимірювань τ , або K .

За допомогою апаратно-вимірювального комплексу на основі електронно-лічильного частотоміра ЧЗ-66 були виконані вимірювання вибіркової дисперсії (2.11) для трьох умов проведення експериментів: (1) - резонатор Фабрі-Перо ізольований від конвекційних потоків повітря в приміщенні за допомогою картонного боксу; (2) - резонатор Фабрі-Перо встановлений за вікном лабораторії (рис. 2.22) (в цьому випадку оброблявся масив даних, представлений на рис. 2.23); (3) - крізь резонатор Фабрі-Перо продувався стаціонарний потік теплого (+30° С) повітря, як показано на рис. 2.26.

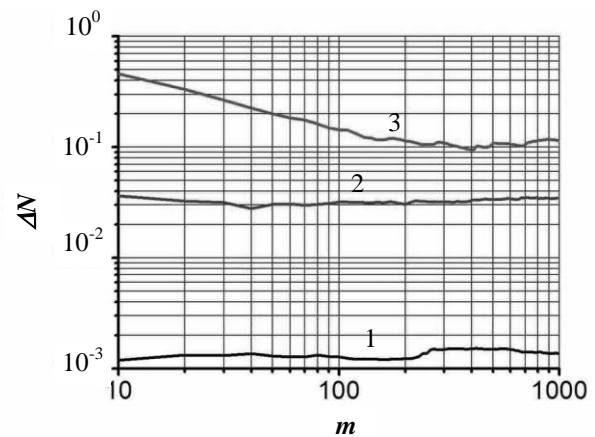
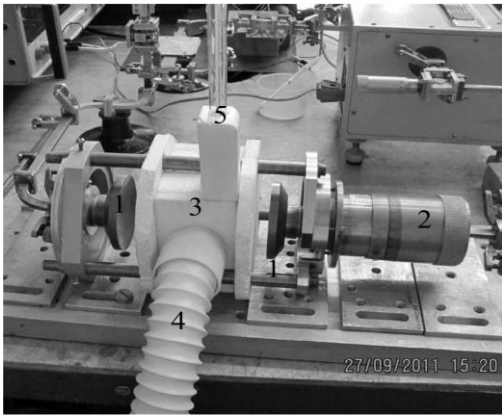


Рис. 2.26. – Сценарій експерименту по вимірюванню флуктуацій в потоці повітря, що продувається крізь об'єм резонатора Фабрі-Перо (відповідає кривій 3 на рис. 2.27)

Рис. 2.27. – Середньоквадратичне відхилення показника заломлення (дисперсія Алена) від числа вибірок. Номери кривих відповідають умовам вимірювань, описаним в тексті

Було розраховано середньоквадратичне відхилення показника заломлення $\Delta N = 10^6 \cdot \sqrt{\langle \sigma_y^2(2, T = 1.87s, \tau = 1s) \rangle_m}$ як функція числа m вибірок, коли вибіркова дисперсія $\langle \sigma_y^2(2, T = 1.87s, \tau = 1s) \rangle_m$ обчислювалася за формулою (2.11). Результати представлені на рис. 2.27. Номери кривих відповідають умовам проведення експерименту, що наведені вище. Видно, що у всіх випадках вибіркова дисперсія швидко сходиться до стаціонарного значення, так, що можна обмежити кількість членів усереднення сотнею.

Безумовно, поріг флуктуаційної чутливості рефрактометра не вище, ніж 10^{-3} . Для більш точного визначення порогу чутливості необхідно виміряти флуктуації частоти автоколивань рефрактометра з вакуумованим резонатором Фабрі-Перо.

Найбільші флуктуації спостерігаються в примусовому потоці повітря крізь вимірювальний резонатор ($\Delta N \approx 1 \cdot 10^{-1}$). Флуктуації показника заломлення тропосфери в умовах проведення натурального експерименту склали $\Delta N \approx 3 \cdot 10^{-2}$, що більш, ніж на порядок перевищує середньоквадратичне відхилення показника заломлення повітря в ізолюваному резонаторі Фабрі-Перо. Таким

чином, природні флуктуації показника заломлення тропосфери впевнено реєструються лабораторним прототипом рефрактометра і складають кілька сотих N одиниць.

2.5. Диференційний радіорефрактометр

Структурна схема прототипу диференційного радіорефрактометра представлена на рис. 2.28. В основу абсолютних вимірювань індексу заломлення тропосфери покладено диференційний принцип вимірювань щодо індексу заломлення вакууму. Вимірюваною величиною є різниця частот автоколивань, що збуджуються в двох конструктивно аналогічних каналах радіорефрактометра.

Різниця частот пропорційна індексу заломлення повітря. Дійсно, в опорному каналі автоколювання контролюються еталонним резонатором Фабрі-Перо в колі зворотного зв'язку твердотілого підсилювача опорного каналу. Об'єм еталонного резонатора Фабрі-Перо відділений від атмосфери захисним вакуумованим корпусом. Об'єм же вимірювального резонатора Фабрі-Перо знаходиться в атмосфері. Тому, частота автоколивань в вимірювальному каналі, контрольована цим резонатором, змінюється пропорційно зміні індексу заломлення повітря. Відповідно, різниця частот автоколивань також пропорційна індексу заломлення повітря.

Спочатку резонансні частоти опорного і вимірювального резонаторів Фабрі-Перо відрізняються на величину порядку 10 МГц, з тим, щоб забезпечити вимірювання різниці частот у всьому діапазоні зміни індексу заломлення. Відомо, що діапазон зміни індексу заломлення становить сотні N одиниць. Зміна частоти резонатора на 10 МГц відбувається за рахунок тільки незначної зміни довжини резонатора (на величину порядку десятих часток міліметра, якщо відстань між дзеркалами близько 100 мм).

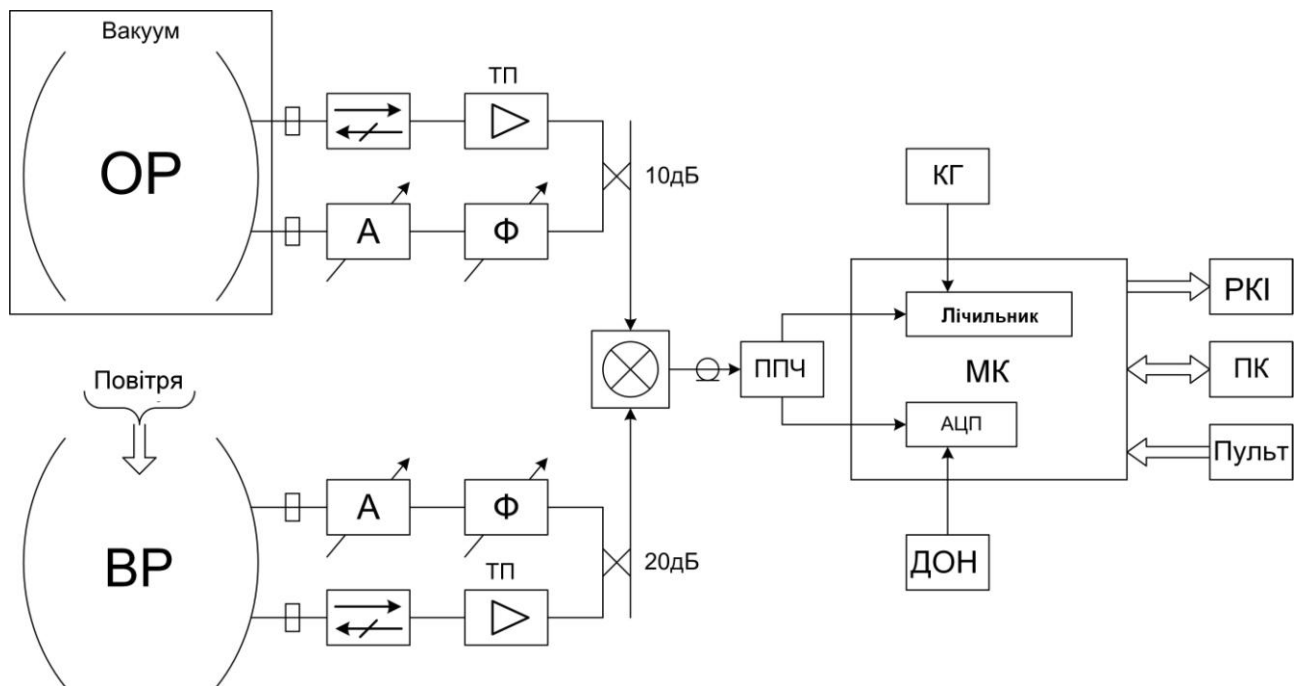


Рис. 2.28. — Структурна схема диференційного радіорефрактометра автоколивального типу: ОР- опорний резонатор, ВР- вимірювальний резонатор, ТП - твердотільний підсилювач, А - атенуатор, Ф - фазообертач, ППЧ - тракт підсилювача проміжної частоти, КГ - кварцовий генератор, ДОН - джерело опорної напруги , АЦП - аналого-цифровий перетворювач. РКІ - рідкокристалічний індикатор, ПК - персональний комп'ютер

Проміжна частота вихідного сигналу балансного змішувача дорівнює різниці частот автоколивань в опорному і вимірювальному каналах. В якості гетеродина доцільно вибрати автогенератор опорного каналу. В цьому випадку амплітуда сигналу проміжної частоти буде пропорційна амплітуді автоколивань в вимірювальному каналі, яка, в свою чергу, пропорційна втратам в колі зворотного зв'язку підсилювача вимірювального каналу. Отже, зміна втрат в вимірювальному резонаторі Фабрі-Перо, наприклад, внаслідок зміни парціального тиску водяної пари, буде викликати зміну амплітуди сигналу проміжної частоти. Таким чином, крім вимірювання індексу заломлення, радіорефрактометр може бути відкалібрований для вимірювання абсолютної вологості повітря.

Вимірювання частоти і амплітуди сигналу проміжної частоти здійснюється в приймачу радіорефрактометра. Такий приймач доцільно побудувати на основі мікроконтролера з вбудованим багаторозрядним АЦП і багаторозрядним таймером-лічильником. У такій схемі абсолютна похибка вимірювання частоти буде визначатися характеристиками тактового генератора мікроконтролера, а абсолютна похибка вимірювання амплітуди - нестабільністю напруги джерела живлення мікроконтролера. Застосувавши високоякісний кварцовий генератор і еталонну мікросхему стабілізатора напруги, можна забезпечити досить хороші характеристики приймача радіорефрактометра.

На рис. 2.29 схематично показаний еталонний резонатор опорного каналу. На рис. 2.30 показаний виготовлений макет резонатора. Конструкція резонатора Фабрі-Перо, використовуваного в лабораторному макеті диференційного радіорефрактометра, має деякі особливості, а саме:

1. Введення і виведення енергії в резонатор організовано через загальне дзеркало 1, яке встановлено на нерухомому фланці 2. Це дозволяє здійснити більш зручну компоновку хвилеводних вузлів рефрактометра і зменшити час затримки в колі зворотного зв'язку. Крім того, спрощується техніка настройки резонатора на задану частоту, оскільки рухомим є дзеркало 3 без елемента зв'язку, що встановлене у фланці 4 підстроювання резонатора. Переміщення дзеркала 3 здійснюється за допомогою гвинтового пристрою через порожнистий хвостовик дзеркала. Після настройки резонатора на задану частоту положення дзеркала 3 фіксується гайкою 5 цангового вузла фланця 4.

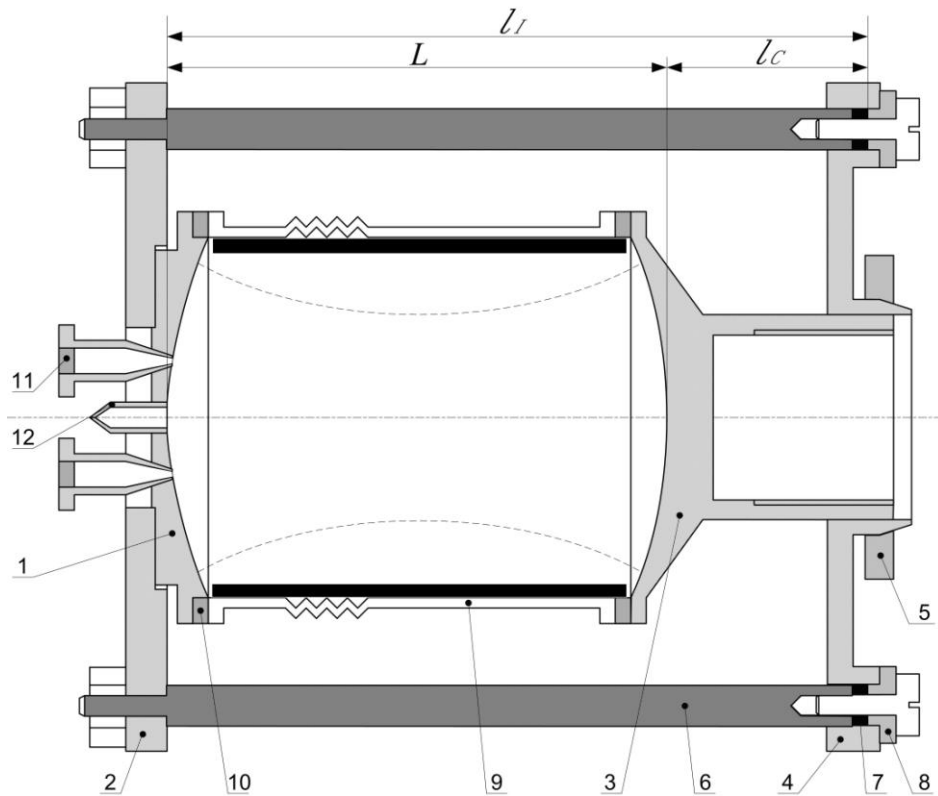


Рис. 2.29. – Схематичне зображення резонатора Фабрі-Перо опорного каналу



Рис. 2.30. – Макет еталонного резонатора Фабрі-Перо опорного каналу

2. Удосконалено елементи системи термокомпенсації довжини резонатора $L = l_1 - l_c$, де l_1 - сума довжин інварових стрижнів 6 і інварових шайб 7, а l_c - сумарна протяжність латунних деталей конструкції вздовж осі резонатора від

центру сферичної поверхні дзеркала 3 до початку латунних втулок 8, що фіксують положення інварових шайб 7 в отворах фланця 4. В результаті виявляється можливим налаштувати систему термокомпенсації, не виймаючи дзеркало 3 з фланця 4. Налаштування здійснюється підбором інварових шайб 7 потрібної товщини.

3. Сконструйована система вакуумування об'єму резонатора Фабрі-Перо. Циліндричний корпус 9 з елементами гофри (сельсин) за допомогою фланцевих з'єднань через кільця ущільнювачів 10 приєднаний безпосередньо до дзеркал 1 і 3 резонатора. Вакуумне ущільнення в елементах з'єднання здійснено за допомогою радіопрозорих вікон 11 в приєднувальних фланцях елементів зв'язку. Відкачування повітря з об'єму резонатора здійснюється через штуцер 12 в дзеркалі 1.

4. Пропоноване вакуумування об'єму резонатора буде також використовуватися в вимірювальному резонаторі Фабрі-Перо на етапі налаштування системи термокомпенсації довжини резонатора. Після налаштування корпус 9 видаляється, шляхом роз'єднання фланцевих з'єднань корпусу 9 з дзеркалами 1 і 3. Таке виявляється можливим, оскільки корпус 9 не впливає на позиціонування дзеркал відносно одне одного, а бічна поверхня корпусу, перебуваючи за межами каустики резонансного поля, не впливає на резонансну частоту.

5. Альтернативним рішенням вакуумування об'єму резонатора Фабрі-Перо є створення надлишкового тиску в резонаторі сухим еталонним газом відомого складу. Тоді, при вимірі індексу рефракції необхідно буде вводити температурну поправку на зміну індексу показника заломлення еталонного газу в об'ємі резонатора опорного каналу.

2.6. Висновки до розділу 2

Розроблено прототип автогенераторної вимірювальної системи на основі відкритого резонатора Фабрі-Перо, поєднаного з кюветою для прокачування повітря через резонатор, який застосований для вимірювання динаміки нестационарних змін індексу заломлення повітря. Показано, що температурний коефіцієнт частоти термокомпенсованого резонатора Фабрі-Перо становить не більше декількох одиниць $10^{-7} 1/^\circ\text{C}$. Температурний коефіцієнт частоти АВС має величину того ж порядку і може бути ще зменшений, якщо використовувати диференційний принцип побудови схеми АВС. Досягнута в експерименті флуктуаційна чутливість радіорефрактометрів автоколивального типу (здатність реєструвати малі зміни показника заломлення повітря) не гірше 10^{-7} при використанні в якості реєструючого приладу стандартного частотоміра.

Проведення вимірювань за допомогою радіорефрактометрів автоколивального типу передбачає більш складну процедуру калібрування в порівнянні з «пасивними» радіорефрактометрами. У той же час, є ряд загальних міркувань на користь АВС, обумовлених принципами побудови цих систем.

Запропонований диференційний принцип побудови радіорефрактометра автоколивального типу, в опорному каналі якого використовується вакуумований резонатор Фабрі-Перо, а в вимірювальному каналі - ідентичний за конструкцією, але заповнений атмосферним повітрям резонатор Фабрі-Перо, може задовольнити вимогу по величині абсолютної похибки вимірювань, якщо використовувати термокомпенсацію довжин обох резонаторів і термостатувати вузол твердотільних НВЧ підсилювачів.

Впевнено реєструється дисперсія флуктуацій індексу показника заломлення в стаціонарному потоці атмосферного повітря, що продувається через об'єм резонатора. Величина середньоквадратичного відхилення індексу показника заломлення за часи усереднення від однієї до ста секунд лежить в межах $(0,7-1,2) \cdot 10^{-3} N$ одиниць, причому тип спектру флуктуацій показника заломлення в потоці повітря близький до флікерного типу.

РОЗДІЛ 3

АВТОГЕНЕРАТОРНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ РЕЗОНАТОРІВ ТА ТВЕРДОТІЛЬНИХ АКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Активна вимірювальна система – це система, в якій кювета, що містить досліджувану речовину, об'єднана з генератором таким чином, що частота і рівень вихідного сигналу дозволяють отримати інформацію про електричні або магнітні властивості речовини. Зсув резонансної частоти кювети, обумовлений дійсною частиною діелектричної або магнітної проникності зразка, викликає зсув частоти генерації. Рівень вихідної потужності генератора залежить від внесених втрат, обумовлених уявною частиною діелектричної або магнітної проникності зразка. Отже, вимірюючи частоту і потужність генерації можна судити про діелектричні або магнітні властивості досліджуваного зразка.

Для розрахунку зв'язку між показником заломлення речовини і частотою генерації необхідно вирішити два завдання. По-перше, слід встановити залежність власної частоти резонатора від показника заломлення зразка, поміщеного в резонатор. Ця проблема не відрізняється від випадку пасивних вимірювальних систем. По-друге, слід знати залежність частоти генератора від частоти резонатора. Це завдання розглядається в теорії автогенераторів і для її вирішення в загальному випадку потрібен нелінійний аналіз. Однак, при малих збуреннях і високій добротності резонатора зсув частоти генератора практично дорівнює зсуву власної частоти резонатора.

Ідея використовувати напівпровідникові квазіоптичні генератори (КОГ) для вимірювання флуктуацій діелектричної проникності середовища заповнення резонаторів Фабрі-Перо була висловлена в [29]. Суть ідеї полягає в тому, що флуктуації діелектричної проникності викликають флуктуації резонансної частоти стабілізуючого резонатора, які переносяться на флуктуації

частоти КОГ. Вимірюючи частотний шум генератора, ми, тим самим, отримаємо інформацію про флуктуації діелектричної проникності.

Результати досліджень, відображених у розділі 3, доповідалися на конференціях [22, 27 – 30], опубліковані в статтях [16, 18 – 21, 24 – 26, 33].

3.1. Розробка високостабільного квазіоптичного генератора

Очевидно, що частотний шум АВС визначає граничну чутливість вимірювань флуктуації діелектричної проникності. Оскільки, як відомо, частотні шуми КОГ досить малі, то можна виміряти досить малі флуктуації в середовищі, що заповнює резонатор Фабрі-Перо. Оцінимо чутливість таких вимірювань.

Потужність частотного шуму КОГ в смузі частот B дорівнює $N = [(\delta f_{rms})^2 B]$, де δf_{rms} - середньоквадратична шумова девіація частоти в смузі 1 Гц. Корисний сигнал (потужність флуктуацій частоти КОГ, викликаних флуктуаціями діелектричної проникності) дорівнює:

$$S = (K_\epsilon \Delta \epsilon)^2, \quad (3.1)$$

де K_ϵ - коефіцієнт перетворення вимірювального резонатора.

Для резонатора повністю заповненого досліджуванним середовищем $K_\epsilon = \Delta f / \Delta \epsilon = -f_r / 2\epsilon$. Тому співвідношення сигнал / шум АВС дорівнюватиме:

$$\frac{S}{N} = \frac{(f_r \Delta \epsilon / 2\epsilon)^2}{(\delta f_{rms})^2 B}. \quad (3.2)$$

Знаючи співвідношення (S/N) для відомих величин частотних шумів δf_{rms} можна оцінити граничні значення варіацій діелектричної проникності, які доступні для виміру.

В експериментальних дослідженнях динаміки зміни діелектричної проникності повітря використовувалася АВС, що представляє собою КОГ на діоді Ганна, в резонатор якого була введена кювета для прокачування повітря (рис. 3.1). Як і для всіх різновидів коливальних систем, частота і потужність квазіоптичного генератора визначається з умови балансу амплітуд і фаз. Для діодів з негативним опором це означає рівність негативного опору діода Ганна і опору навантаження [101]. Оптимально узгодити низький негативний опір діода і високий активний опір навантаженого резонатора можна тільки за допомогою трансформуючих кіл. Завдання створення напівпровідникових генераторів міліметрового діапазону вирішувалося, свого часу, в ІРЕ НАН України [16, 19, 102]. Використовуваний в цій роботі генератор має прототип, названий свого часу: «квазіоптичний напівпровідниковий генератор з радіально-хвильовим збудженням» [18]. У назві підкреслено тип узгоджувального кола – чвертьхвильова радіальна лінія в пучності електричного поля прямокутного отвору ($H = n\lambda_g / 2$ і $h \cong \lambda_g / 4$). На відміну від [18] в досліджуваній конструкції генератора узгодження здійснюється «товстим» штирем 3 (діаметр близько $0,2\lambda_g$). При цьому виявилось, що глибина отвору і місце розташування узгоджувального кола повинні задовольняти умовам $H \cong 3\lambda_g / 4$ і $h \cong \lambda_g / 2$. Саме спосіб узгодження діода є принциповою відмінністю цього рішення від прототипу [18]. В кінцевому підсумку це зумовило істотно нижчий рівень фазових шумів генератора і високий к.к.д. коливальної системи в порівнянні з [18].

Суть справи полягає в тому, що, виконуючи корисну функцію узгодження імпедансів, трансформуюче коло для поля відкритого резонатора (ВР) являє собою сильно розсіюючу неоднорідність. Формалізоване дослідження розсіювання поля колом узгодження зручно проводити, розглядаючи трансформацію коефіцієнтів відбиття сукупності конструктивних елементів отвору в площину апертури зв'язку отвору на дзеркалі резонатора, оскільки розсіювання поля ВР на апертурі легко вивчити як функцію амплітуди і фази коефіцієнта відбиття Γ хвилі в отворі.

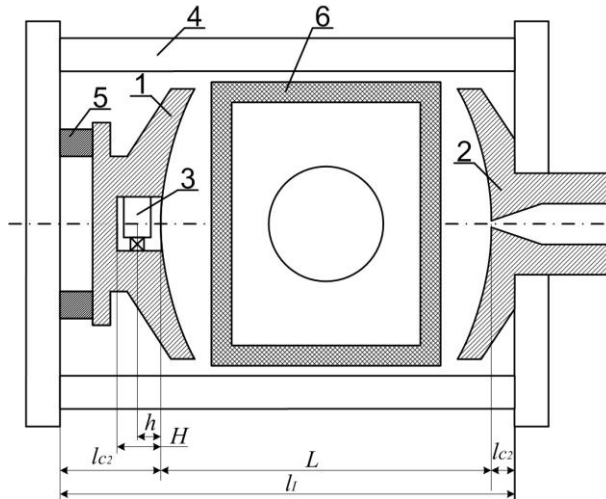


Рис. 3.1. – Схема побудови АВС: 1- дзеркало з діодом Ганна; 2-дзеркало з виводом енергії; 3 коло узгодження імпедансів; 4 інварові стрижні; 5- латунні вставки; 6 кювета для прокачування повітря через резонатор

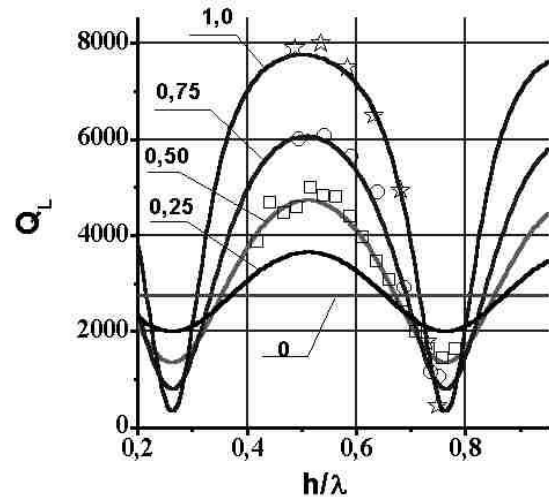


Рис. 3.2. – Розрахунок і прями вимірювання добротності резонатора від параметра h/λ для ряду втрат у вузлі узгодження діода Ганна, що задані модулем коефіцієнта відбиття

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 (рис. 3.2). Внесені в резонатор втрати будуть нехтовно малі тільки в одному випадку, а саме, якщо комплексний коефіцієнт відбиття $\Gamma \rightarrow \exp(j\pi n)$ [24]. Прямі вимірювання повністю підтвердили цей висновок (рис. 3.2). Розглянутий спосіб узгодження «товстим» штирем виявився близьким до цього критерію.

В результаті, внесений рівень втрат за подвійний прохід виявився $\delta_s \sim 0,1\%$, тоді як для технічного рішення [18] - $\delta_s \sim 1\%$. Таким чином, вдалося реалізувати потенційні можливості високодобротних резонаторів Фабрі-Перо щодо зниження частотних шумів КОГ. Вимірний рівень частотних шумів

використовуваного КОГ представлений в таблиці 3.1 як функція частоти відстройки від несучої. Вимірювання були проведені за допомогою вимірювача флуктуацій «ИФ-1002 СА» виробництва мінського НДПІ на частоті ~ 30 ГГц з діодом Ганна типу 3А728 при добротності резонатора понад 10^4 .

Таблиця 3.1

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
$(P_N/P_C)_{SSB}, \text{дБ/Гц}$	-87	-107	-114	-133	-140

Аналіз даних свідчить про наявність флікерної складової шуму. Починаючи з частоти $F \sim 500$ кГц, спектральна щільність потужності частотного шуму стає рівномірною. По-суті, виміряні значення δf_{rms} є шумовим порогом вимірювань варіацій частоти.

Не важко оцінити, що для того, щоб проводити абсолютні вимірювання варіацій показника заломлення газів в діапазоні температур, температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ) КОГ повинен бути порядку $10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ і краще. Дійсно, оскільки відносна зміна частоти КОГ дорівнює $(\Delta f/f) = -(\Delta \varepsilon/2\varepsilon)$ то з відомого емпіричного рівняння [103]: $\varepsilon = 1 + 1,57 \cdot 10^{-6} P_a/T + 1,35 \cdot 10^{-6} (1 + 5580/T) P_w/T$, де P_a і P_w - парціальний тиск сухого повітря і водяної пари, виміряний в Па, а T - абсолютна температура, неважко отримати, що в нормальних умовах і 60% вологості $(\Delta f/f)/\Delta T = -3,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$, при цьому внесок сухого повітря в відносну зміну частоти складе $+1,2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Такі ж величини ТКЧ ($\sim 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$) потрібні для роботи на устаткуванні для вимірів частотних флуктуацій.

Якщо одночасно з вимірюваннями варіацій діелектричної проникності середовища потрібно точно вимірювати її абсолютні значення, то слід використовувати температурну компенсацію частоти АВС. Принцип термокомпенсації зрозумілий з рис. 3.1 і частково його вже було розглянуто в

попередньому розділі. Довжина L резонатора дорівнює різниці довжини l_1 інварових стрижнів 4 і довжини латунної частини конструкції $l_c = (l_{c1} + l_{c2})$. Систему термокомпенсації зручно налаштовувати, підбираючи довжини латунних вставок 5. Температурний коефіцієнт частоти АВС буде дорівнює нулю, якщо виконана умова $l_1 = (L - TKF_{GD} / \sigma_1) / (\sigma_c / \sigma_1 - 1)$, де TKF_{GD} - температурний коефіцієнт частоти діода Ганна, σ_1 і σ_c - температурні коефіцієнти лінійного розширення інвару і латуні, відповідно.

Практично, незмінність власної частоти АВС на основі КОГ реалізувати не просто, оскільки діод Ганна розсіює близько 5 Вт потужності постійного струму, повільно прогриваючи корпус генератора. Це призводить до малого повільного дрейфу частоти [22]. Використовувати термостабілізацію конструкції неприпустимо, якщо потрібно проводити температурні вимірювання варіацій діелектричної проникності. Все це є одним з недоліків розглянутої АВС.

В основу даного способу вимірювання закладено зв'язок між частотою сигналу квазіоптичного генератора (КОГ) і показником заломлення речовини $n = \sqrt{\epsilon\mu}$, що знаходиться в об'ємі резонатора КОГ. При дослідженні газів резонатор можна заповнити повністю, а при вивченні порошкоподібних речовин краще частково заповнити об'єм резонатору зразком в спеціальній кюветі. Якщо змінюється показник заломлення середовища заповнення внаслідок варіації фізико-хімічних характеристик речовини або внаслідок умисного впливу на зразок зовнішніми фізичними факторами, то змінюється частота генерації. У цьому сенсі КОГ з речовиною є перетворювачем показника заломлення в частоту. Крім перетворювача до складу рефрактометра зобов'язана входити стандартна або спеціально розроблена апаратура для реєстрації змін спектра КОГ (в найпростішому випадку це частотомір, як вимірювач середньої частоти генерації). Очевидно, що метрологічні характеристики рефрактометра будуть визначатися як крутизною перетворення

і власними флуктуаціями частоти перетворювача, так і можливостями аналізаторів спектральних характеристик.

Розглянемо устрій запропонованого активного квазіоптичного перетворювача. Основу його конструкції становить спеціально розроблений термокомпенсований КОГ на діоді Ганна з низьким рівнем фазових шумів. Зовнішній вигляд генератора показаний на рис. 3.3. Уже в такому вигляді КОГ використовувався для реєстрації змін вологості повітря. В експериментах по дослідженню газових сумішей КОГ закривається кожухом, аналогічним представленому на фотографії, але з додатковими штуцерами для прокачування газу через об'єм ОР. Кромки кожуха вставляються з ущільненням в кільцеві проточки на фланцях. Інварові стрижні, що стягують фланці, залишаються зовні захисного кожуха.



Рис. 3.3. – Зовнішній вигляд квазіоптичного генератора зі знятим кожухом

Схематичне креслення, що пояснює устрій коливальної системи КОГ, наведено на рис. 3.4. ВР утворений двома сферичними дзеркалами 1 і 2. В центрі дзеркала 1 виконано короткозамкнений отвір прямокутного поперечного перерізу. Діод Ганна розташований в отворі і на нього подано напругу змщення с допомогою штиря 3. Вихід енергії з ВР в навантаження здійснюється через щілину в центрі дзеркала 2, що плавно переходить на хвилевід стандартного перетину. Сам по собі короткозамкнений отвір в дзеркалі є резонансною неоднорідністю що розсіює енергію і здійснює селекцію поздовжніх типів коливань по частоті [17, 104]. Якщо глибина отвору h_0 кратна половині довжини хвилі λ_g в хвилеводі ($h_0 = n\lambda_g/2, n=1,2,\dots$), то отвір практично не збурює поле в ВР і є зручною порожниною в дзеркалі для розміщення генераторного напівпровідникового діода.

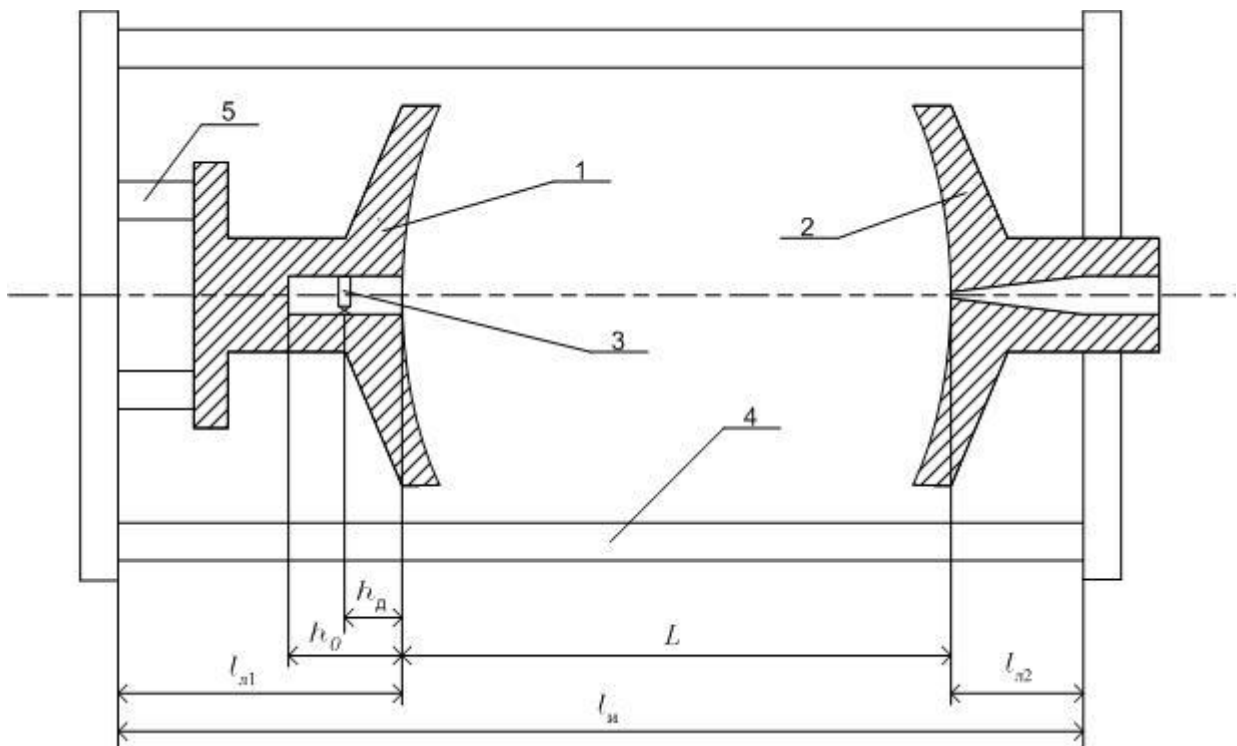


Рис. 3.4. – Устрій квазіоптичного генератора

Температурний коефіцієнт частоти КОГ ($\text{ТКЧ}_{\text{КОГ}}$) за відсутності атмосферних впливів складається з вкладу відкритого резонатора ($\text{ТКЧ}_{\text{ВР}}$), обумовленого зміною його довжини L , і з вкладу самого діода Ганна ($\text{ТКЧ}_{\text{ДГ}}$). З великою точністю $\text{ТКЧ}_{\text{ВР}} = (\Delta L/L)$. Діод Ганна при малих добротностях

резонатора дає визначальний внесок в ТКЧ генератора, що становить для хвилеводних конструкцій величину порядку $10^{-4} 1/^\circ\text{C}$, і цей внесок залежить від типу і екземпляру діода. З цих причин внесок діода Ганна в $\text{TKЧ}_{\text{КОГ}}$ визначався експериментально. Паралельно проводилися вимірювання $\text{TKЧ}_{\text{КОГ}}$ і $\text{TKЧ}_{\text{ОР}}$ по зсуву резонансної частоти при вимкненому генераторі. Оцінка величини різниці дала $\text{TKЧ}_{\text{ДГ}} \sim -2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, що перевищує $\text{TKЧ}_{\text{ОР}}$, виготовленого з інвару. Тому настройка системи термокомпенсації повинна здійснюватися безпосередньо на працюючому КОГ.

Під час налаштування системи термокомпенсації КОГ вживались заходи для радикального зниження вологості в термокамері. Для набору компенсуючих вставок 5 з різними довжинами вимірювався $\text{TKЧ}_{\text{КОГ}}$. Остаточна довжина вставок 5 вибиралася з розрахунку з урахуванням даних по TKЧ_ϵ сухого повітря. З оцінок технологічних похибок впливало, що $\text{TKЧ}_{\text{КОГ}}$ у відсутності впливу атмосфери не буде перевищувати величину порядку $10^{-7} 1/^\circ\text{C}$.

3.2. Розробка КОГ з виходом другої гармоніки

У попередньому розділі було показано, що добротність відкритого резонатора (ВР), який застосовується для створення твердотільного квазіоптичного генератора, як основи активної вимірювальної системи, є надзвичайно важливим фактором, що визначає чутливість такої АВС. Навантажена добротність ВР значною мірою знижується внаслідок використання на дзеркалах ВР елементів виведення енергії у вигляді діафрагми або щілини (рис. 3.1). Питання про вплив елементів зв'язку на добротність квазіоптичних резонаторів було свого часу досить добре вивчено [94, 105]. Відсутність елементів зв'язку, що знижують добротність резонатора, дозволяє підвищити чутливість системи, але при цьому необхідно іншим способом вирішити питання про виведення енергії з квазіоптичного генератора.

Питання це може бути вирішене шляхом використання дзеркал ВР тільки для створення коливальної системи на основній частоті генерації (ОЧГ), але не для виведення енергії, в той час як вихід енергії виконаний на одній з гармонійних частот. Можливість виділення гармонік ОЧГ діода Ганна в одному з резонансно-пролітних режимів роботи обумовлена істотною нелінійністю процесів перетворення в діодах Ганна і широко досліджувалася різними авторами.

Генератори на ДГ з виділенням гармонік ОЧГ мають слабо навантажений контур на цій частоті і вихід енергії по гармоніці, який водночас відтинає потужність основної частоти, а також елементи налаштування і узгодження на частоті гармоніки. Відомі рішення генераторів на гармоніках ДГ відрізняються, перш за все, за типом резонаторів на ОЧГ. Це можуть бути дискоштирьовий резонатор, що поміщається в хвилевід позамежного перетину [106], хвилеводні резонатори зі стрибкоподібним переходом до позамежного хвилеводу [107]. Є повідомлення щодо стабілізації частоти генерації об'ємними резонаторами, пов'язаними з ОЧГ [108]. Застосування відкритих резонаторів для стабілізації частоти замість об'ємних має підвищити коефіцієнт стабілізації внаслідок більш високих значень добротності ВР, причому ефективність використання ВР буде зростати в міру зростання робочої частоти.

Для розробки КОГ на другу гармоніку були використані наступні встановлені факти: 1) перестроювання генератора в діапазоні частот здійснюється шляхом перестроювання резонатора по ОЧГ і 2) ефективна стабілізація частоти може здійснюватися тільки по ОЧГ, оскільки на гармоніках генератор має малий зв'язок з трактом.

Для дослідження режимів роботи генератора на другу гармоніку був використаний квазіоптичний генератор (КОГ) з можливістю виходу енергії, як першої, так і другої гармонік. Устрій досліджуваного КОГ показано на рис. 3.5. На рис. 3.6 представлено як виглядає цей генератор. Основу конструкції становить генератор, розглянутий в попередньому підрозділі. Резонансним колом на ОЧГ є неоднорідний ВР, утворений сферичним дзеркалом 1, яке

забезпечено виводом енергії 2 на ОЧГ, і сферичним дзеркалом 3 з неоднорідністю типу короткозамкнений хвильоводний отвір 4 прямокутного перетину. У короткозамкненому кінці хвильоводу 4 виконаний вивід енергії 5 по 2-й гармоніці у вигляді хвильоводу стандартного перетину, поза межного для ОЧГ. Діод Ганна 6 включений між широкими стінками отвору 4 і узгоджений "товстим" штирем 7.

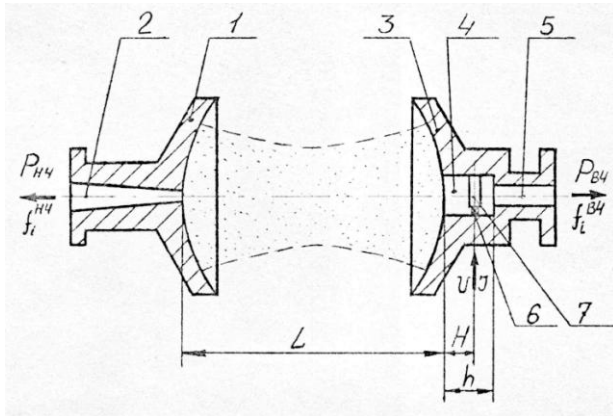


Рис. 3.5. – Устрій КОГ з виходом енергії 1-ї і 2-ї гармонік

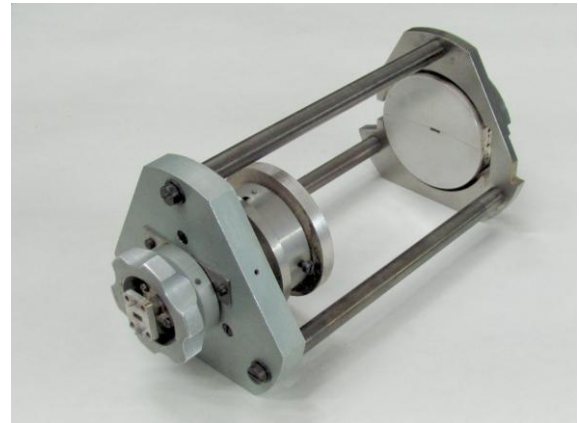


Рис. 3.6. – КОГ з виходом енергії 1-ї та 2-ї гармонік

Вимірювалася потужність генерації $P_{НЧ}$ в низькочастотній області спектра (вихід енергії 2 перетину $7,2 \times 0,4 \text{ мм}^2$ в центрі дзеркала 1) і потужність генерації $P_{ВЧ}$ в високочастотній області спектру (вихід енергії 5 перетину $3,6 \times 1,8 \text{ мм}^2$ в дзеркалі 3). Складові спектру генерації в низькочастотній області $f_i^{НЧ}$ спостерігалися на екрані спектроаналізатора, а в високочастотній області $f_i^{ВЧ}$ - на екрані гетеродинного частотомера. Частоти вимірювалися серією хвилемірів. Методом візуалізації електромагнітних полів малим пробним тілом ідентифікувалися збуджувані у ВР типи коливань. Вимірювалися також добротності ВР і вольтамперна характеристика (ВАХ) ДГ (використовувалися діоди типу 3А738) [20].

Будемо класифікувати режими роботи ДГ за характером генерації в НЧ області спектра. Оскільки основним чинником, що визначає той або інший

режим роботи діода, є напруга, що подається на діод, U , то скористаємося представленими на рис. 3.7 залежностями $I(U)$, $P_{НЧ}(U)$ і $P_{ВЧ}(U)$.

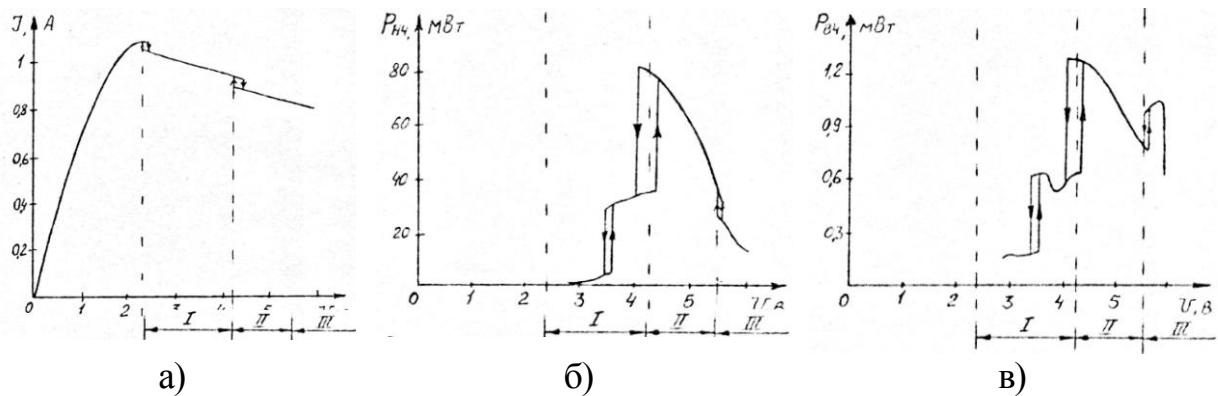


Рис. 3.7. – Режимы работы диода Ганна. а) - вольт-амперная характеристика; б) - генерация 1-ї гармоніки; в) - генерация 2-ї гармоніки

Область I - полігармонічні низьковольтні асинхронні коливання. НЧ спектр містить, як правило, більше двох гармонійних складових, частоти $f_i^{нч}$ яких знаходяться в асинхронному відношенні, причому $1 < f_i^{нч} / f_j^{нч} < 1,3$. Найчастіше область розділена на дві ділянки, що характеризуються різним набором асинхронних складових. Потужності складових одного порядку. Область II - збудження коливань з резонансно-пролітної частотою f_l , тобто основною частотою генерації (ОЧГ). Асинхронні коливання відсутні. Область III - високовольтні асинхронні коливання. До генерації на ОЧГ додається генерація на асинхронній частоті $f_{ас}$, що, як правило, перевищує f_l в 1,3 – 1,5 рази. Потужність на f_l перевищує потужність на $f_{ас}$ більш ніж на порядок.

Поряд з напругою живлення режим генерації ДГ визначається також комплексним спектром коливальної системи, тобто набором власних частот і втратами неоднорідного ОР. Це твердження відображає той експериментальний факт, що кордони областей на рис. 3.7 змінюються при зміні власних частот ВР і зміні коефіцієнта зв'язку ВР з НЧ трактом. Зокрема, можливі ситуації коли режим I плавно переходить в режим II, або коли режим III взагалі відсутній.

Вимірювання частот показало, що спектр в ВЧ області являє собою одне або декілька коливань з частотами, які є або другою гармонікою ОЧГ, або

сумарними комбінаційними складовими НЧ спектру генерації. У зв'язку з цим можна виділити два режими високочастотної генерації діода Ганна: 1) генерація другої гармоніки ОЧГ; 2) Автопідсумовування асинхронних коливань. Надалі буде досліджений лише перший режим, як такий, що представляє більший практичний інтерес.

Перший режим генерації діодом Ганна добре відомий. Новим тут є стабілізація частоти відкритим резонатором. У «чистому» вигляді перший режим ВЧ генерації спостерігається в області II, хоча він присутній і в областях I і III. На рис. 3.8 представлена одна з зон генерації в II області, що відповідає збудженню неоднорідного ВР на TEM_{006} типі коливань.

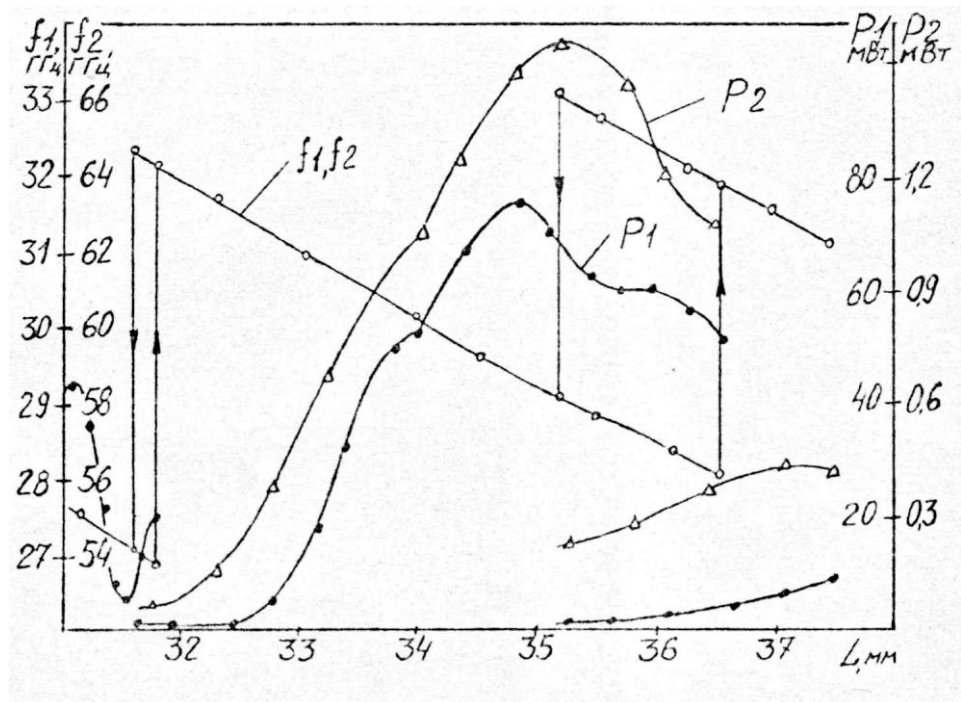


Рис. 3.8. – Зона генерації КОГ

Безперервне перестроювання частоти в зоні генерації обмежено праворуч і ліворуч перескоками до збудження ВР, відповідно, на TEM_{007} і TEM_{005} типах коливань. Відповідно до зміни ОЧГ змінюється її друга гармоніка $f_2=2f_1$. Діапазон перестроювання склав 13%. Можна відзначити одержання досить високої вихідної потужності на ОЧГ (рис. 3.8). Оптимізацією зв'язку ВР з навантаженням, а саме заміною дзеркала 1 (рис 3.5) зі щілиною зв'язку

7,2x0,4 мм², яке використовувалося в вимірах, результати яких представлені на рис. 3.7 і рис. 3.8, на таке ж дзеркало, але з щілиною зв'язку 7,2x0,15мм², можна підвищити вихідну потужність на ОЧГ до 130 мВт.

Відповідно до зростання потужності ОЧГ збільшується і потужність P_2 на другій гармоніці. Якщо в разі використання дзеркала 1 (рис 3.5) зі щілиною зв'язку 7,2x0,4 мм² потужність P_2 досягала рівня 1,5 мВт то, при використанні дзеркала 1 без елемента зв'язку, можна підвищити рівень потужності P_2 до 10 мВт. Зауважимо, однак, що досягнуте значення к.к.д. перетворення $(P_{2\max} / P_{1\max}) \cdot 100\% = 8\%$ поступається кращим результатам ($\eta \sim 25\%$), відомим з літератури [109]. Встановлено, принаймні, дві причини низьких значень к.к.д. перетворення: 1) неоптимальність узгодження з навантаженням на гармоніці ОЧГ; 2) випромінювання потужності другої гармоніки з відкритого кінця хвилеводного отвору у вільний простір. У всякому разі досягнутої потужності достатньо для роботи активної вимірювальної системи.

Теоретичне моделювання генератора показує [110], що для отримання максимальної вихідної потужності імпеданс навантаження по першій гармоніці повинен носити реактивний характер (по можливості необхідно усунути активні втрати), в той час як навантаження генератора по другій гармоніці носить екстремальний характер. Це означає, що необхідно, по-перше, мінімізувати власні втрати відкритої коливальної системи на основній частоті генерації і, по-друге, ввести регулювання імпедансу навантаження діода Ганна по другій гармоніці так, щоб не змінювалися втрати ВР на першій гармоніці.

Для реалізації цих вимог була розроблена оптимізована конструкція квазіоптичного генератора з виділенням другої гармоніки генерації, схема якої представлена на рис. 3.9. На рис. 3.10 показаний виготовлений макет такого генератора.

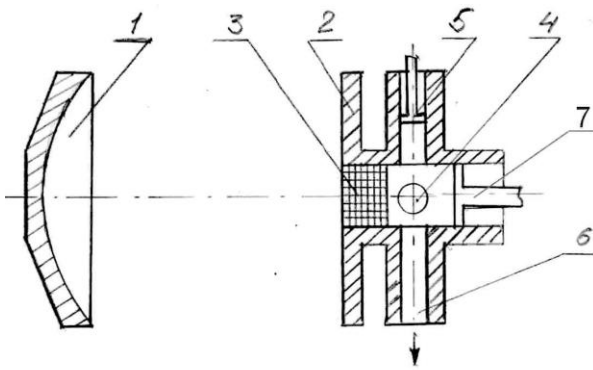


Рис. 3.9. - Устрій КОГ з виходом енергії другої гармоніки



Рис. 3.10. - КОГ з виходом енергії другої гармоніки

Діод Ганна 4 розташований одночасно в НВЧ полях першої та другої гармонік, що досягнуто включенням його в «хрестоподібний» перетин прямокутних хвилеводів на першу і другу гармоніки. При цьому вихід енергії другої гармоніки здійснюється з хвилеводу 6, а з протилежної сторони для підлаштування передбачений шлейф 5. Важливо, що втрати ВР не залежать від регулювання шлейфу 5. Мінімізація дифракційних втрат ВР на першій гармоніці здійснюється регулюванням глибини хвилеводного отвору за допомогою короткозамикаючого поршня 7.

Наявність нерезонансного випромінювання потужності другої гармоніки у вільний простір є специфічною особливістю відкритої коливальної системи. Як було зазначено вище, для підвищення к.к.д. перетворення потужності першої гармоніки в потужність другої необхідно усунути випромінювання потужності другої гармоніки з відкритого кінця хвилеводного отвору в дзеркалі 2 ВР. Це можна зробити за допомогою фільтра 3, що відбиває потужність другої гармоніки і повністю пропускає потужність першої гармоніки. Такі властивості в широкій смузі частот мають так звані «вафельні» фільтри, розрахувати які можна за методикою, викладеною в [93].

Високе значення добротності коливальної системи ($Q_0 \sim 10^4$) на ОЧГ забезпечує високу короткочасну стабільність частоти на другій гармоніці (крутизна електронної перестройки ~ 1 МГц/В). Тому, є принципова можливість створення джерел з рівнем шуму не гірше -115 дБ/Гц. Слід також

значити, що використання для вимірювання дійсної частини діелектричної проникності середовища, яке заповнює резонатор, зсуву робочої частоти такого гармонійного квазіоптичного генератора дозволяє реєструвати менші величини зсуву. Пояснюється це тим, що зміна основної частоти генерації КОГ викликає в 2 рази більшу зміну частоти другої гармоніки, яка використовується для вимірювання.

Генератор з такими характеристиками, який використовується в якості основного елемента активної вимірювальної системи, дозволяє істотно підвищити чутливість системи при вимірюванні з її допомогою комплексної діелектричної проникності речовин, які розміщені в квазіоптичному резонаторі.

3.3. Розробка радіопрозорої кювети

Для вивчення електрофізичних властивостей порошкоподібних речовин було розроблено кювету, дві радіопрозорі стінки якої є плоскопаралельні пластини з щільного пінопласту. Простір між пластинами заповнюється досліджуваним порошком. Об'єм порошку контролюється кільцями різної висоти, набори з яких встановлюються між пластинами пінопласту. Кювета зі зразком розміщується між дзеркалами ВР в області перетяжки гаусовського хвильового пучка перпендикулярно осі резонатора і повністю перекриває каустику. Обрана геометрія є, мабуть, найпростішою з можливих конфігурацій, які не викликають таких збурень поля ВР, які призводять до розсіювання енергії в навколишній простір. Інша перевага полягає в можливості провести коректний чисельний аналіз моделі кювети у ВР з умовами, що істотно спрощують розрахунки.

Кювета встановлюється на трьох несучих стрижнях конструкції з можливістю переміщення уздовж осі ВР. Фотографія такого генератора показана на рис. 3.11. Пристрій використовувався для дослідження магнітодіелектричних властивостей порошку нітриту натрію, тому кювета з речовиною розміщувалася всередині соленоїда.

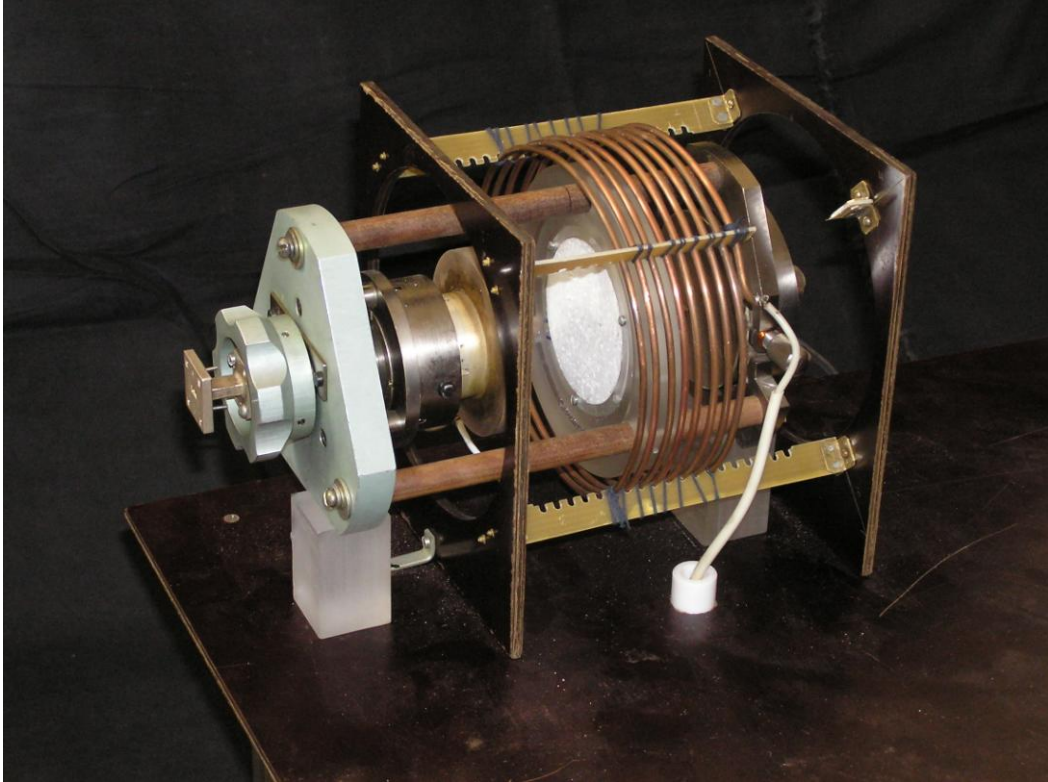


Рис. 3.11. – Активний перетворювач з кюветою всередині соленоїда

З метою аналізу кювета для дослідження порошкоподібних речовин представлена як тришарова плоскопаралельна структура. Математичне моделювання проведено з метою оптимізації параметрів ВР з кюветою за критерієм максимальної крутості перетворення показника заломлення в резонансну частоту ВР. На рис. 3.12 представлена геометрія моделі кювети у ВР, наведені позначення розмірів і параметрів і нумерація кордонів шарів і областей ВР.

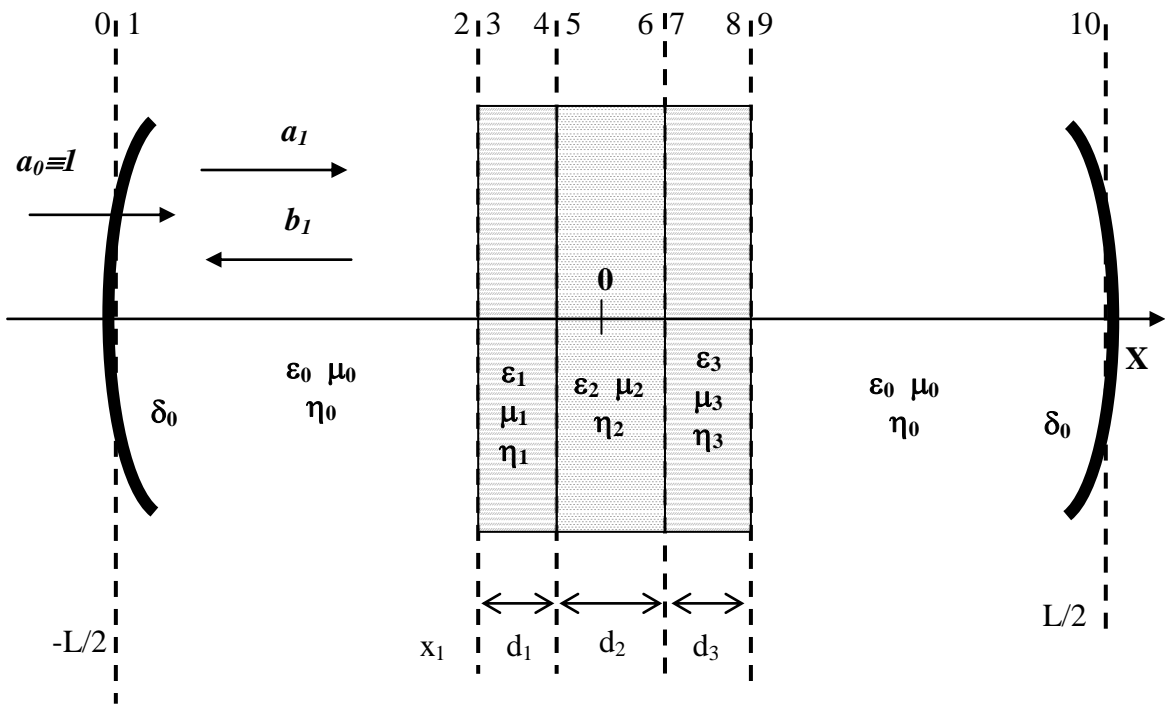


Рис. 3.12. – Геометрія моделі вимірювальної кювети у ВР

У квазіоптичному наближенні ВР можна розглядати як короткозамкнений з двох сторін променевід, в якому поширюються гаусові хвильові пучки, і застосовувати для його аналізу апарат матриць розсіювання [111]. П'ять областей (шарів), будемо описувати набором наступних операторів. Коефіцієнт передачі через шари або області ВР:

$${}^p T_{i,i\pm 1} = \exp(\eta_p |x_i - x_{i\pm 1}| + j^p \Phi_{i,i\pm 1}), \quad (3.3)$$

де $i = 1, 2, \dots, 9, 10$ - номери кордонів (портів) чотиріполюсників (див. верхній ряд чисел на рис. 3.12), $p = 0, 1, 2, 3$ - індекси, що позначають середу заповнення шарів і областей ВР, η_p - коефіцієнт загасання, а ${}^p \Phi_{i,i\pm 1}$ - набіг фази в p -му шарі (області):

$${}^p \Phi_{i,i\pm 1} = \frac{2\pi n_p}{\lambda_0} |x_i - x_{i\pm 1}| - \left| \operatorname{artg} \left(\frac{x_i}{\sqrt{\frac{L}{2} \left(r - \frac{L}{2} \right)}} \right) - \operatorname{artg} \left(\frac{x_{i\pm 1}}{\sqrt{\frac{L}{2} \left(r - \frac{L}{2} \right)}} \right) \right|, \quad (3.4)$$

де x_i и $x_{i\pm 1}$ – координати початку і кінця шару (області), відлічувані від центру резонатора (площині перетяжки хвильового пучка), L – довжина ВР, r – радіус кривизни дзеркал, $n_p = \sqrt{\varepsilon_p \mu_p}$, – коефіцієнт заломлення p -го середовища, (рис. 3.12), λ_0 – довжина хвилі у вільному просторі. Будемо вважати $n_0 = \varepsilon_0 = \mu_0 = \eta_0 = 1$. Коефіцієнт відбиття від дзеркал ВР:

$$R_{1,1} = R_{10,10} = -\sqrt{1 - \delta_0}, \quad (3.5)$$

де δ_0 – дифракційні та омичні втрати на дзеркалі.

Границя між різними n -м та m -м шарами (областями) ВР розглядається як стрибок хвильового опору і описується наступною матрицею розсіювання:

$$\frac{1}{Z_n + Z_m} \begin{bmatrix} (Z_m - Z_n) & 2\sqrt{Z_n Z_m} \\ 2\sqrt{Z_n Z_m} & (Z_n - Z_m) \end{bmatrix}, \quad n, m = 0, 1, 2, 3 \text{ и } n \neq m, \quad (3.6)$$

де $Z_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\varepsilon_n}}$ – хвильові опори заповнень шарів.

Позначимо комплексні амплітуди пучків, що поширюються в напрямку збільшення координати x через a_i де i – номер порту чотиріполюсника, а через b_i – комплексні амплітуди пучків, що поширюються в зворотному напрямку. На дзеркалі з елементом зв'язку:

$$a_1 = a_0 + R_{1,1} b_1, \quad (3.7)$$

де a_0 – амплітуда хвильового пучка, що збуджується елементом зв'язку.

Коефіцієнт відбиття в площині $2 - \Gamma_2 = b_2/a_2$ залежить від параметрів всіх шарів по праву сторону від границі і може бути виписаний в явному вигляді, використовуючи стандартну процедуру матричного аналізу. У сталому (стаціонарному) режимі амплітуда поля, що виходить від площини 1, може бути обчислена за формулою:

$$a_1 = \frac{a_0}{1 - R_{1,1}(T_{1,2})^2 \Gamma_2} . \quad (3.8)$$

Далі, знаючи a_1 , можна перерахувати комплексні амплітуди пучка в будь-яких інших площинах ВР. Залежність амплітуди пучка від довжини хвилі λ_0 поблизу резонансу являє собою резонансну криву $a(\lambda_0)$, розрахувавши яку з наведених вище формул, можна обчислити власну частоту резонатора з кюветою $f_r = c/\lambda_r$, де c – швидкість світла, а λ_r - вирішення рівняння $a(\lambda_r) = \max(a(\lambda_0))$.

Всі представлені далі залежності власної частоти ВР від параметрів кювети і речовини отримані відповідно до викладеної процедури. Модель дозволяє також обчислити добротність ВР по ширині резонансної кривої на рівні -3дБ, яка залежить як від втрат δ_0 на дзеркалі, так і від коефіцієнтів загасання в шарах η_p .

Коректність розрахунків перевірялася шляхом порівняння з результатами експерименту. Вимірювалася залежність частоти КОГ від переміщення уздовж осі ВР кювети без зразка ($\varepsilon_2=1$) і ця ж залежність для кювети з порошком ($\varepsilon_2=1,86$). Результати експерименту представлені точками на графіку рис. 3.13. У розрахунок закладена величина діелектричної сталої пінопласту $\varepsilon_1=\varepsilon_3=1,15$, яка попередньо була виміряна методом зсуву фази в хвилеводі, що повністю заповнений цим же пінопластом. Резонансна частота ВР без кювети становила 40499 МГц.

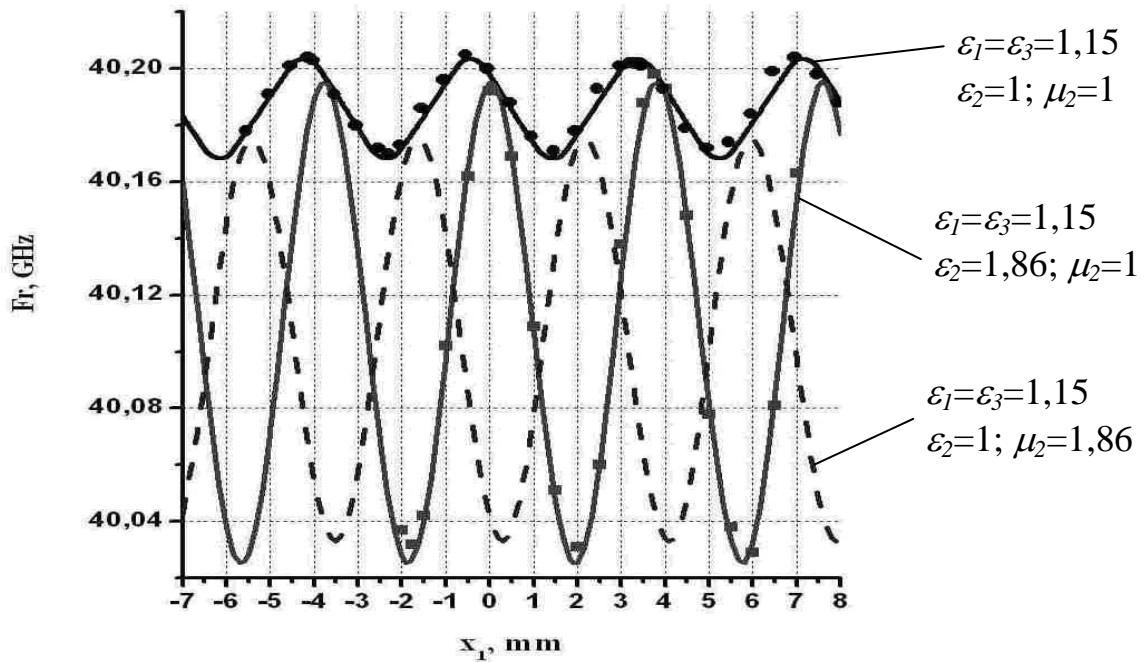


Рис. 3.13. – Зсув частоти КОГ при переміщенні кювети вздовж осі резонатора: суцільні лінії - розрахунок для порожньої кювети і кювети з речовиною з $\epsilon_2=1,86; \mu_2=1$; пунктирні лінії - розрахунок для кювети з речовиною з $\epsilon_2=1; \mu_2=1,86$; точки - експериментальні результати

Результати розрахунку і експерименту для порожньої кювети досить добре відповідають один одному з тим, щоб проводити оптимізацію геометрії та місця установки кювети. Для кращої кількісної відповідності розрахунків, зроблених в квазіоптичному наближенні, з експериментом, слід враховувати вплив плоского шару на фокусування фронту гаусовського пучка [58].

У разі заповнення кювети речовиною з невідомою діелектричною сталою, значення ϵ_2 визначалося, шляхом проведення процедури чисельної варіації параметра ϵ_2 до максимальної відповідності даним вимірів. Результати для одного із зразків наведені на рис. 3.13. На цьому ж рисунку штриховою лінією наведені результати розрахунку для випадку, якби зсув частоти був обумовлений наявністю у речовини відмінної від одиниці магнітної проникності. У цьому випадку, як і слід було очікувати, максимальне зменшення частоти спостерігається при приміщенні кювети в максимум

магнітного поля стоячої хвилі ВР. Невелике зміщення кривої щодо центру пояснюється впливом діелектричної сталої пінопластових стінок кювети.

Коефіцієнт перетворення рефрактометра, який визначається як приріст резонансної частоти Δf_r до приросту діелектричної $\Delta \epsilon$ ($K_\epsilon = \Delta f_r / \Delta \epsilon$) або магнітної $\Delta \mu$ ($K_\mu = \Delta f_r / \Delta \mu$) проникності, залежить від товщини кювети, її розташування у ВР, а також від співвідношення між величинами проникностей. Дійсно, на рис. 3.14 наведені залежності максимальної f_{max} і мінімальної f_{min} частоти ВР зі зразком, які спостерігаються при переміщенні кювети вздовж осі (рис. 3.13), або від діелектричної проникності ϵ при $\mu=1$, або від магнітної проникності μ при $\epsilon=1,5$. Коефіцієнти перетворення K_ϵ або K_μ дорівнюють тангенсам кутів нахилу відповідних кривих. Якщо зразок має тільки діелектричні властивості, то максимум K_ϵ спостерігається при розміщенні кювети в пучності електричного поля і практично не залежить від величини ϵ .

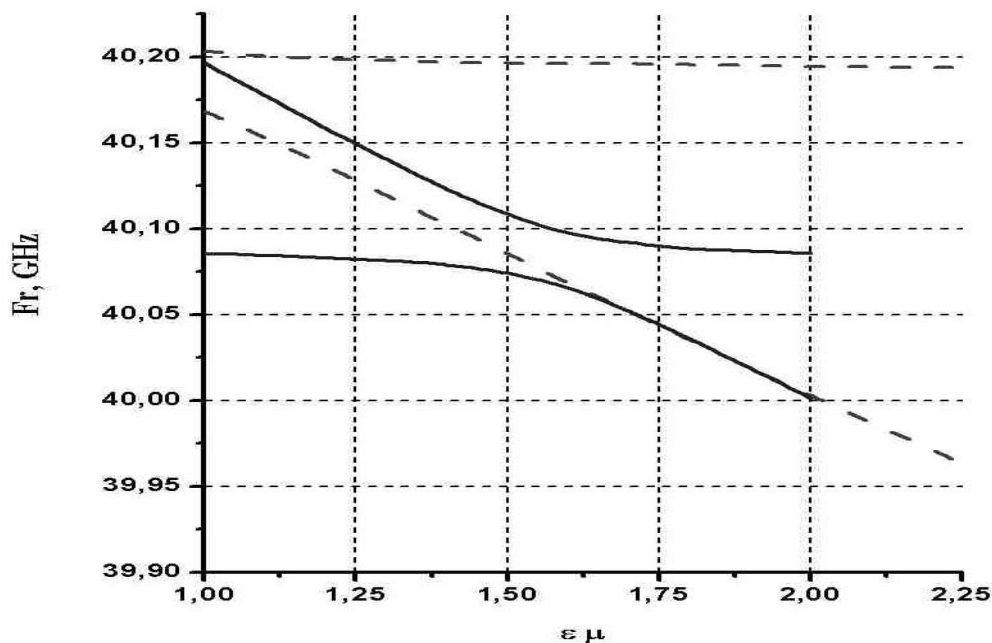


Рис. 3.14. – Діапазон зміни частоти КОГ в залежності від складу речовини: суцільні лінії – $\epsilon = 1,5$; $\mu - var$; пунктирні лінії – $\epsilon - var$; $\mu = 1$

Для магнітодіелектриків картина більш складна. Наприклад, K_μ максимальний для речовин, які мають значення μ і ϵ , що помітно відрізняються

один від одного, і мінімальний - якщо $\mu \approx \varepsilon$. Положення кювети вздовж осі резонатора при яких K_μ максимальний, також залежать, від співвідношення між величинами проникностей. Для прикладу на рис. 3.15 наведені залежності K_ε і K_μ від положення кювети для речовини з $\varepsilon=1,5$ і $\mu=1,1$. Максимуми коефіцієнтів спостерігаються в області пучностей електричного і магнітного полів, відповідно, про що можна судити, порівнюючи абсциси кривих $K_\varepsilon(x_1)$ та $K_\mu(x_1)$ з абсцисою залежності $F_r(x_1)$. Однак уже в цьому випадку (при $\mu=1,1$) положення максимумів $K_\varepsilon(x_1)$ і $K_\mu(x_1)$ зміщені щодо екстремумів $F_r(x_1)$. Таким чином, оптимальне положення кювети у ВР за критерієм максимумів коефіцієнтів перетворення залежить від співвідношення між магнітними і діелектричними характеристиками досліджуваної речовини.

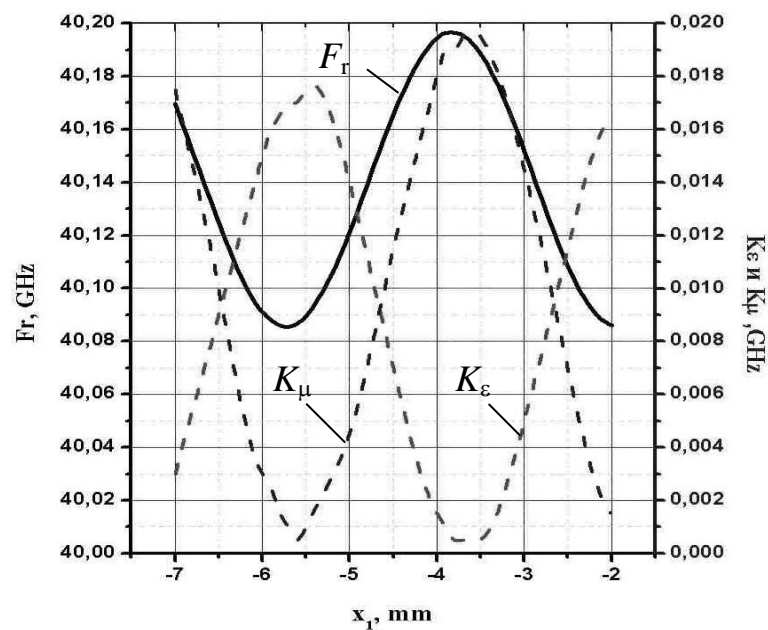


Рис. 3.15. – Залежність крутизни перетворення від положення кювети з речовиною з $\varepsilon=1,5$ і $\mu=1,1$

На рис. 3.16 представлена залежність K_ε і K_μ від товщини центрального шару кювети з тією ж речовиною ($\varepsilon=1,5$ і $\mu=1,1$). Як і слід було очікувати, зростання товщини шару досліджуваної речовини (коефіцієнта заповнення

резонатора) призводить до зростання коефіцієнтів перетворення. Однак при цьому зростають втрати резонатора через втрати в речовині і, отже, знижується добротність ВР. Це, в свою чергу, призводить до збільшення флуктуацій частоти КОГ і підвищенню шумового порогу квазіоптичного перетворювача. Тому при вимірюванні малих варіацій показників заломлення для різних речовин існують різні оптимальні розміри кювети.

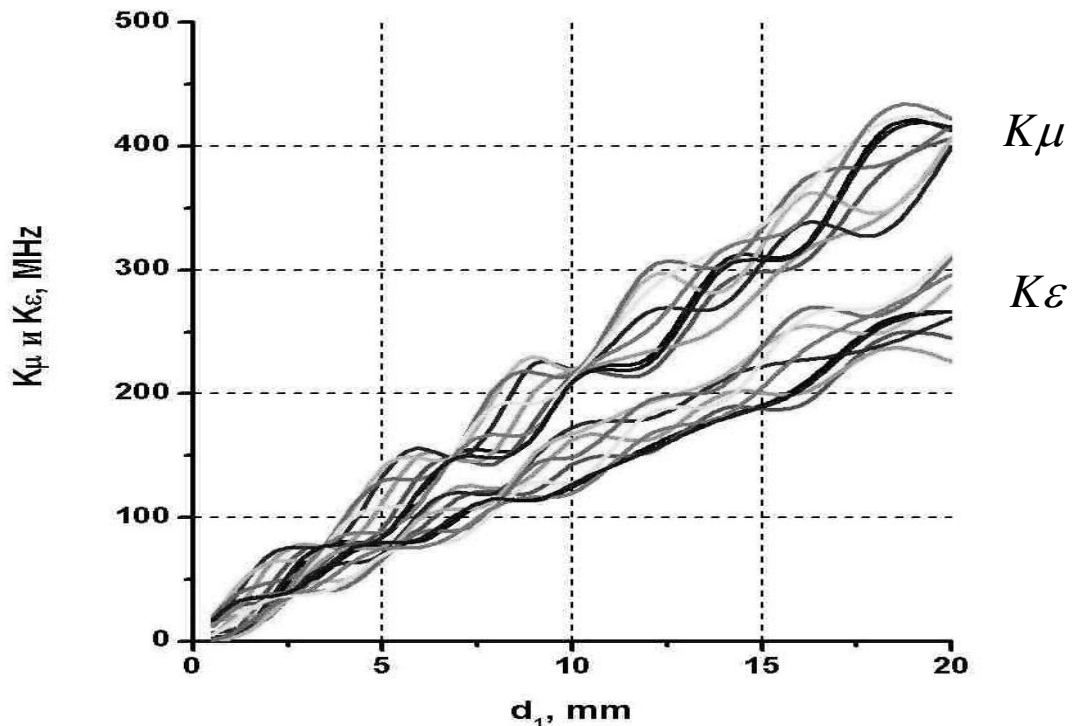


Рис. 3.16. – Залежність крутизни перетворення від кількості речовини в кюветі

Таким чином, для заданої речовини можна розрахувати оптимальні розміри кювети і її положення у ВР за критерієм максимуму коефіцієнта перетворення. Наприклад, для досліджуваної речовини ($\epsilon=1,5$ і $\mu=1,1$) виявилось, що коефіцієнт перетворення може скласти $K_{\mu} \sim 10^9$ Гц, тобто, якщо магнітна проникність зміниться на мільйонну частку, то резонансна частота ВР, а, отже, і частота генерації перетворювача, зміниться на один кілогерц.

Оцінимо чутливість запропонованого методу вимірювання, вважаючи, що використовується ідеальний аналізатор спектру, а шуми системи обумовлені

шумами активного перетворювача і дорівнюють добутку середньоквадратичної шумової девіації частоти КОГ на ширину B смуги аналізу. Тому, співвідношення сигнал/шум дорівнюватиме:

$$\frac{S}{N} = \frac{(K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_\mu \Delta\mu)^2}{(\delta f_{rms})^2 \cdot B} . \quad (3.9)$$

Взявши певне співвідношення сигнал/шум і користуючись розрахунковими значеннями коефіцієнтів перетворення K_ε, K_μ , і вимірними величинами частотних шумів δf_{rms} , можна оцінити граничні значення варіацій діелектричної та магнітної проникностей, які можна виміряти.

Нехай відношення сигнал/шум $(S/N)=10$, рівень частотних флуктуацій на частоті 10 кГц $\delta f_{rms}=0,028 \text{ Гц}/\sqrt{\text{Гц}}$, і смуга аналізу $B=100$ Гц. Розглянемо чутливість до зміни діелектричної сталої газу, що повністю заповнює ВР на частоті 30 ГГц. Коефіцієнт перетворення зміни діелектричної сталої газу, в зміну резонансної частоти ВР буде дорівнювати:

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta f}{\Delta\varepsilon} = \frac{-f_r}{2\varepsilon} = -1,5 \cdot 10^{10} \text{ Гц} . \quad (3.10)$$

Таким чином, маючи на увазі (3.2). отримаємо оцінку:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\delta f_{rms} \sqrt{B} \sqrt{S/N}}{K_\varepsilon} = \frac{0,028 \cdot 10 \cdot \sqrt{10}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 6 \cdot 10^{-11} . \quad (3.11)$$

У наведеній оцінці неявно мається на увазі що діелектричні втрати малі настільки, що можна не враховувати зниження добротності і, отже, збільшення частотних шумів перетворювача. З таким же припущенням оцінимо чутливість до зміни магнітної проникності «радіопрозорого» діелектрика. Для шару завтовшки близько довжини хвилі $K_\mu=2 \cdot 10^8$ Гц. Отже отримаємо:

$$\Delta\mu = \frac{\delta f_{rms} \sqrt{B} \sqrt{S/N}}{K_{\mu}} = \frac{0,028 \cdot 10 \cdot \sqrt{10}}{2 \cdot 10^8} = 4 \cdot 10^{-9}. \quad (3.12)$$

Припущення про «ідеальність» аналізатора спектра виправдано хоча б тим, що рівень частотних флуктуацій КОГ, який використаний при оцінці чутливості, був отриманий за допомогою стандартного вимірювача амплітудних і фазових флуктуацій 8 мм діапазону. Слід зазначити, що такі вимірювачі відносяться до розряду дорогого і рідкісного обладнання. Тому, якщо не потрібно проводити вимірювання з граничною чутливістю, доцільніше використовувати менш дефіцитні аналізатори спектра.

3.4. Висновки до розділу 3

Запропоновано вимірювати малі варіації діелектричної або магнітної проникностей речовин шляхом використання спектрального аналізу сигналу квазіоптичного напівпровідникового генератора, у відкритий резонатор якого вноситься досліджувана речовина. Розроблено прототип автогенераторної вимірювальної системи на основі високостабільного квазіоптичного генератора.

Досліджені фізичні процеси дифракції електромагнітного поля на хвилеводному отворі в активному дзеркалі такого генератора, та показано, що саме дифракція на хвилеводному отворі, призводячи до зниження добротності резонатора, зменшує короткочасну стабільність і вихідну потужність генератора, тим самим знижуючи чутливість АВС, побудованої на основі КОГ.

На основі проведених вимірювань визначена оптимальна конструкція активного дзеркала генератора, що дозволило отримати напівпровідниковий квазіоптичний генератор на частоті 30 ГГц з величиною частотного шуму $0,028 \text{ Гц}/\sqrt{\text{Гц}}$ при відстроюванні від несучої 10 кГц. Розроблена система термокомпенсації зміни довжини резонатора, дозволила отримати

температурний коефіцієнт частоти генератора, побудованого з використанням відкритого резонатора типу Фабрі-Перо не більше декількох одиниць $10^{-7} 1/^\circ\text{C}$.

Оскільки радіаційні втрати елементів зв'язку відкритих резонаторів з вихідними отворами хвилеводів є такими факторами, що обмежують точність вимірювань електрофізичних параметрів речовин, створені квазіоптичні генератори на діоді Ганна, вихідна частота яких є другою гармонікою основної частоти генерації. Це дозволяє зменшити втрати в резонаторі на основній частоті генерації і, тим самим, підвищити чутливість автогенераторної вимірювальної системи. Чутливість до вимірювання зсуву частоти генерації підвищується і за рахунок того, що внесення у відкритий резонатор досліджуваної речовини викликає зміну вихідної частоти, що вдвічі більша за зміну основної частоти генерації КОГ.

Було проведено аналіз закономірностей перетворення варіацій діелектричної та магнітної проникностей порошкоподібних речовин, які розміщуються всередині розробленої радіопрозорої кювети, в варіації частоти сигналу квазіоптичного генератора. Показано, що для заданої речовини можна розрахувати оптимальні розміри кювети і її положення у ВР за критерієм максимуму коефіцієнта перетворення.

Розраховано, 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 порошкоподібної речовини завтовшки близько довжини хвилі є можливість вимірювати зміни показника заломлення $\sim 5 \cdot 10^{-9}$.

РОЗДІЛ 4

ХВИЛЕВОДНИЙ ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ДІЕЛЕКТРОМЕТР

Робота приладу заснована на законах поширення електромагнітних хвиль в діелектричному циліндрі, оточеному сильно поглинаючою рідиною. Така електродинамічна структура являє собою своєрідний відкритий хвилевід, в якому поширюються, так звані, хвилі тунелю [112]. В даному розділі коротко описано устрій і робота диференційного діелектрометра, а також результати його використання для вимірювання комплексної діелектричної проникності (КДП) виноматеріалів і розчинів хімічних компонентів. Результати досліджень частково використані в [113], доповідалися на конференціях [37 – 39, 114, 115], опубліковані в декількох статтях радіофізичного профілю [34, 35], а також увійшли в монографію [36].

4.1. Вибір схеми вимірювань

При розробці хвилеводного диференційного діелектрометра ставилося завдання створити компактний вимірювальний комплекс, який, маючи досить хороші характеристики по точності вимірювань, в той же час дозволяв виконувати велику кількість вимірювань в одиницю часу і мав вагові та габаритні параметри, що дозволяють застосовувати його в умовах вимірювання у «замовника».

Вимірювальна схема приладу (рис. 4.1) являє собою НВЧ міст, в два плеча якого включені дві комірки вимірювальної кювети. Поділ сигналу між плечима моста на виході генератора здійснюється за допомогою Е-трійника, а підсумовування сигналів на вході детектора – за допомогою Н-трійника. Був розроблений генератор зі стабільною частотою 31,82 ГГц. Генератор побудований за принципом ФАПЧ транзисторного ГКН на частоті 7955 МГц з опорним кварцовим стандартом частоти і подальшим множенням на чотири. На

виході застосований підсилювач потужності на монолітній інтегральній мікросхемі СНА3093с. Використовується режим амплітудної модуляції НВЧ несучої з частотою 100 кГц. Приймачем сигналу є детектор на діоді з бар'єром Шоттки. Для підвищення співвідношення сигнал/шум застосований селективний підсилювач відеосигналу на частоті модуляції і синхронний детектор.

Амплітуда сигналу в одному з плечей моста регулюється вимірювальним р-і-п-атенюатором. Вимірювальний фазообертач в іншому плечі мосту являє собою рухливий короткозамикаючий поршень, підключений до одного з входів Т-циркулятора. Переміщення поршня проводиться за допомогою крокового двигуна. Перестроювання вимірювального атенюатора і фазообертача в плечах моста здійснюється за програмою мікроконтролера плати управління вимірювального блоку.

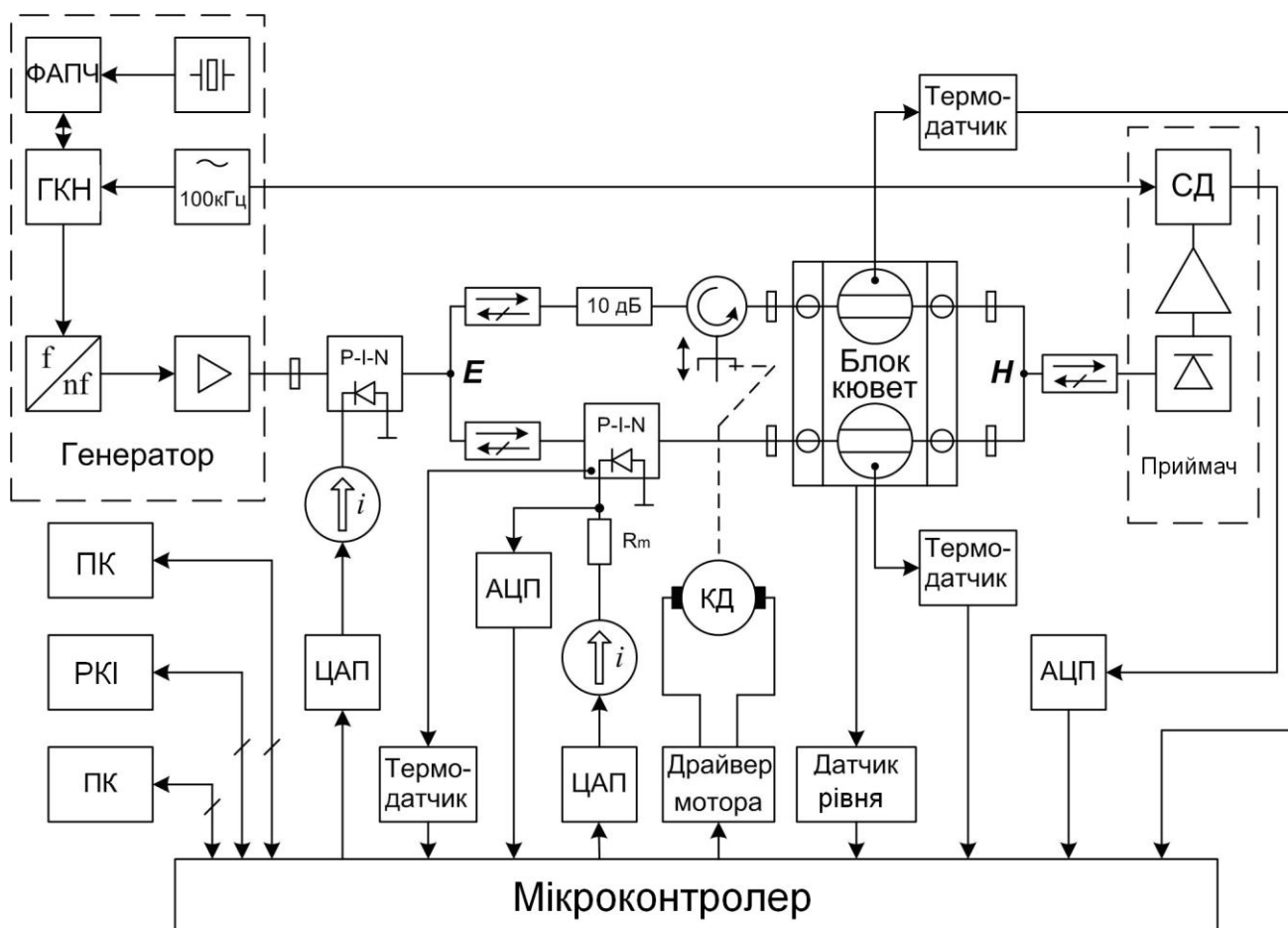


Рис. 4.1. – Вимірювальна схема діелектрометра

Фотографія розробленого приладу для вимірювання КДП водних розчинів представлена на рис. 4.2. Розрахунок КДП проводиться з даних вимірювання різниці коефіцієнтів загасання і фазових сталих електромагнітних хвиль в комітках кювети, заповнених досліджуваним розчином і дистильованою водою. Необхідні для розрахунку значення КДП дистильованої води бралися з [67]

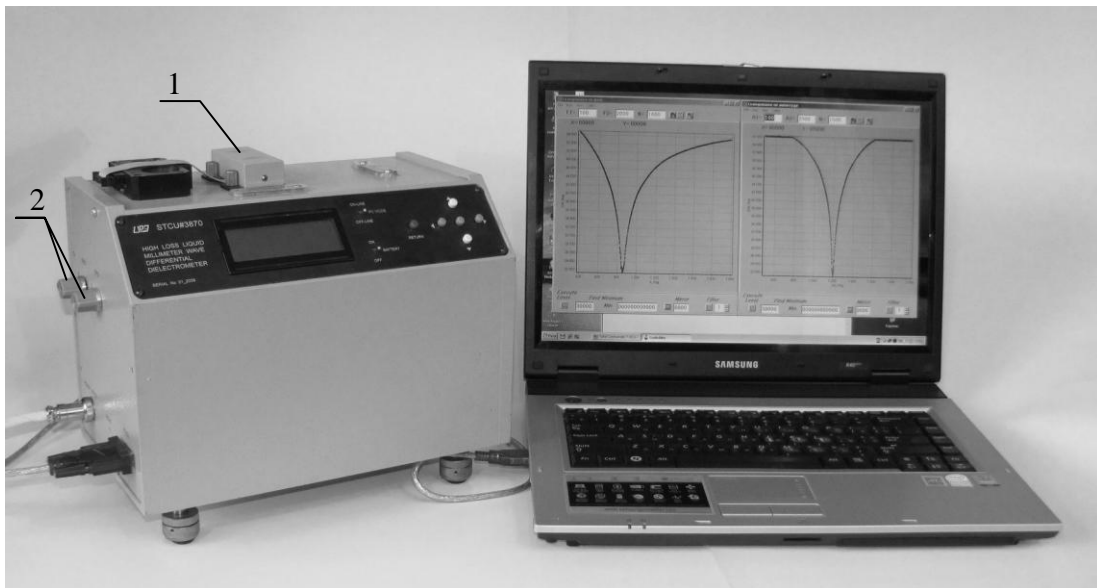


Рис. 4.2. – Фотографія автоматизованого діелектрометра. 1 Блок датчиків температур рідин в комітках; 2 Ручки для відкривання і закривання вентилів зливних отворів коміток кювети

4.2. Вимірювальна кювета

Диференційні методи, що засновані на вимірі різниці КДП розчину і розчинника, спрощують техніку прецизійних вимірювань КДП розчинів [45]. В таких методах використовуються диференційні кювети, вимірювальні комірки яких включені в плечі НВЧ моста того чи іншого типу. Ідентичні по конструкції комірки кювети заповнюють стандартною рідиною і досліджуваним розчином. В результаті похибки вимірювань, пов'язані зі зміною умов навколишнього середовища, мінімізуються. Якщо при цьому

відома КДП стандартної рідини, то диференційні методи автоматично стають абсолютними.

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. При цьому повинні виконуватись співвідношення (4.1) між дійсними і уявними частинами КДП рідини і діелектричного циліндра.

$$\varepsilon_1' < \varepsilon_2', \quad \varepsilon_1'' \ll \varepsilon_2'', \quad \varepsilon_2'' / \varepsilon_2' \geq 1, \quad (4.1)$$

де ε_1 - КДП циліндра, ε_2 - КДП рідини.

Вважаємо також, що магнітні проникності для циліндра і рідини $\mu_1 = \mu_2 = 1$. У разі $\varepsilon_1' < \varepsilon_2'$ відношення імпедансу діелектрика, з якого виготовлений циліндр, до імпедансу навколишнього середовища $\zeta = \sqrt{\varepsilon_1'} / \sqrt{\varepsilon_2'}$ багато менше одиниці, і, отже, на кордоні «рідина-діелектрик» спостерігається сильне відбиття. Це, в повній відповідності з концепцією Бріллюена, означає, що уздовж циліндра будуть поширюватися хвилі, подібні хвилям круглого заповненого діелектриком металевого хвилеводу з втратами в стінках. Зокрема, в цій структурі має сенс поняття критичної довжини хвилі, при наближенні до якої зростають фазова швидкість і коефіцієнт загасання хвилі. Загасання хвилі зростає також тоді, коли діелектрична проникність середовища наближується до діелектричної проникності циліндра. Пов'язано це зі зменшенням коефіцієнта відбиття від границі «рідина-діелектрик», тобто зі збільшенням амплітуди заломленої в середовище хвилі. Коли діелектрична проникність рідини стане менше діелектричної проникності циліндра, одержимо відомий випадок діелектричного хвилеводу, і втрати хвилі типу HE_{11} пропорційні тангенсу втрат в середовищі. У нашому випадку хвиля експоненціально загасає в середовищі у напрямку нормалі до поверхні, але всередині циліндра має

об'ємний характер завдяки близькості протилежної границі «рідина-діелектрик». Характерною рисою такої хвилі є залежність коефіцієнта загасання і фазової сталої від КДП середовища. Таким чином, показано, що існує залежність коефіцієнта загасання і фазової сталої хвилі в структурі «діелектричний циліндр в сильно поглинаючій рідині» від КДП рідини. Наявність такої залежності використовується далі для вимірювання КДП рідини.

У статті [112] теоретично досліджувалося поширення електромагнітних хвиль в структурах, що представляють собою циліндричні канали в поглинаючому середовищі. Подібна хвилеводна структура, а саме канал в сильно поглинаючій рідині, незалежно була досліджена в [34, 114, 116]. Особливість розглянутих відкритих хвилеводних структур полягає в тому, що діелектрична проникність речовини каналу менше і навіть багато менше діелектричної проникності навколишнього середовища. Будемо називати хвилі в цій відкритій електродинамічній структурі хвилями тунелю в рідині, віддаючи, тим самим, пріоритет в їх дослідженні авторам роботи [112].

Дослідження хвиль тунелю в циліндричних каналах піддається строгому аналізу. Вирішуючи рівняння Максвелла з відповідними граничними умовами можна отримати відоме характеристичне рівняння, що зв'язує хвильове число в вакуумі k , радіус a діелектричного циліндра (ε_1 -КДП матеріалу циліндра) з КДП рідини $\varepsilon_2 = \varepsilon' + j\varepsilon''$, [112, 116]:

$$\left(\frac{J'_n(g_1 a)}{g_1 a J_n(g_1 a)} - \frac{H_n^{(1)'}(g_2 a)}{g_2 a H_n^{(1)}(g_2 a)} \right) \left(\frac{\varepsilon_1 J'_n(g_1 a)}{g_1 a J_n(g_1 a)} - \frac{\varepsilon_2 H_n^{(1)'}(g_2 a)}{g_2 a H_n^{(1)}(g_2 a)} \right) = \frac{n^2 h^2 (g_2^2 - g_1^2)^2}{k^2 g_1^4 g_2^4 a^4}, \quad (4.2)$$

де $J_m(\cdot), H_m(\cdot)$ - функції Бесселя і Ханкеля першого роду m -го порядку; $g_1 = \sqrt{k^2 \varepsilon_1 - h^2}$, $g_2 = \sqrt{k^2 \varepsilon_2 - h^2}$; h - поздовжнє хвильове число (комплексна стала поширення хвилі в тунелі).

Вирішуючи рівняння (4.2), можна отримати ряд комплексних коренів (поздовжні хвильові числа структури) якщо відома довжина хвилі, КДП рідини, радіус і діелектрична проникність матеріалу циліндра. Аналіз розподілів електромагнітних полів, відповідних хвильовим числам h_{mn} , показує, що в діелектричному циліндрі, зануреному в сильно поглинаючу рідину, можуть бути збуджені сімейства хвилі чотирьох типів. Два найпростіших сімейства - це хвилі поперечного електричного (TE_{0n}) або поперечного магнітного (TM_{0n}) типів, у яких відсутні z -компоненти електричного або магнітного полів, відповідно. Перший індекс вказує на осьову симетрію полів, а другий індекс є число максимумів в розподілі полів уздовж радіуса від $r=0$ до $r=a$. Два інших сімейства хвиль відносяться до гібридних типів хвиль і мають не нульові z -компоненти як для електричної, так і для магнітної складових. Залежно від того, яка з компонент (H_z або E_z) є переважаючою, ці типи хвиль прийнято позначати, як HE_{mn} і EH_{mn} , відповідно. Індекс “ m ” дорівнює числу нулів у розподілі полів по азимуту при зміні ϕ от 0 до 2π , а індекс “ n ” дорівнює числу максимумів в розподілі полів уздовж радіуса r всередині циліндра від 0 до $r=a$.

Зусилля були зосереджені на дослідженні властивостей HE_{11} типу хвилі, оскільки її легко збуджувати хвилею типу H_{10} з торця прямокутного хвилеводу і вона має найменше загасання. В експериментальних дослідженнях використовувалася вимірювальна комірка, осьовий переріз якої показано на рис. 4.3.

Комірки вимірювальної кювети є циліндричні стакани 4, виконані в загальному мідному корпусі. У стінки кожного стакану перпендикулярно бічних поверхонь вкесні кварцові циліндри 2. Рідини 1 (досліджуваний розчин і стандартна рідина) заливають в стакани. Коефіцієнт загасання хвилі, що розповсюджується вздовж кварцового циліндра, зануреного в сильно поглинаючу рідину, порівняно малий (близько 10 дБ / см), а впливом стінок стакану на відстані порядку довжини хвилі від стрижня можна знехтувати.

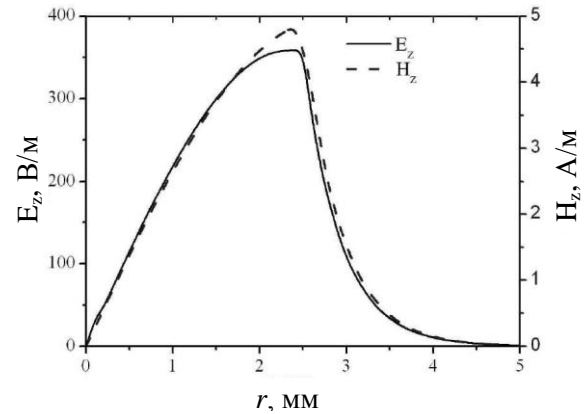
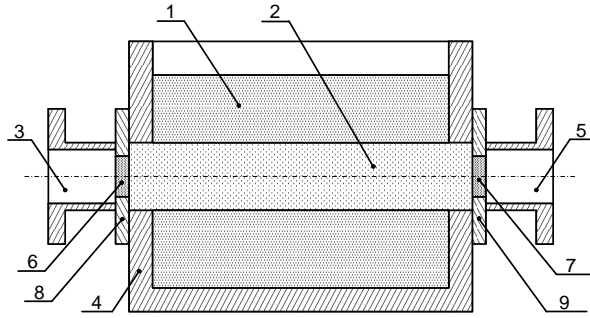


Рис. 4.3. – Осьовий переріз вимірювальної комірки. 1 рідина в циліндричному стакані; 2 кварцовий циліндр; 3 і 5 вхідний і вихідний прямокутні хвилеводи; 4 корпус стакану; 6 і 7 циліндричні втулки із фторопласта; 8 і 9 узгоджувальні пластини

Рис. 4.4. – Радіальний розподіл електричного $E_z(r)$ і магнітного $H_z(r)$ полів в кварцовому стрижні у воді. Чисельне моделювання за допомогою FDTD моделі комірки

У розглянутій комірці буде збуджуватися хвиля HE_{11} типу, оскільки розподіл поля падаючої з прямокутного хвилеводу H_{10} хвилі і поля хвилі H_{11} в узгоджувальних секціях 8 і 9 подібні розподілу поля хвилі HE_{11} типу в циліндрі, а діаметр циліндра обраний приблизно рівним довжині хвилі. Це твердження було підтверджено розрахунками на комп'ютерній моделі комірки, ідентичній реальній (рис. 4.3). Отриманий розподіл компонент поля уздовж радіуса циліндра показано на рис. 4.4.

Були виконані вимірювання коефіцієнта загасання і фазової сталої хвилі HE_{11} типу. Частотна залежність коефіцієнта загасання h''_{11} була отримана за допомогою панорамного вимірювача КСХН і загасання Р2-65. Прилад був доопрацьований в плані автоматизації введення даних вимірювань в комп'ютер. Вимірювалося поглинання електромагнітної хвилі в комірці без

узгоджувальних секцій 8 і 9 (рис. 4.3) як різниця потужностей хвилі, що пройшла і хвилі, що була відбита. Поглинена в комірці потужність ділилася на діаметр стакану вимірювальної комірки $D=20$ мм. На рис. 4.5 представлені результати розрахунків за рівнянням (4.2) частотної залежності поздовжнього хвильового числа $h_{11} = h'_{11} + ih''_{11}$ для хвилі HE_{11} типу в кварцовому стрижні, зануреному у дистильовану воду. Там же відкладені результати вимірювань коефіцієнта поглинання, проведені за допомогою приладу Р2-65. Розбіжність даних розрахунків і вимірювань на рис. 4.5а знаходиться в межах похибки вимірювань.

Експериментальна і теоретична залежності фазової сталої хвилі HE_{11} типу від частоти також представлені на рис. 4.5б. Вимірювання були проведені на фіксованих частотах в діапазоні (25-37,5) ГГц методом заміщення з використанням НВЧ моста і вимірювального фазообертача.

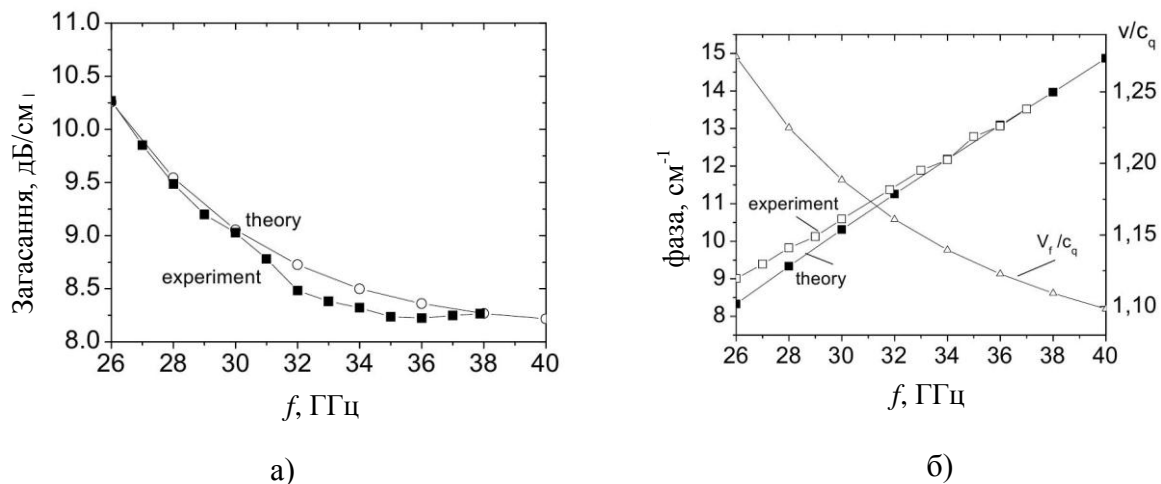


Рис. 4.5. – Порівняння теоретичних та експериментальних даних по частотній залежності коефіцієнта поглинання (а) і фазової сталої (б) хвилі HE_{11} типу в кварцовому стрижні, зануреному в дистильовану воду. На правій осі графіка (б) відкладена фазова швидкість, нормована на швидкість світла в кварці

Вимірювалася різниця фаз між сигналом, що пройшов через вимірювальну комірку, і сигналом, що пройшов через відрізок прямокутного хвилеводу, довжина якого дорівнювала довжині комірки. Відрізок хвилеводу і

вимірювальна комірка включалися в плечі попередньо збалансованого моста. Набіг фази в відрізку прямокутного хвилеводу розраховувався за відомою формулою. Враховувався також набіг фази в двох відрізках круглих хвилеводів довжиною 2 мм, утворених заповненими кварцом отворами в металевих стінках комірки (рис. 4.3). Фазова стала n'_1 розраховувалася як відношення вимірної різниці фаз до діаметру стакану комірки.

При експериментальному визначенні коефіцієнта загасання (розмірність дБ / см) і фазової сталої (розмірність радіан / см) виміряні значення загасання і фазового набігу хвилі HE_{11} типу в комірці ділилися на діаметр стакану комірки. Однак, падаюча хвиля зазнає дифракцію на перетині круглого хвилеводу з бічною поверхнею комірки, заповненої рідиною. Це, в принципі, повинно призводити до втрат потужності при трансформації хвилі круглого хвилеводу в хвилю HE_{11} типу в циліндрі. Формування хвилі HE_{11} типу в циліндрі буде відбуватися на кінцевій (не нульовій) відстані. В результаті область поширення сформованої хвилі буде відрізнятися від діаметра стакану. Іншими словами, замість геометричної довжини стрижня в склянці ми будемо мати деяку ефективну довжину l_{eff} комірки.

Ефективна довжина комірки обчислювалася з аналізу результатів чисельного моделювання пристрою збудження комірки. Геометрія структури була ідентична геометрії комірки, використаної в експерименті (рис. 4.3), включаючи наявність узгоджувальних вставок. На рис. 4.6 точками показано розрахований розподіл модуля $|H_z(z)|$ складової магнітного поля на поверхні кварцового циліндра і дистильованої води. Початок координат ($z=0$) і координата $z=20$ мм відповідають стикам відрізків круглих хвилеводів зі стаканом комірки. Суцільною лінією показані результати постобробки даних - експоненціальна функція $a_0 \exp(-a_1 z)$, коефіцієнти a_0, a_1 якої обчислені методом найменших квадратів. При цьому функція апроксимації розраховувалася на ділянці $z \in (z_0, z_0 + \Delta z)$ $z_0 = 2$ мм, $\Delta z = 16$ мм, де впливом країв стакану комірки на похибку апроксимації можна було знехтувати. Очевидно, що шуканий

коефіцієнт загасання хвилі HE_{11} типу дорівнює $h'' = a_1 20 \lg e$. На тій же ділянці всередині комірки фазова стала розраховувалася за формулою $h' = (\arg(H_z(z_0 + \Delta z)) - \arg(H_z(z))) / \Delta z$.

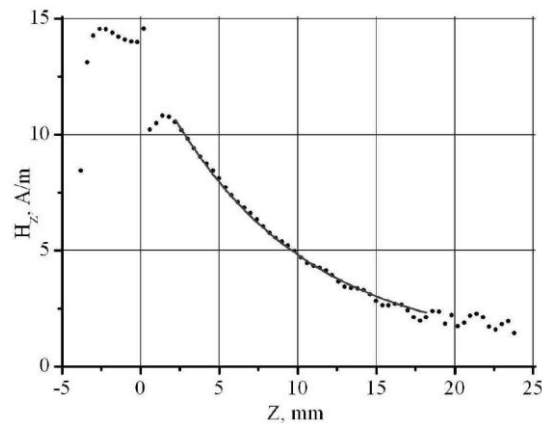


Рис. 4.6. – Розподіл модуля напруженості поздовжньої складової магнітного поля на границі циліндра вздовж його осі: точки - дані чисельного розрахунку; суцільна лінія - апроксимація експонентою

Комп'ютерне моделювання дає, також, модуль і фазу коефіцієнта передачі S_{21} і модуль і фазу коефіцієнта відбиття S_{11} комірки. Тому можна розрахувати також значення загасання L і фазового набігу хвилі в комірці. Тоді, ефективна довжина комірки, необхідна для визначення коефіцієнта загасання за відомим загасанням в комірці, буде дорівнювати $l_{eff}^{(1)} = L / h''$, а ефективна довжина комірки, необхідна для визначення фазової сталої хвилі за відомим набігом фази в комірці – $l_{eff}^{(2)} = (\arg(H_z(l)) - \arg(H_z(0))) / h'$. Для комірки з кварцовим стрижнем у воді виявилося, що $l_{eff}^{(1)} = 19,91$ мм а $l_{eff}^{(2)} = 19,88$ мм, тобто ефективна і геометрична довжина комірки мало відрізняються одна від одної.

Вимірювальна кювета складається з двох ідентичних комірок виконаних в загальному корпусі 1 (рис. 4.7). Кожна комірка є циліндричний стакан з внутрішнім діаметром 20 мм і глибиною 25 мм заповнений сильно поглинаючою рідиною 3. Діелектричний циліндр 2 з радіусом $a = 2,5$ мм з плавненого кварцу поміщений всередині стакану з рідиною так, що його вісь

перпендикулярна бічній поверхні стакану, при цьому обидва кінці циліндра герметично вмонтовані в бічні стінки корпусу 1 товщиною 2 мм. Довжина кварцового циліндра дорівнює 28 мм. Електромагнітна хвиля вводиться в вимірювальну комірку і виводиться з неї за допомогою прямокутних хвилеводів 8-мм діапазону 8 з перетином $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$. Передбачена можливість установки узгоджувальних пластин 9 з метою проведення прецизійних вимірювань на фіксованій частоті. Узгодження здійснюється чвертьхвильовими відрізками круглих хвилеводів, заповнених фторопластом.

Після проведення вимірювання стакани звільняють від рідин, відкриваючи зливні отвори 6. Датчики температури 7, встановлені в кришках 4, призначені для контролю температури рідин в стаканах комірок. На рис. 4.2 вказано розташування блоку датчиків температури і ручок вентилів зливних отворів.

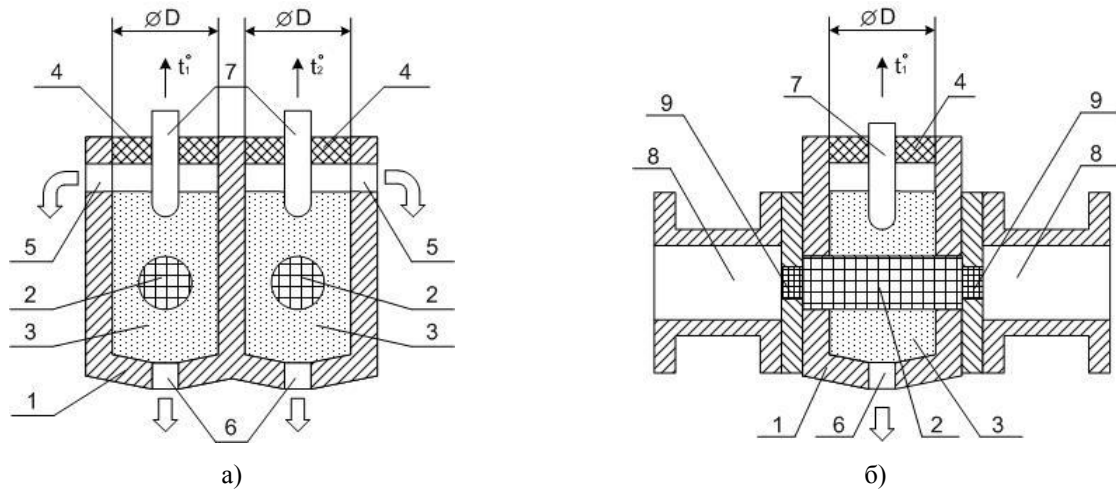


Рис. 4.7. – Поперечний перетин кювети (а) і поздовжній перетин однієї з комірок кювети (б): 1 корпус диференційної кювети; 2 кварцові циліндри; 3 рідини; 4 кришки; 5 переливні отвори; 6 зливні отвори; 7- датчики температури; 8- відрізки прямокутних хвилеводів стандартного перетину; 9 - відрізки круглих хвилеводів, заповнені фторопластом

Зовнішній вигляд блоку кювет представлений на рис 4.8, узгоджувальна пластина, що представляє собою два чвертьхвильових відрізка круглого хвилеводу з фторопластовим заповненням, показана на рис 4.9.

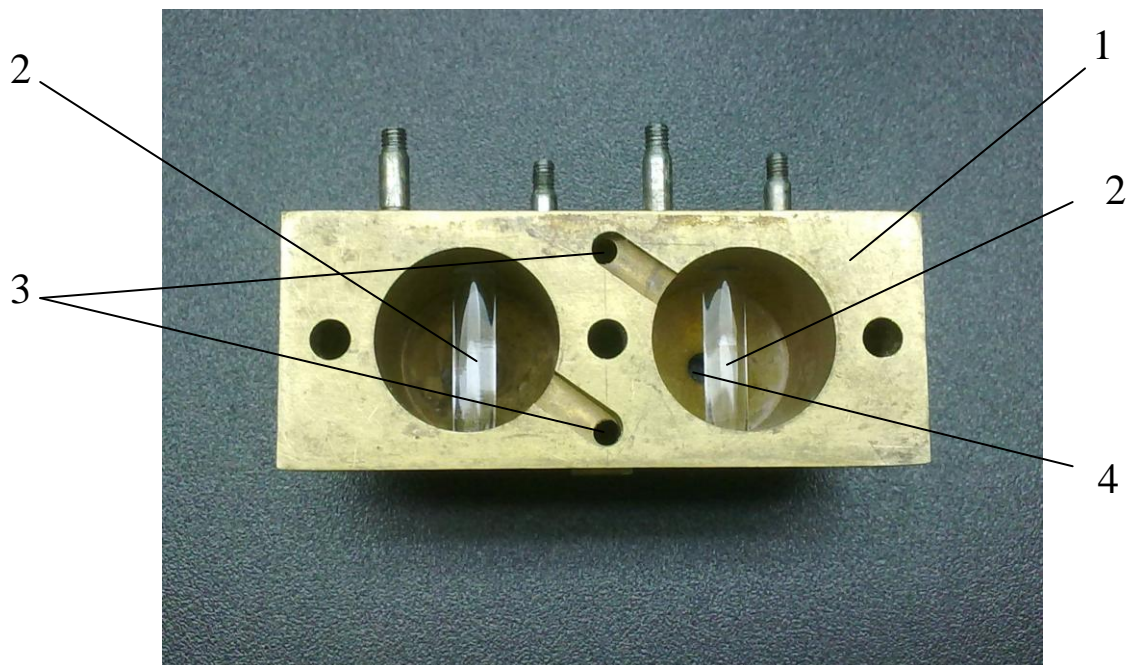


Рис. 4.8. – Блок кювет: 1 корпус диференційної кювети; 2 кварцові циліндри; 3 переливні отвори; 4 один зі зливних отворів

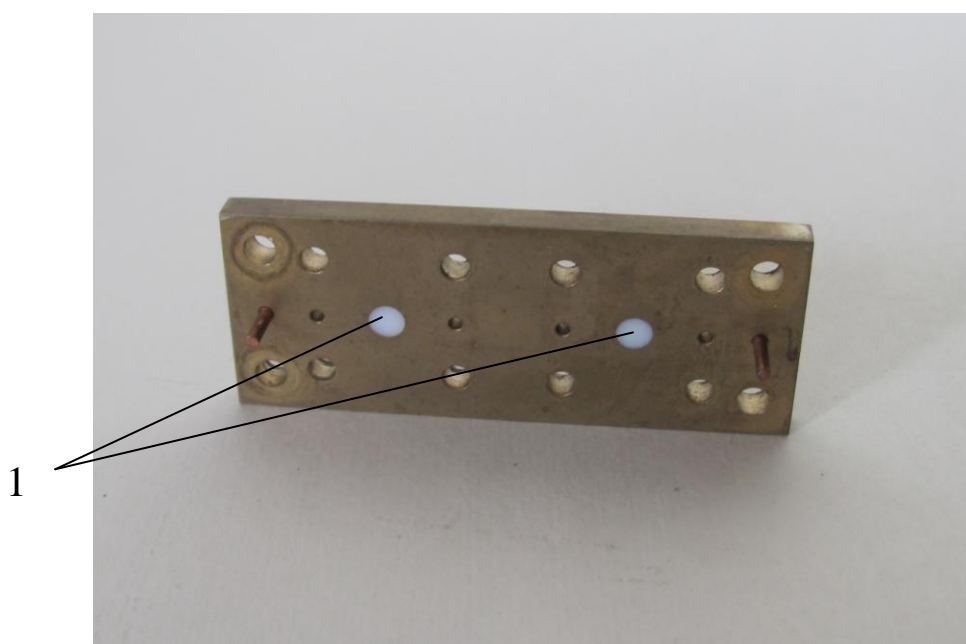


Рис. 4.9. – Узгоджувальна пластина. 1 відрізки круглих хвилеводів, заповнені фторопластом

4.3. Розробка елементів НВЧ-схеми, їх характеристики

НВЧ-схема діелектрометра представлена на рис 4.10. На рис. 4.11 показаний зовнішній вигляд НВЧ-тракту.

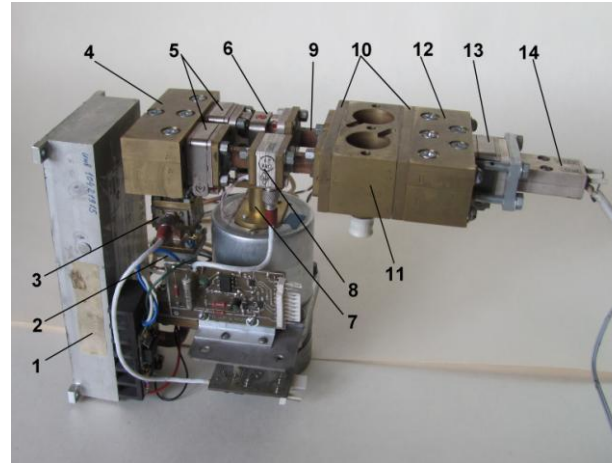
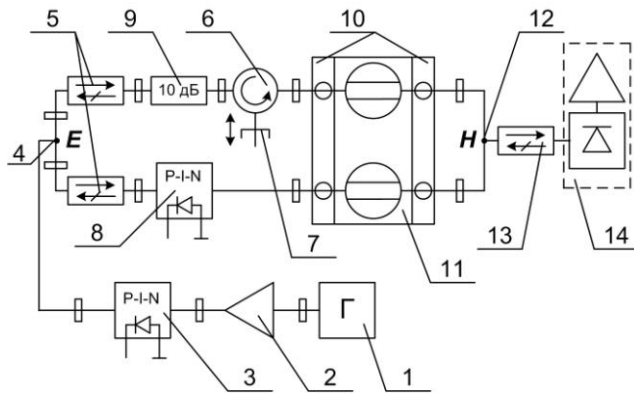


Рис. 4.10. – Схема НВЧ-тракту діелектрометра

Рис. 4.11. – НВЧ-тракт діелектрометра

На схемі представлені:

1 - синтезатор частоти; 2 - підсилювач потужності; 3 - регулюючий р-і-п-атенюатор; 4 – Е-трильник, роздільник сигналу; 5 - феритові вентилі; 6 – Т-циркулятор; 7 - вимірювальний КЗ-поршень; 8 - вимірювальний р-і-п-атенюатор; 9 – 10 дБ атенюатор; 10 - узгоджувальні пластини; 11 - блок кювет; 12 – Н-трильник, суматор сигналів; 13 - феритовий вентиль; 14 - детектор з МШП.

Використовуване у схемі джерело НВЧ сигналу, що представляє собою транзисторний ГКН (1) з підсилювачем потужності (2), має вихідну потужність близько 100 мВт. Щоб не перевантажувати приймальну частину приладу надмірним сигналом, що може статися в разі включення приладу без попередньої заливки досліджуваних сильно поглинаючих рідин, в схемі застосований керований струмом р-і-п-атенюатор (3) поглинального типу. Атенюатор постійно знаходиться в режимі поглинання і відкривається по

команді мікроконтролера тоді, коли починається процес вимірювання. Після закінчення вимірювання атенюатор відразу ж закривається.

Принцип роботи диференційного діелектрометра передбачає поділ вихідної потужності на два канали: опорний і вимірювальний. За допомогою Е-трійника (4), реалізовано синфазний поділ потужності порівну в обидва канали. Надалі, в схемі здійснюється протифазне підсумовування НВЧ потужності, що пройшла через два канали диференційної кювети, яке реалізовано за допомогою суматора (12), побудованого за аналогічним принципом Н-трійника. Суматор показаний на рис. 4.12.

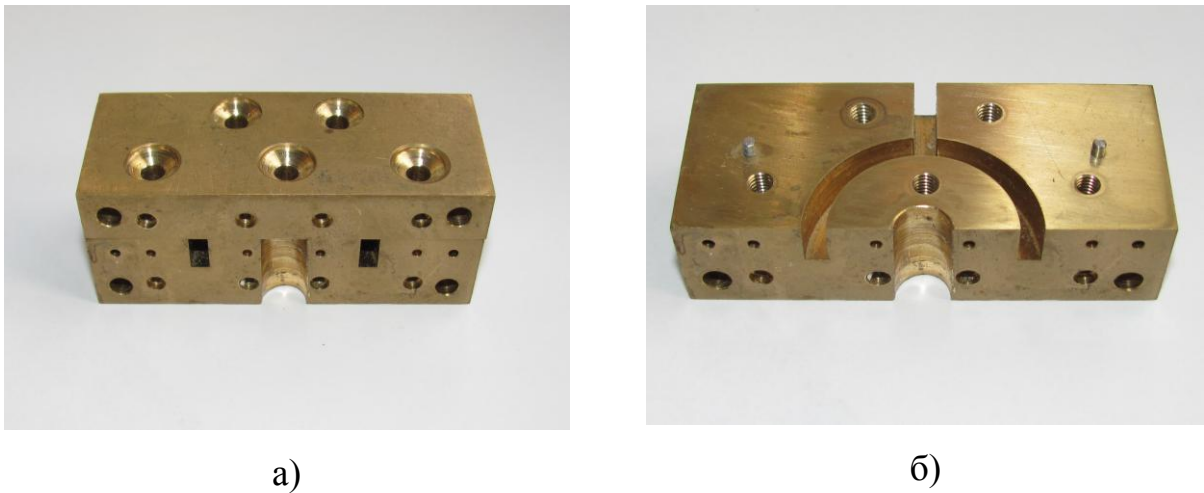


Рис. 4.12. – Суматор потужності. а) - загальний вигляд, б) – конструкція

Для зменшення сумарної довжини НВЧ тракту, кола, в яких вимірюється зміна фази і зміна амплітуди, розміщені в різних каналах. Самі канали розв'язані від роздільника феритовими вентилями.

Зміна фазового набігу в одному з каналів здійснюється шляхом переміщення короткозамикаючого поршня. Оскільки використовується схема «на відбиття», то зсув фази в каналі буде пропорційний подвоєному переміщенню поршня. Для прецизійного переміщення поршня використовувався кроковий двигун ДШМ-200-1. Використання крокового двигуна дозволяє здійснювати переміщення поршня відповідно до заданої програми, встановлювати його в задане положення з одночасним вимірюванням

виробленого переміщення. Дискретність обертання цього двигуна становить 200 кроків на 1 оберт. У механізмі перетворення обертального руху в поступальний використовувався безлюфтовий мікрометричний привід, що забезпечує лінійне переміщення на 0,5 мм за 1 оберт. Виходячи з цього, можна знайти дискретність регулювання фази.

$$\Delta\varphi_{\min} = 2 \cdot \frac{360^{\circ}}{\lambda_g} \Delta l_{\min}, \quad (4.3)$$

де $\Delta\varphi_{\min}$ - крок зміни фази, Δl_{\min} - крок переміщення поршня, λ_g - довжина хвилі в хвилеводі.

З огляду на те, що на нашій робочій частоті 31,82 ГГц довжина хвилі в хвилеводі $\lambda_g = 12,4585$ мм, а $\Delta l_{\min} = 0,5$ мм/200 = 0,0025 мм, то крок зміни фази $\Delta\varphi_{\min}$ за допомогою крокового двигуна ДШМ-200-1 буде дорівнювати $0,14448^{\circ}$. Діапазон переміщення поршня становить 9 мм, що приблизно відповідає $\frac{3}{4} \lambda_g$, значить, для забезпечення переміщення поршня на всю довжину з кроком 0,0025 мм знадобиться 3600 кроків, і для реалізації цього переміщення необхідно використовувати 12 розрядний код.

Такої ж розрядності цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), що забезпечує установку 4096 значень, використовується і для управління струмом через вимірювальний р-і-п-атенюатор. Оскільки максимальна зміна загасання в комірці може бути ~ 10 дБ (це пов'язано з областю передбачуваного застосування діелектрометра для ідентифікації вмісту спирту в алкогольних напоях), то мінімальний крок перестроювання складе 0,0024 дБ. Для р-і-п-атенюатора це буде відповідати мініальному кроку зміни струму через діод приблизно рівному 10 мА / 4096 = 2,4 мкА.

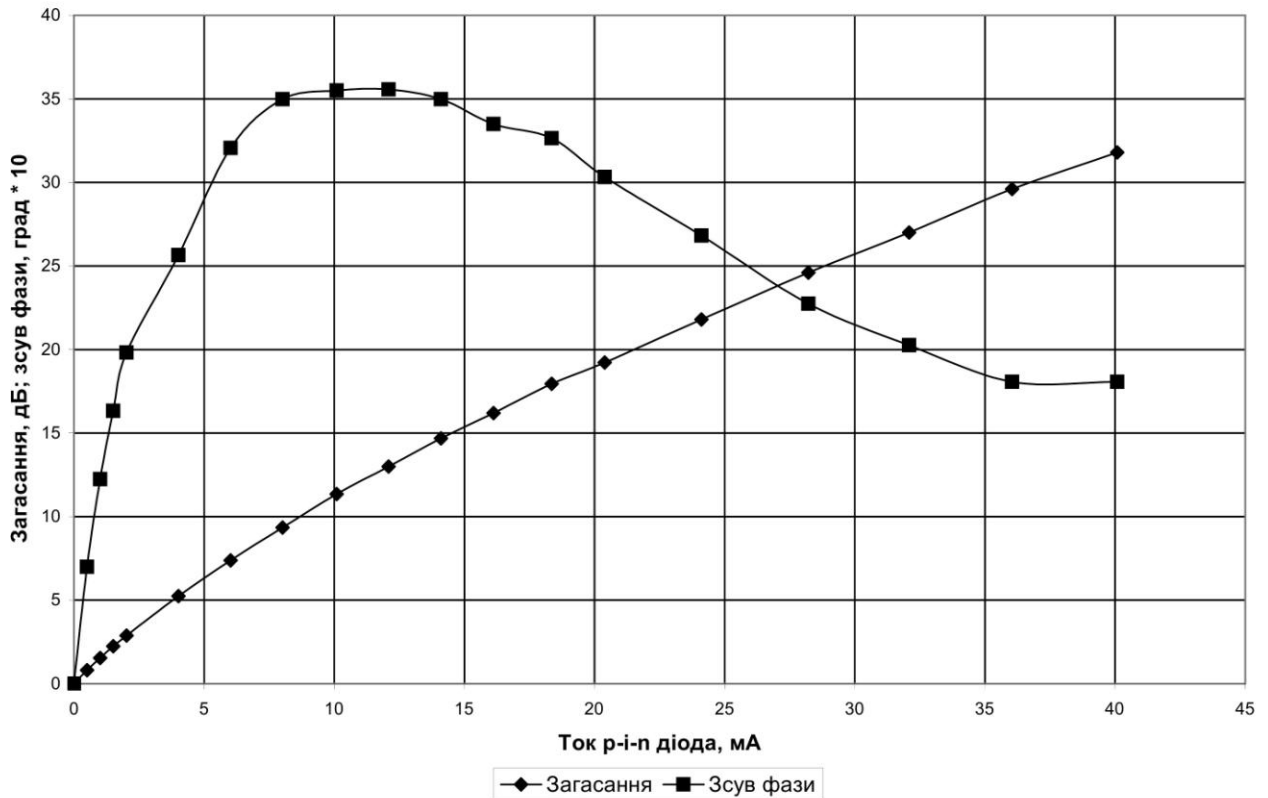


Рис. 4.13. — Амплітудна і фазова характеристики вимірювального р-і-n-атенюатора

На рис. 4.13 представлені вимірні залежності амплітуди сигналу і його фази від струму, що проходить через вимірювальний р-і-n-атенюатор. Видно, що в міру зростання струму поглинання НВЧ-енергії р-і-n-діодом монотонно зростає. У той же час паразитна зміна фази сигналу, що пройшов через р-і-n-діод, в найменшій мірі залежить від струму на ділянці від 6 мА до 18 мА. У зв'язку з цим початковою точкою, від якої буде відраховуватися зміна амплітуди і зміна фази, які знадобилися для відновлення балансу, порушеного після заміни референсної рідини, на рідину, що досліджується, була обрана точка, в якій струм через вимірювальний р-і-n-атенюатор дорівнює 10 мА.

Оскільки в цій початковій точці вимірювальний р-і-n-атенюатор вносить в вимірювальний канал ослаблення, що дорівнює 10 дБ, то, для збереження балансу амплітуд, в референсному каналі встановлено додатковий фіксований атенюатор 9 (рис. 4.10) такої ж величини.

4.4. Мікропроцесорне управління НВЧ-вузлами та автоматизація процесу вимірювання

Плата управління вимірювального блоку розроблена на основі мікроконтролера *AT90USB1287*. Основна функція плати – управління рівнем амплітуди і фази сигналу в плечах моста. За допомогою плати управління вимірюються струм, а, отже, і загасання в р-і-п-атенюаторі, і положення поршня, а, отже, і зрушення фази в фазообертачі, а також рівень сигналу на виході приймача. Крім цього, за допомогою плати регулюється рівень сигналу на виході генератора, вимірюються температури рідин в комірках кювети і температура корпусу р-і-п-атенюатора. Плата управління забезпечує інтерфейс користувача з консолі вимірювального блоку в автономному режимі роботи, а також обмін даними з ПК.

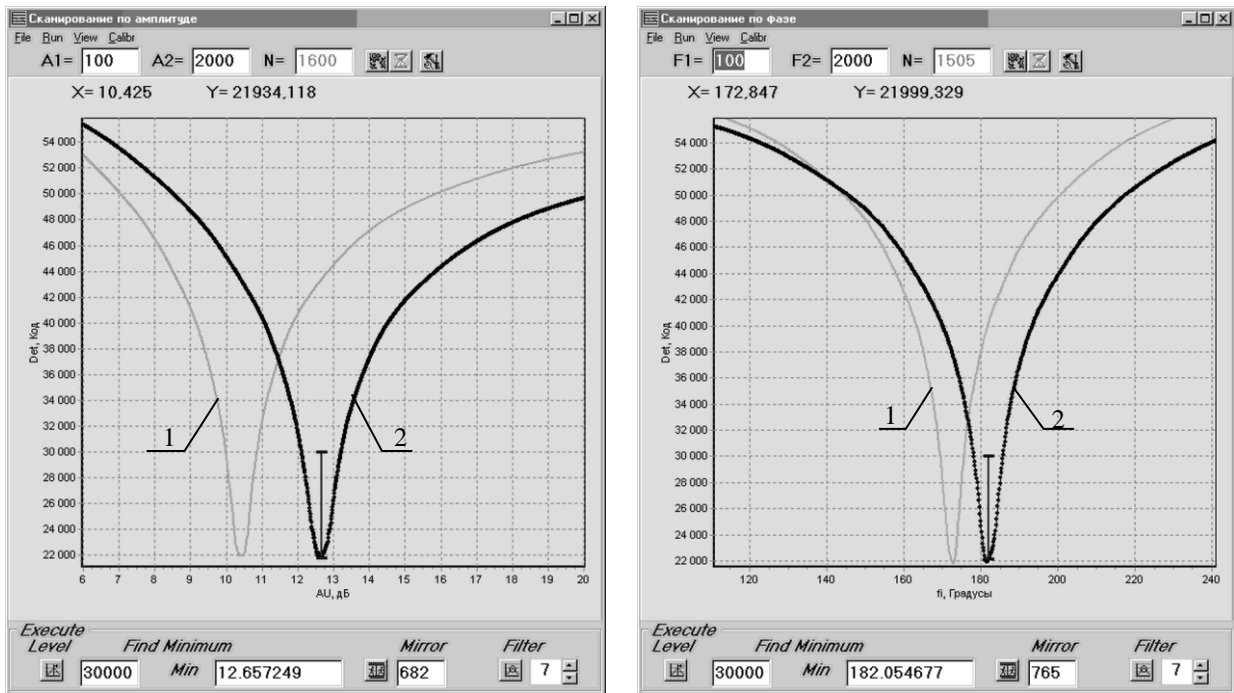
Оператором в ручному режимі здійснюється заповнення і злив рідин в комірках кювети. Всі інші операції процедури вимірювань автоматизовані. Ітераційний процес балансування моста здійснюється за допомогою програми ПК. Показання $F(\delta L, \delta\varphi)$ АЦП приймача в логарифмічних одиницях як функція різниці амплітуд δL , δB і різниці фаз $\delta\varphi$, *град* в плечах мосту від стану балансу схеми (L_0, φ_0) , де L_0 , и φ_0 - загасання і набіг фази в плечах збалансованого моста, можна записати у вигляді

$$F(\delta L, \delta\varphi) = \frac{\partial F_A(L_0, \varphi_0)}{\partial L} \delta L + \frac{\partial F_\Phi(L_0, \varphi_0)}{\partial \varphi} \delta\varphi. \quad (4.4)$$

Під час першої ітерації проводиться сканування по фазі при довільній фіксованій амплітуді; обчислюється мінімум фазової функції F_Φ ; фазообертач повертається в положення мінімуму; проводиться сканування по амплітуді; обчислюється мінімум амплітудної функції F_A ; атенюатор повертається в положення мінімуму. На цьому перша ітерація закінчена. Випробування

показали, що для максимально точного балансування моста досить виконати три ітерації.

В якості ілюстрації на рис. 4.14 наведені записи амплітудної і фазової функцій. Ці функції виводяться на екран ПК в реальному масштабі часу при автоматичній зміні амплітуди і фази сигналу в плечах моста.



(a)

(б)

Рис. 4.14. – Амплітудні (а) і фазові (б) функції діелектрометра для 1) дистильованої води в обох комірках кювети і для 2) дистильованої води і сухого вина в різних комірках кювети

Після запису апаратних функцій проводиться цифрова НЧ фільтрація даних і обчислення положення мінімуму методом, який представлено, наприклад, в [117] – як середнє по загасанню або по набігу фази на схилах кривих в точках, де відношення сигнал/шум по порядку величини дорівнює 10 дБ. На рис. 4.14 вертикальними лініями показані розрахункові положення мінімумів для сухого вина щодо дистильованої води. Значення точок мінімумів функцій (L_t, φ_t) , і (L_r, φ_r) пересилаються в програму ПК для розрахунку КДП досліджуваної рідини.

Алгоритм вимірювання КДП рідини зводиться до наступного:

З рішення характеристичного рівняння 4.2 за відомою КДП обчислюється коефіцієнт загасання $h_r''[dB/cm]$ і фазова стала $h_r' [rad/cm]$ для HE_{11} типу хвилі в комірці з еталонною рідиною. Вимірюється різниця коефіцієнтів загасання $\Delta h''[dB/cm]$ і різниця фазових набігів $\Delta h' [rad/cm]$ хвилі HE_{11} типу в комірках диференційної кювети відповідно до наведеної вище процедури. Обчислюється коефіцієнт загасання $h_t''[dB/cm]$ і фазова стала $h_t' [rad/cm]$ комірки з досліджуваною рідиною за формулами: $h_t'' = h_r'' + \Delta h''$ і $h_t' = h_r' + \Delta h'$. і, нарешті, з рішення рівняння (4.2) розраховується КДП $\varepsilon_t = \varepsilon_t' + i\varepsilon_t''$ досліджуваної рідини за знайденими h_t'' і h_t' .

До стандартної рідини, тобто рідини з відомою КДП, пред'являються вимоги стабільності діелектричних властивостей в умовах вимірювань і близькості її КДП до КДП досліджуваної рідини. Бажаною також є можливість виготовлення стандартної рідини в умовах лабораторій фізико-хімічного профілю. При дослідженні КДП водних розчинів різних речовин, зокрема соків і вин, в якості стандартної рідини зручно вибрати дистильовану воду [118]. Крім того, дистильована вода рекомендована в якості стандарту при дослідженні діелектричних властивостей сильно поглинаючих рідин [67]. У цій же статті приведена формула для розрахунку КДП води в діапазоні частот 0 – 25 ТГц і діапазоні температур 0 – 100 °С, яка використовувалася для розрахунку КДП дистильованої води на частоті 31,82 ГГц. Оскільки КДП води сильно залежить від температури в комірках діелектрометра, передбачено вимір температури рідин з абсолютною похибкою $\pm 0,1$ °С. Розрахунок КДП проводиться при вимірній температурі.

4.5. Аналіз джерел похибки і оцінка точності вимірювань

Головним чином похибка вимірювання різниці комплексної сталої поширення в комірках кювети залежить від метрологічних характеристик вимірювального р-і-n-атенюатора і вимірювального фазообертача.

Поглинання НВЧ сигналу в атенюаторі визначається струмом, що протікає через р-і-n-діод. На величину поглинання впливає також температура корпусу діода. Струм через діод задається стабілізованим джерелом струму, а його величина вимірюється по падінню напруги на прецизійному резисторі за допомогою інструментального операційного підсилювача. Калібрування атенюатора на робочій частоті проводилося з абсолютною похибкою $\pm 0,005$ дБ в діапазоні загасань 0–25 дБ і діапазоні температур 5-45 °С. На рис. 4.15 показана температурна залежність загасання р-і-n-атенюатора.

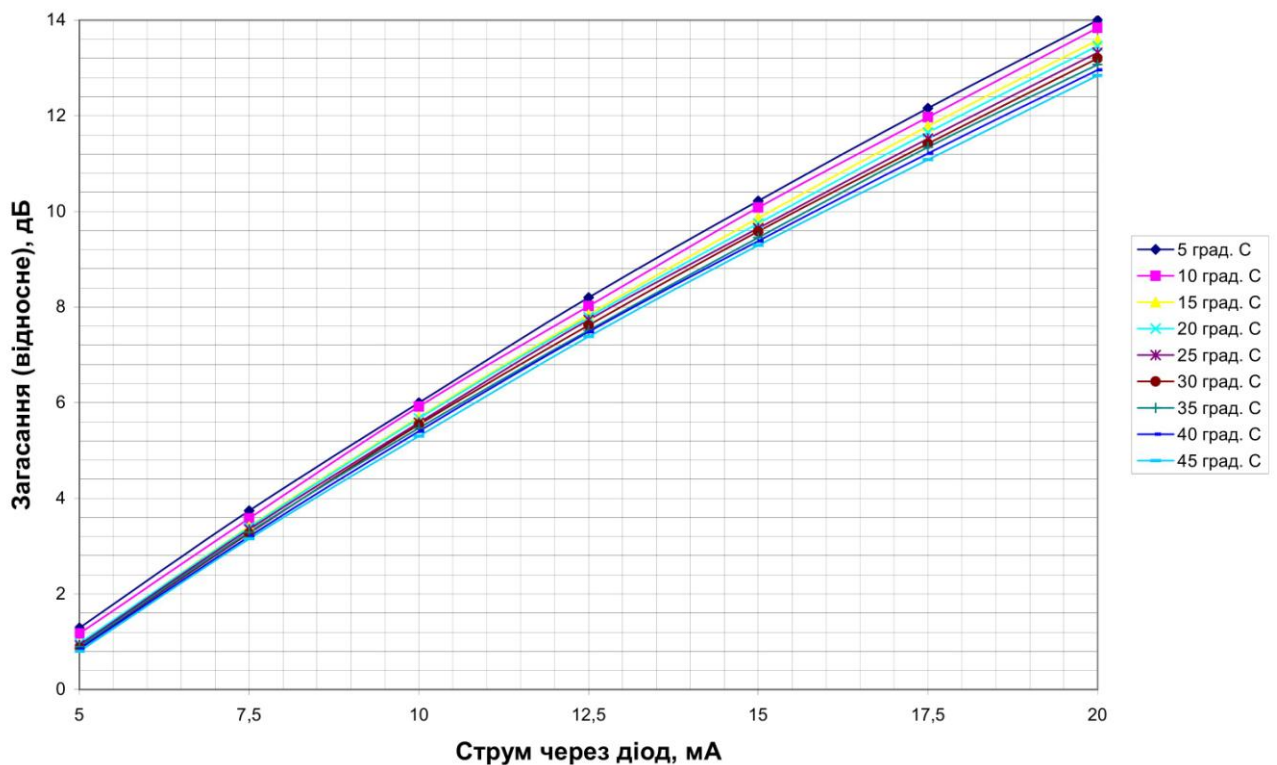


Рис. 4.15. – Температурна залежність загасання р і n атенюатора

Температурний коефіцієнт загасання по порядку величини склав 0,05 дБ / °С і на рівні тисячних часток децибела залежав від струму через діод.

Калібрування амплітудної функції діелектрометра виконано при 20 °С. Температурна поправка на загасання атенюатора для інших температур автоматично вводиться програмою управління на основі даних вимірювання температури корпусу р-і-п-атенюатора. Результуюча абсолютна похибка вимірювання різниці амплітуд в комітках диференційної кювети складає не більше $\pm 0,005$ дБ

Різниця набігу фаз в плечах інтерферометра змінюється за допомогою короткозамикаючого поршня. Як вже було сказано вище, поршень переміщується за допомогою крокового двигуна шляхом обертання гвинта прецизійної пари «гвинт-гайка». Переміщення поршня за один крок повороту двигуна становить 2,5 мкм, що відповідає зміні фази 0,144 °. Випробування механізму переміщення поршня показали, що абсолютна похибка позиціонування поршня не перевищує один крок. Програмний блок первинної обробки даних включає процедуру динамічного згладжування відліків положень поршня. В результаті абсолютна похибка вимірювання різниці фаз в плечах інтерферометра, що визначається фазообертачем, не перевищує 0,01 °. Вимірювання показали, що паразитна зміна амплітуди в процесі переміщення поршня не перевищує 0,005 дБ в діапазоні регулювання фази.

Ще одними з джерел похибок є помітна паразитна зміна фази в процесі зміни загасання за допомогою р-і-п-атенюатора і температурний коефіцієнт зміни фази атенюатором, який по порядку величини дорівнює 1 °/°С. Ці похибки усуваються шляхом введення поправок до значень фази, орієнтуючись на вимірювання струму, що проходить через р-і-п-атенюатор і температури його корпусу. Результуюча абсолютна похибка вимірювання різниці фаз в комітках диференційної кювети не перевищує $\Delta\varphi = \pm 0,1^\circ$.

Відносну похибку вимірювання КСП в комітці диференціальної кювети можна оцінити таким чином. Будемо вважати, що комітки заповнені рідинами з КДП близькими до КДП дистильованої води. З розрахунків і вимірювань відомо [71, 119], що дійсна і уявна складові КСП на робочій частоті приблизно рівні $h'' = 8,8 \text{ dB/cm}$ і $h' = 630^0 / \text{cm}$. Таким чином, вимір малої різниці

загасань і малої різниці фаз в комірках проводиться з абсолютними похибками $\delta h'' = \pm\sqrt{2} \cdot 0,005 dB = 0,007 dB$ і $\delta h' = \pm\sqrt{2} \cdot 0,1^\circ = 0,14^\circ$. Вважаючи, що КПП в комірці з дистильованою водою відома абсолютно точно, отримуємо, що відносні похибки вимірювань дійсної і уявної частин КСП в комірці з досліджуваної рідиною, що має близьке значення КСП, дорівнюватимуть:

$$r_h'' = \frac{\delta h''}{h''} 100\% = 0,08\% \quad r_h' = \frac{\delta h'}{h'} 100\% = 0,02\% . \quad (4.5)$$

У конструкції хвилеводно-диференційного діелектрометра використаний ряд рішень, які дозволяють проводити вимірювання з заявленими похибками. Можна відзначити наступні:

- використовується високе співвідношення сигнал/шум і метод динамічного визначення мінімумів апаратних функцій з тим, щоб не збільшити абсолютні похибки вимірювань, які задаються атенуатором і фазообертачем;

- забезпечена довготривала відносна стабільність частоти джерела сигналу в умовах експлуатації не гірше, ніж 10^{-6} за рік, що необхідно для прецизійного вимірювання різниці фаз в плечах інтерферометра обраним методом;

- конструкція диференційної кювети і контроль температури рідин під час вимірювань забезпечують можливість досягнення температурного балансу рідин в комірках з точністю $0,1^\circ C$ під час циклу вимірювання. Необхідність такого балансу температур диктується сильною залежністю КСП від температури рідин. Можна показати, що температурні коефіцієнти дійсної і уявної частин КСП в комірці з дистильованою водою на робочій частоті дорівнюють

$$\frac{\partial h'}{\partial T} = -0,33 \frac{grad / cm}{^\circ C} \quad \text{і} \quad \frac{\partial h''}{\partial T} = -0,043 \frac{dB / cm}{^\circ C} .$$

КДП досліджуваної рідини знаходиться з рішення дисперсійного рівняння по вимірній КСП ($h_t'' = h_r'' + \Delta h''$ і $h_t' = h_r' + \Delta h'$). Оцінку відносної похибки

вимірювання дійсної та уявної частин КДП по відомим абсолютним похибкам вимірювання дійсної та уявної частин КСП $\delta h''$ і $\delta h'$ можна отримати з формул

$$\frac{\delta \varepsilon'_i}{\varepsilon'_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln(\varepsilon'_i)}{\partial h'} \delta h'\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln(\varepsilon'_i)}{\partial h''} \delta h''\right)^2}, \quad \frac{\delta \varepsilon''_i}{\varepsilon''_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln(\varepsilon''_i)}{\partial h'} \delta h'\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln(\varepsilon''_i)}{\partial h''} \delta h''\right)^2}. \quad (4.6)$$

Цінність диференційних вимірювань полягає в тому, що 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. Природно, що похибка вимірювання відхилень КДП буде зменшуватися в міру збільшення відмінності КДП досліджуваних рідин від КДП дистильованої води. Оцінка цієї похибки може бути отримана з формули

$$r_{\Delta \varepsilon} = \frac{\delta(\Delta \varepsilon)}{\Delta \varepsilon} = \frac{r_{\varepsilon} \cdot \varepsilon}{\Delta \varepsilon}. \quad (4.7)$$

Був проведений детальний аналіз джерел і величин випадкових і систематичних похибок вимірювань коефіцієнта загасання і фазової сталої $\delta h'$ і $\delta h''$ в розробленому діелектрометрі. Випадкові похибки визначають, так звану, диференційну чутливість приладу - здатність розрізняти мінімально можливі різниці фазової сталої або коефіцієнта загасання двох рідин з близькими КДП. Систематичні похибки, в кінцевому підсумку, визначають похибку абсолютних вимірювань КДП розчину.

У розробленому діелектрометрі здійснено ряд схемотехнічних і конструктивних рішень з метою зниження випадкових похибок вимірювань. Такими є: 1) реалізація досить високої потужності генератора сигналу (близько 100 мВт); 2) вибір високої частоти модуляції (100 кГц) де рівень флікерних шумів НВЧ детектора нижче рівня теплового шуму; 3) використання

синхронного детектування на частоті модуляції і 16-ти розрядного АЦП на виході аналогової частини приймача; 4) використання малoshумлячого регулятора струму р-і-п атенюатора, а також малoshумлячого інструментального підсилювача і 16-ти розрядного АЦП для вимірювання падіння напруги на прецизійному резисторі; 5) реалізація безлюфтового механізму переміщення короткозамикаючого поршня з дискретом 2,5 мкм, що відповідає дискретній зміні фази $0,144^\circ$. Зниженню випадкових похибок вимірювань сприяє також застосований в приладі динамічний метод визначення положень мінімуму апаратних функцій діелектрометра з попередньою НЧ фільтрацією даних вимірювань.

Перераховані заходи забезпечили середньоквадратичні випадкові похибки вимірювань загасань і зсувів фаз, що склали по порядку величини $\delta(\Delta L) \approx 0,01$ дБ і $\delta(\Delta\varphi) \approx 0,05^\circ$, відповідно. Наведені значення похибок були отримані експериментально шляхом послідовного повторення балансування моста з однією рідиною при незмінних умовах навколишнього середовища.

Іншим джерелом випадкових похибок є випадкові температурні градієнти рідин в комірках диференційної кювети. Виміряна середньоквадратична різниця температур в комірках за час повного циклу вимірювань не перевищує $0,1^\circ\text{C}$ після встановлення теплового балансу. Повний цикл вимірювань складається з балансування НВЧ моста з розчинником в обох комірках, заміни розчинника в одній з комірок на досліджуваний розчин, моніторингу встановлення теплового балансу в комірках і ще одного балансування моста. Час повного циклу вимірювань становить три хвилини.

З метою експериментальної оцінки диференційної чутливості приладу було виконано кілька серій вимірювань КДП для ряду розчинів з десятьма вимірами в кожній серії по повному циклу. 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 (ці вимірювання є непрямими) не вище 0,5%.

Похибка абсолютних вимірювань за допомогою розробленого приладу складається з середньоквадратичних випадкових похибок, розглянутих вище, і ряду систематичних похибок.

Були проаналізовані такі систематичні похибки вимірювань:

1) методична похибка, обумовлена невизначеністю ефективної довжини кювети. Ця похибка пов'язана з дифракційними ефектами при збудженні відкритої хвилеводної системи (кварцовий циліндр в рідині) з хвилеводу; 2) похибки абсолютного калібрування загасань атенюатора і зсуву фаз фазообертача; 3) похибки, викликані зміною температури навколишнього середовища і 4) похибки, обумовлені паразитною зміною фази (загасання) при регулюванні загасання (фази) в плечах моста. Ще одним джерелом методичних похибок, не пов'язаним безпосередньо з якістю вимірювань, є похибка, з якою відомі КДП кварцу і стандартної рідини, наприклад, дистильованої води. Ці величини входять як параметри в характеристичне рівняння розрахунку КДП.

Визначальний внесок у похибку абсолютних вимірювань дає похибка невизначеності ефективної довжини кювети, яка була оцінена шляхом чисельного моделювання. Отримано $(\delta h')_1 / h' \leq 1\%$ за фазовою сталою і $(\delta h'')_1 / h'' \leq 0,5\%$ за коефіцієнтом загасання у всьому діапазоні вимірювань КДП будь-яких виноматеріалів. Внесок цієї похибки при вимірах рідин, що відрізняються по КДП не більше ніж на п'ять одиниць, на порядок менше і, зокрема, не позначається на диференційній чутливості приладу

Підсумовуючи всі фактори систематичних похибок $(\delta h)_i, i = 1, 2, 3, 4$, були отримані наступні оцінки результуючих абсолютних похибок вимірювань для фазової сталої $(\delta h')_{\Sigma} \approx 6,2^0$ або 1,1% і для коефіцієнта загасання $(\delta h'')_{\Sigma} \approx 0,05dB$ або 0,6%.

4.6. Результати вимірювання КДП модельних рідин

На графіках (рис. 4.16) представлені результати вимірювань різниці між КДП води і КДП водних розчинів глюкози, гліцерину і етанолу на частоті 31,82 ГГц при температурі 25 °С. КДП дистильованої води при 25 °С на частоті 31,82 ГГц бралася рівною 25,24 для дійсної частини і 31,69 - для уявної частини. Концентрації речовин на графіках виражені в мольних відношеннях, тобто кількостях молекул розчиненої речовини на одну молекулу розчинника (води).

Довірчі інтервали вимірювань становили $\pm 0,007$ дБ / см для коефіцієнта загасання, $\pm 0,1$ град / см для фазової сталої і, як результат, не більше $\pm 0,5\%$ для КДП. Відносні похибки концентрацій приготованих водних розчинів речовин були вище, але не перевищували кількох десятих часток відсотка. У міру збільшення концентрації будь-якої з трьох речовин монотонно знижуються величини дійсної та уявної частини КДП води.

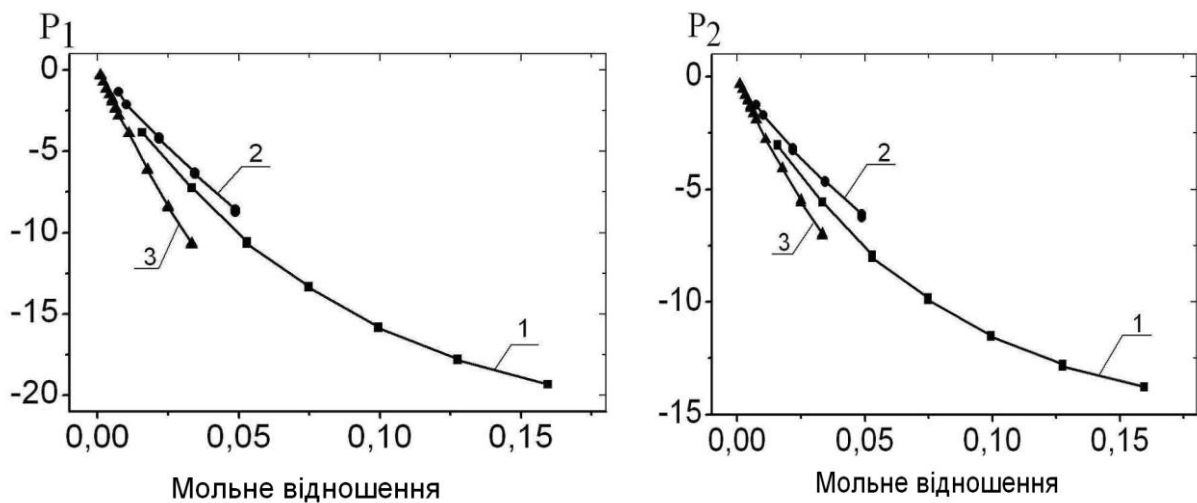


Рисунок 4.16 – Залежність різниці дійсних $P_1 = \varepsilon'_x - \varepsilon'_{water}$ і уявних $P_2 = \varepsilon''_x - \varepsilon''_{water}$ частин КДП води і водних розчинів етанолу (1), гліцерину (2) і глюкози (3) від концентрації

В області малих концентрацій зниження приблизно лінійно. Тому, при мольних відношеннях можна очікувати підсумовування вкладів різних

компонент в КДП вин і соків (гіпотеза адитивності). Мольне відношення суміші дорівнює сумі мольних відношень компонентів суміші:

$$r = \frac{m_1 / M_1 + m_2 / M_2 + m_3 / M_3}{m_4 / M_4} = r_1 + r_2 + r_3, \quad (4.8)$$

де m_i - маси компонентів в грамах, M_i - грам-молі компонент, індекси $i = 1, 2, 3, 4$ відносяться до етанолу, глюкози, гліцерину і води.

Припускаючи, що молекули кожного виду змінюють КДП води незалежно від присутності молекул інших речовин в розчині, отримаємо вираз для різниці КДП води і КДП потрійного розчину $\Delta\varepsilon$:

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\partial \Delta\varepsilon}{\partial r} \right)_1 r_1 + \left(\frac{\partial \Delta\varepsilon}{\partial r} \right)_2 r_2 + \left(\frac{\partial \Delta\varepsilon}{\partial r} \right)_3 r_3. \quad (4.9)$$

Були виконані вимірювання КДП сумішей етанолу, глюкози і гліцерину. Склад сумішей і результати вимірювань КДП представлені в табл. 4.1 в порядку зростання мольного відношення (4.8) суміші. Там же представлені результати розрахунків КДП сумішей по (4.9). Частинні похідні в (4.9) для компонент отримані з експерименту в області гранично малих концентрацій.

Таблиця 4.1

Склад і КДП розчинів потрійних сумішей

Масовий склад розчинів потрійних сумішей	Мольне відношення	КДП суміші виміряна		КДП суміші розрахована	
		ε'	ε''	ε'	ε''
Вода (розчинник)	0	25,24	31,69	25,24	31,69
Глюкоза 5г.+Гліцерин 5г.+Етанол 5мл +Вода 95г.	0,0316	20,05	24,63	19,06	23,95
Глюкоза 5г.+Гліцерин 5г.+Етанол 10мл +Вода 90г.	0,0506	17,83	21,58	15,25	19,28
Глюкоза 5г.+Гліцерин 5г.+Етанол 5мл +Вода 35г.	0,0857	14,90	17,11	8,15	10,25
Глюкоза 5г.+Гліцерин 5г.+Етанол 10мл +Вода 30г.	0,1517	11,83	12,53	-4,66	-5,46

Відхилення КДП сумішей (табл. 4.1) від лінійної залежності зростає в міру зростання мольного відношення молекул розчину, проте, для мольних відношень менших, ніж 0,05 гіпотеза адитивності приблизно виконується. До області $r < 0,05$ відносяться сухі, напівсухі і напівсолодкі вина. Для кріплених, десертних і лікерних вин адитивність вкладу хімічних компонентів в КДП вин досить добре виконується, якщо розчинником компонентів вважати водно-етанольний розчин з вмістом етанолу рівним вмісту етанолу в досліджуваному вини. Встановлений факт адитивності вкладу хімічних компонентів в КДП вин може виявитися корисним при розробці методик застосування діелектрометрії в виноробстві.

Залежності КДП розчинів різних сахарів (сахарози, фруктози і глюкози) в 10% об. розчині етилового спирту у воді від масової концентрації сахарів представлені на рис. 4.17. КДП таких сумішей в першому наближенні імітує КДП напівсолодких і напівсухих вин. Для порівняння на цих же рисунках показана залежність КДП розчину етанолу у воді від концентрації етанолу (об'ємні відсотки).

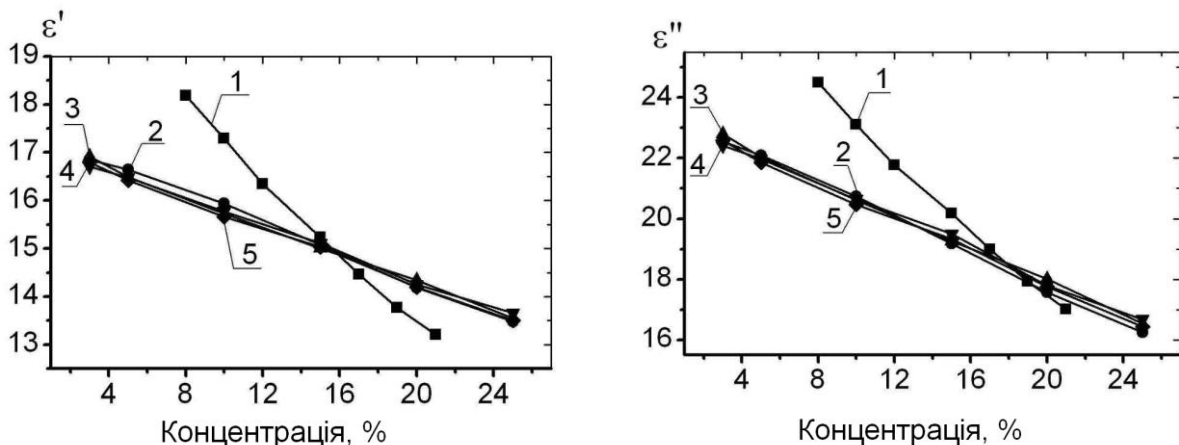


Рис. 4.17. – Залежності КДП розчинів сахарів в 10-ти відсотковому розчині етанолу у воді від масової концентрації сахарів. Номери кривих відповідають: 2 сахароза; 3 фруктоза; 4 глюкоза; 5 глюкоза і фруктоза в рівних кількостях. Крива 1 залежність КДП розчину етанолу у воді від концентрації етанолу

Видно, що КДП розчинів різних сахарів з однаковою масовою концентрацією мало відрізняються один від одного. Помітне відхилення даних вимірювань від гладких кривих на рис. 4.17, так само як і на наступних рис. 4.18 і рис. 4.19 пояснюється великою похибкою (порядку декількох відсотків) приготування розчинів із заданою концентрацією.

Вода, етанол, сахари (глюкоза, фруктоза і сахароза) і гліцерин є хімічними компонентами, які найбільшою мірою впливають на КДП вин і соків в 8-мм діапазоні. Приблизно такий же вплив на КДП вин і соків надає зміна концентрації катіонів (на рис. 4.18 наведена залежність для катіонів калію), проте їх абсолютна кількість у вині і соках невелика. Похідна КДП від концентрації катіонів позитивна на відміну від похідної КДП від концентрації етанолу, сахарів і гліцерину. Мабуть, саме вплив на КДП вин катіонів став причиною того, що методом кореляційного аналізу по діелектричній проникності можна було визначити регіон вирощування винограду, з якого вироблялися столові вина, при цьому всі контрольовані по стандартам параметри досліджених вин знаходилися в межах норми.

Були також виміряні залежності КДП розчинів яблучної, винної та лимонної кислот в 10% розчині етанолу у воді від масової концентрації кислот (рис. 4.18). Вплив зміни концентрації органічних кислот на КДП вин і соків в кілька разів менше і, до того ж, залежності мають не монотонний вигляд.

Представлені результати досліджень модельних рідин використані при розробці методик застосування діелектрометра 8-мм діапазону в виноробстві [120, 121]. Одне з можливих практичних застосувань діелектрометра на даний момент цілком обґрунтовано. Йдеться про виявлення факту наявності у вині або в суслі доданої води. Залежність КДП вина і сусла від об'ємної частки доданої води представлена на рис. 4.19 для винограду сорту «Рислінг». Метод демонструє високу чутливість, незважаючи на те, що вміст води в вихідному продукті становить 80-90%. Спостерігається досить гарний збіг з результатами, отриманими в [122]. Отримано також позитивні результати по виявленню води,

яка була додана в сусло або мезгу до ферментизації, з даних вимірювання КДП приготованих вин.

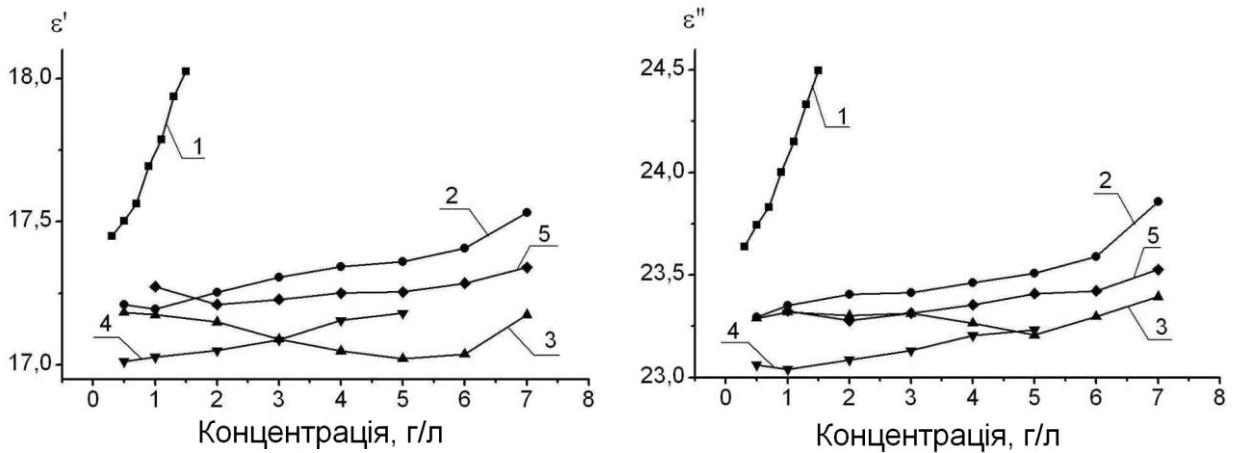


Рис. 4.18. – Залежності КДП розчинів органічних кислот в 10-ти відсотковому розчині етанолу у воді від масової концентрації (г/л) органічних кислот. Номери кривих відповідають: 2 яблучна кислота; 3 винна кислота; 4 лимонна кислота; 5 винна і яблучна кислота в рівних кількостях. Крива 1 залежність КДП розчину калію в 10-ти відсотковому розчині етанолу у воді від масової концентрації калію (г/л)

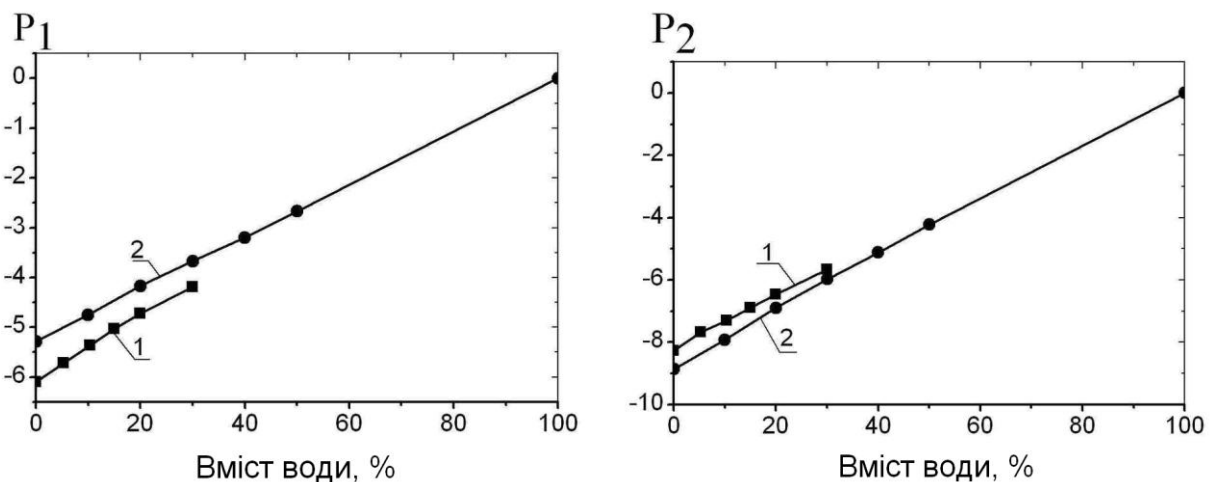


Рис. 4.19. – Залежність збільшення КДП і вина і сусла від концентрації (об'ємні частки) доданої води. $P_1 = \varepsilon'_x - \varepsilon'_{water}$, $P_2 = \varepsilon''_x - \varepsilon''_{water}$.

1 - вино Рислінг; 2 - сусло Рислінг

Схожі дослідження зміни стану води у винах і виноматеріалах методами НВЧ-діелектрометрії, наведені в [123], результати цих досліджень дозволяють використовувати КДП вин при оцінці їхніх властивостей та якості.

Диференційна чутливість методу діелектрометрії при визначенні кількості доданої води виявилася вищою, ніж для традиційно використовуваних хімічних методів. Диференційна чутливість приладу дозволяє розрізнити два вина (соку), вміст води в яких, відрізняється на десяті частки відсотка, в той час як для використовуваних в виноробстві хімічних методів, диференціальна чутливість становить величину порядку 5%. До того ж час проведення аналізу за допомогою діелектрометра у багато разів менше.

4.7. Висновки до розділу 4

На підставі проведеного теоретичного та експериментального вивчення процесів поширення електромагнітної хвилі в діелектричному стрижні, зануреному в сильно поглинаючу рідину, було показано, що за даними про поглинання хвилі при проходженні через такий циліндр і про зсув фази хвилі можна визначати значення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності цієї рідини. На базі такого способу вимірювання КДП був розроблений і виготовлений диференційний діелектрометр, що дозволяє надійно реєструвати досить малу відмінність між двома сильно поглинаючими рідинами.

Вимірювальна схема приладу являє собою НВЧ міст, в плечі якого включені дві комірки вимірювальної кювети, в одній з яких знаходиться досліджувана рідина, а в іншій - рідина з відомою КДП, щодо якої і відбувається вимір. Усунення дисбалансу, що виник після заміни в одній з комірок референсної рідини на випробувану, шляхом підстроювання загасання і зсуву фази дозволяє отримати дані для розрахунку компонент КДП. Процес вимірювання повністю автоматизований шляхом застосування мікропроцесорної техніки і займає не більше трьох хвилин.

Диференційна чутливість приладу склала 0,1% за коефіцієнтом загасання і 0,05% по фазовій сталій. Це відповідає диференційній чутливості по КДП кращій, ніж 0,5%, що, зокрема, дозволяє вирішувати задачу ідентифікації вин.

Показано, що за одержуваних даних про загасання і зсув фази можна визначити абсолютне значення КДП водного розчину з похибкою близько 1%, яка визначається, в першу чергу, похибкою, з якої відома КДП референсної рідини (в більшості випадків - дистильованої води).

Розроблений хвилеводно-диференційний діелектрометр може бути успішно застосований для ідентифікації сильно поглинаючих рідин шляхом порівняння їх з еталонною рідиною за такою ознакою, як КДП. Зокрема, він може знайти застосування в харчовій промисловості для ідентифікації напоїв і визначення фальсифікатів, а також в медичній промисловості для ідентифікації, визначення концентрації і складу водних розчинів біологічно активних речовин.

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 резонансного типу коливань на елементах зв'язку відкритих резонаторів з хвилеводами та нерезонансне випромінювання. Такі втрати знижують добротність резонатора, обмежуючи, тим самим, точність вимірювань електрофізичних параметрів речовин і середовищ.

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

3. На основі твердотілого підсилювача і квазіоптичного резонатора розроблений і виготовлений прототип АВС для вимірювання показника заломлення газового середовища, що заповнює квазіоптичний резонатор. В якості вимірювальної комірки використовувався відкритий резонатор з набором дзеркал діаметром 75 мм і радіусом кривизни 150 мм, в яких були виконані 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 $(1-2) \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, що дозволило застосувати такий резонатор для вимірювання флуктуацій показника заломлення повітря в умовах атмосфери яка оточує вимірювальну комірку.

6. Запропоновано рефрактометр на основі твердотілого 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 хвилеводному отворі 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 частоти.

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 вихідній 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 кислот. 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Н. Frohlich, “Theory of dielectrics, dielectric constants, and dielectric loss”, *Amen House, London; Oxford University Press*. 1958.
2. Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьёв и Б. М. Тареев, “Теория диэлектриков”, – Л., *Энергия*, 1965.
3. И. С. Рез и Ю. М. Поплавко, “Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике», — М.: *Радио и связь*, 1989. — 288 с.
4. А. В. Прокопов, “Методы учета влияния земной атмосферы в космической геодезии и навигации”, *Космічна наука і технологія*,– 2001.– Т.7.– №4.– с. 163–168.
5. G. Beutler, I. Bauersima and W. Gurtner, “Atmospheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations”, *Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements. Ed. F.K. Brunner. [Monograph 12], Kensington (Australia): School of Surveying. The University of New South Wales*.– 1988. – pp. 15–43.
6. E. H. Grant, R. J. Shepard and G. P. South, “Dielectric behaviour of biological molecules in solutions”, — *Oxford: Clarendon press*, 1978. — 238 p.
7. P. S. Krasov, K. A. Arkhypova and A. I. Fisun, “Measuring cuvette simulation of dielectrometer for permittivity investigation of high-loss substances”, *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2011, vol.2, No.3, pp. 205-208.
8. V. Bianco, G. P. Drago, M. Marchesi, C. Martini, G. S. Mela and S. Ridella, “Measurements of complex dielectric constant of human sera and erythrocytes”, *IEEE Trans. Instrum. Meas*, 28 (1979) pp. 290–295.
9. Т. Ю. Щеголева, “Исследование диэлектрических характеристик биообъектов в миллиметровом диапазоне радиоволн”, *Киев. Наукова думка*, -1996. -187с.

10. G. H. Markx and C. L. Davey, "The dielectric properties of biological cells at radiofrequencies: Applications in biotechnology", *Enzyme and Microbial Technology*, 25, pp. 161–171, 1999.
11. J. Z. Bao, C. C. Davis and M. L. Swicord, "Microwave dielectric measurements of erythrocyte suspensions", *Biophys. J.* 66 (1994) 2173–2180.
12. В. А. Руднев и П. В. Карножицкий, "Применение метода диэлектromетрии при экспертном исследовании нефтепродуктов", *Вісник Харківського національного університету*, 2009. №870. Хімія. Вип. 17(40), с. 172-177.
13. В. В. Мериакри и Е. Е. Чигряй, "Определение содержания спирта и сахара в водных растворах с помощью сантиметровых и миллиметровых волн", *Миллиметровые и субмиллиметровые волны*, т.9, №1, 2004, с.55-58.
14. K. Masaki, N. Atsuhiko, F. Kaori and M. Shunsuke, "Complex Permittivity Measurement at Millimetre-Wave Frequencies During Fermentation Process of Japanese Sake", *J. Phys. D: Appl. Phys.* –2007.-40.- pp. 54-60.
15. "Compendium of International Methods of Wine and Must Analysis", *O.I.V., Paris*, 2007. - V.1, 2
16. Б. М. Булгаков, В. Н. Скрасанов, А. И. Фисун и А. И. Шубный, "Энергетические характеристики генератора с квазиоптическим резонатором на диоде Ганна", *Электронная техника, Сер. Электроника СВЧ*, вып. 3, с. 13-19, 1984.
17. Б. М. Булгаков, В. Н. Скрасанов, А. И. Фисун и А. И. Шубный, "Селекция продольных типов колебаний открытого резонатора миллиметрового диапазона протяжёнными неоднородностями", *Радиотехника и электроника*, №5, с. 894-900, 1984.
18. Б. М. Булгаков, В. Н. Скрасанов, А. И. Фисун и А. И. Шубный, "Квазиоптический полупроводниковый генератор с радиально-волноводным возбуждением", *Приборы и техника эксперимента*, № 1, с. 114-116, 1987.

19. О. И. Белоус, Б. М. Булгаков, В. Н. Скрасанов, А. И. Фисун и А. И. Шубный, “Квазиоптический генератор Ганна с увеличенным диапазоном перестройки частоты”, *Приборы и техника эксперимента*, № 1, с. 125-127, 1988.
20. В. Н. Скрасанов и А. И. Шубный, “Два режима высокочастотной генерации диода Ганна в открытом резонаторе”, *Научное приборостроение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Сб. научн. трудов, Харьков, ИРЭ АН УССР*, с. 146-153, 1988.
21. А. И. Бородин, Б. М. Булгаков, М. П. Натаров, В. Н. Скрасанов, и А. И. Шубный, “Двухчастотный двухдиодный квазиоптический генератор миллиметрового диапазона”, *Изв. ВУЗов Радиоэлектроника*, № 3, с. 96-98, 1991.
22. В. Н. Скрасанов и А. И. Шубный, “Температурная нестабильность частоты квазиоптического генератора Ганна”, *Тезисы докл. XI Всесоюзн. конф. «Электроника СВЧ», т. 2, Твёрдотельная электроника СВЧ, Орджоникидзе*, с. 78, 1986.
23. “Исследование и синтез новых устройств квазиоптической и волноводной техники. Диэлектрометрия сильнопоглощающих сред”, *Отчет по НИР «БУКСИР-3». Книга 4. № госрегистрации 0106U011975*, Харьков, 2011.
24. В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. М. Скрасанов, Н. С. Скрасанова і О. І. Шубний, “Нові пристрої зв’язку високодобротних НДВЧ резонаторів з хвилеводами: теорія, проектування, експеримент”, *Пріоритети наукової співпраці ДФФД і БРФФД. Матеріали спільних конкурсних проєктів*, Київ, сс. 177-190, 2007.
25. В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. Н. Скрасанов, и А. И. Шубный, “Эффективность возбуждения квазиоптического открытого резонатора из волновода”, *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, Т. 52, № 3, с. 231-249, 2009.
26. В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. Н. Скрасанов и А. И. Шубный, “Радиационные потери сосредоточенных элементов связи открытых

- резонаторов”, *Радіофізика та електроніка*, –Харків: Ін-т радіофізики та електроніки НАН України, т. 2(16), №3, с. 12-25, 2011.
27. В. М. Bulgakov, М. Р. Natarov, V. N. Skresanov and A. I. Shubnyi, “Excitation of quasi-optical resonator with coupled parallel-plane waveguides on a mirror by Gunn-diode”, *Proc. of the 20-th Europ. Microwave Conf.*, Budapest, V1, pp. 745-749, 1990.
28. В. М. Bulgakov, М. Р. Natarov, V. N. Skresanov and A. I. Shubnyi, “Quasi-optical resonator system for near-millimeter waves solid-state oscillators”, *Proc. of the 3-rd Asia-Pacific Microwave Conf.*, Tokyo, pp. 973-976, 1990.
29. 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.
30. 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.
31. В. Н. Скресанов, 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.
32. М. Р. 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.

33. 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*, – 75, N(1), pp. 83-98, 2016.
34. 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.
35. 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", *Научно-технические технологии*, –М, №1, с. 60-72, 2013.
36. 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.
37. 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.
38. 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, 2017.
39. 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.
40. Л. А. Вайнштейн, "Открытые резонаторы и открытые волноводы", – М., *Советское радио*, 1966. - 475 с.

41. R. N. Clarke and C. B. Rosenberg, "Fabry-Perot and open resonators at microwave and millimetre wave frequencies, 2-300 GHz.", *J. Phys. E: Sci. Instrum.* – 1982. – 15. – pp. 9-24.
42. A. L. Cullen, "Millimeter-Wave Open-Resonator Techniques", *Infrared and Millimeter Waves. – Vol. 10. – Millimeter Components and Techniques. – Part II. – Academic Press, INC. / Ed. by K.J. Button.* – 1983. – pp. 233-281.
43. Р. К. Аймера, Д. Б. Бэечелор, Д. К. Модии и Г. Лашински, "Измерения на СВЧ с помощью активных систем", *ТИИЭР, №1*, 1974, с. 144-155.
44. В. В. Сафонов, "Мікрохвильові пристрої з активними резонаторами. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук", Харків – 2007.
45. А. А. Брандт, "Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах", – *М.: Физматгиз*, 1963, – 404 с.
46. S. V. Gatash, "Very high frequency dielectrometer for the study of dynamical properties in disperse water systems", *Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов. НАН Украины. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова, № 1*, 1999, с. 129 – 132.
47. M. Afsar and H. Ding, "A novel open - resonator system for precise measurement of permittivity and loss – tangent", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement.* – 2001. – V. 50, № 2. – pp. 402–405.
48. J. Krupka, D. Cros, M. Aubourg and P. Guillon, "Study of whispering gallery modes in anisotropic single - crystal dielectric resonators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1994. – V. 42, № 1. – pp. 56 - 61.
49. Ю. Ф. Филиппов, "Колебания шепчущей галереи в диэлектрическом полусферическом резонаторе на неидеально проводящей плоскости", *Радиофизика и электроника.* – 2007. – Т.12, № 1. – с. 156 – 162.
50. А. А. Лавринович, Ю. Ф. Филиппов и Н. Т. Черпак, "Спектральные свойства дискового квазиоптического диэлектрического резонатора с неоднородностью в виде капилляра с водой", *Радиофизика и электроника,* – 2004. – Т.9, № 3. – с. 496 - 502.

51. А. Я. Кириченко, А. Е. Когут, Ю. В. Блудов, “Влияние металлического зеркала на вынужденные колебания шепчущей галереи полусферического диэлектрического резонатора”, *Радиофизика и электроника*, – 2005. – Т.10, № 1. – с. 20 - 24.
52. А. Я. Кириченко, С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко и И. Г. Скуратовский, “Азимутальные колебания в составном дисковом диэлектрическом резонаторе”, *Радиофизика и электроника*, – 2006. – Т.11, № 3. – с. 339–343.
53. S. J. Rzoska and V. P. Zhelezny, “Nonlinear dielectric phenomena in complex liquids”, *Kluwer Academic Publisher. Netherlands*, 2004. – 392 p.
54. А. А. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. V. Prokopenko, Yu. F. Filipov, E. N. Shaforost and I.A. Shipilova, “Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electrodynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids”, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 2231–2238, 2007.
55. А. И. Губин. А. А. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhäusser, and S. A. Vitusevich, “Whispering-Gallery-Mode Resonator Technique With Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids”, *IEEE Trans. on MW Theory and Tech.* – 2015. – 63, N 6. – P. 2003-2009.
56. З. Е. Еременко и Е. М. Ганапольский, “Объемный полусферический резонатор для измерения диэлектрической проницаемости в малом объеме сильно поглощающей жидкости”, *Радиофизика и электроника*, – 2003. – Т. 8, № 2. – с. 187-196.
57. З. Е. Еременко, Е. М. Ганапольский, В. Н. Скресанов, В. В. Васильченко, В. Г. Гержилова, Т. А. Жилякова и Н. С. Аникина, “Цилиндрический резонатор с радиальной полостью для определения комплексной диэлектрической проницаемости столовых вин”, *Радиофизика и электроника*, т. 14, №2, 2009, с. 239-249.

58. В. П. Андросов, Э. И. Велиев и А. А. Вертий, “Поляризационные и спектральные характеристики открытых резонаторов с внутренними неоднородностями”, *Известия ВУЗов – Радиофизика*, 1982, т. 25, № 3, с. 318 – 328.
59. С. Н. Дудоров, Д. В. Любченко и А. В. Райсанен, “Измерение диэлектрической постоянной тонких плёнок на подложке при помощи открытого резонатора”, *Радиотехника и электроника*, 2005, т. 50, № 12, с. 1490-1496.
60. Juan Zhang, Guohui Li and Deming Xu, “Precise Measurement of Low Loss Dielectric Materials Using Quasi-optical cavity Technique”, *China-Japan Joint Microwave conference. Shanghai, China*, 10-12 Sept. 2008.
61. J. S. Martens, V. M. Hietala, D. S. Ginley, T. E. Zipperian and G. K. G. Hohenwarter, “Confokal resonator for measuring the surface resistance of high-temperature superconducting films”, *Appl. Phys. Lett.*, 58:2543, 1991.
62. J. S. Martens, S. M. Garrison and S. A. Sachtjen, “Surface resistance analysis: A new thin-film characterization tool”, *Solid State Technology*, Dec. 94:51, 1994.
63. P. F. Goldsmith, “Infrared and Millimeter Waves”, V6, K. J. Button, *Academic Press, New York*, 1992
64. T. E. Harrington, J. Wosik and S. A. Long, “Open resonator mode patterns for characterization of unisotropic HTS thin films and dielectrics”, *Proceedings of the Applied Superconductivity Conference, Pittsburgh*, 1996
65. Р. В. Антипенко, Е. А. Мачусский и Н. А. Першин, “Активный квазиоптический измеритель физических свойств материалов”, *Радиоэлектроника*, 2004. № 8, с. 79-80.
66. В. Н. Бинги, “Магнитобиология: эксперименты и модели”, М., «МИЛТА», 2002. – 592с.

67. W. J. Ellison, "Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure over the frequency range 0-25 THz and the temperature range 0-100 C", *J. Phys. Chem. Ref. Data.* – 2007. – V.36, N.1. – pp. 1-18.
68. T. Sato and R. Buchner, "Dielectric Relaxation Processes in Ethanol/Water Mixtures", *J. Phys. Chem.* – 2004. – A, 108, No. 23. – pp. 5007-5015.
69. H. A. Buckmaster, C. H. Hansen and H. Zaghoul, "Complex Permittivity Instrumentation for High-Loss Liquids at Microwave Frequencies", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1985, Vol. 33. №9, pp. 822-824.
70. X. Hu, H. A. Buckmaster and O. Baralás, "The 9.355 GHz complex permittivity of light and heavy water from 1 to 90°C using an improved high-precision instrumentation system", *J. of Chemical and Engineering Data.* – 1994. – Vol. 39, No.4. – pp. 625-638.
71. R. C. Jain and W. A. Voss G, "Dielectric measurement methods for industrial, scientific and medical applications in the microwave frequency range", *IETE Technical Rev.*, Sept & Dec. 1994. Vol. 11. №5 & 6. pp. 297–311.
72. R. Van Loon and R. Finsy, "Measurement of complex permittivity of liquids at frequencies from 60 to 150GHz", *Rev. Sci. Instrum.*, 1974. Vol. 45. №4, pp. 523–525. 1974.
73. P. S. Krasov and E. A. Arkhipova, "Instrument for measuring the complex permittivity of biological objects", *Telecommunications and Radio Engineering*, -2009. -№8. -pp. 727-733.
74. Е. А. Архипова, П. С. Красов и А. И. Фисун, "КВЧ диэлектromетрия сильно поглощающих сред. Источники излучения, область взаимодействия", *Журнал нано- та електронної фізики*, -2010. -№1.
75. Е. А. Архипова, П. С. Красов и А. И. Фисун, "Применение модифицированного волноводного сенсора для изучения диэлектрических характеристик эритроцитов пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией до и после лечения", *Біофізичний вісник*, 2011. – вип. 27 (2). – с. 93-102.

76. N. I. Slipchenko, A. Yu. Panchenko and A. N. Borodkina, "Improvement of the Analytical Model of a Quarter-Wave Resonator Sensor for Cardiovascular Scanning", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 74 (4) 2015 pp. 345-354.
77. M. Afsar, N. Suwanvisan, Y. Wang, "Permittivity measurement of low and high loss liquids in the frequency range of 8 to 40 GHz using waveguide transmission line technique", *Microwave and Optical Technology Letters*. 2005. Vol. 48. №2, pp. 275–281.
78. M. Asfar and Y. Wang, "Measurement of complex permittivity of liquids using waveguide techniques", *Progress in electromagnetics research*, PIER 42, 2003, pp. 131-142.
79. K. Fuchs and U. Kaatze, "Dielectric spectra of mono- and disaccharide aqueous solutions", *J. Chem. Phys.* 2002. Vol. 116, N 16, pp. 7137–7144.
80. S. I. Alekseev and M. C. Ziskin, "Reflection and absorption of millimetre waves by thin absorbing films", *Bioelectromagnetics*, 2001, Vol. 21, pp. 264–271.
81. J. M. Alison and R. J. Sheppard, "A precision waveguide system for the measurement of complex permittivity of lossy liquids and solid tissues in the frequency range 29 GHz to 90 GHz-Part III", *Meas. Sci. Technol.* 2001. Vol. 2, pp. 975–979.
82. J. M. Alison and R. J. Sheppard, "Dielectric properties of human blood at microwave frequencies", *J. Phys. Med. Biol.* 1993, Vol. 38, pp. 971–978.
83. H. Bassen, "Ieee recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz-300 GHz (ieee std c95.3-2002)", *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, New York, 2003.
84. C.-K. Chou, "Ieee standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz (ieee std c95.1-2005)", *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, New York, 2006.

85. L. Zanforlin, "Permittivity Measurements of Lossy Liquids at Millimeter-Wave Frequencies", *IEEE Trans. MTT*, 1983. Vol. 83. №5. pp. 417–419.
86. А. А. Ашеко, В. Г. Гордиенко, А. К. Стрельцина и Е. А. Шарков, "Диэлектрические свойства водных электролитных систем. III. Частота 35,5 ГГц", *Вестник ХНУ*, 2000. Т. 496, сер. физич. "Ядра, частицы, поля", вып. 4/12.
87. В. А. Кашпур и В. Я. Малеев, "Дифференциальный метод измерения в миллиметровом диапазоне длин волн диэлектрической проницаемости растворов с большими потерями", *Приборы и техника эксперимента*, - 1972. - №3. - с. 140-142.
88. В. А. Кашпур, В. Я. Малеев и О. В. Хорунжая, "Применение метода дифференциальной КВЧ диэлектromетрии в молекулярной биофизике", *Радиофизика и электроника*, -2008. -т. 13, спец. вып.. -с. 446-454.
89. E. H. Grant and R. Shack, "Complex permittivity measurements at 8.6 mm wavelength over the temperature range 1-60°C", *Br. J. Appl. Phys.* – 1967. – 18, no. 12. – pp. 1807-1814.
90. В. В. Мериакри и М. П. Пархоменко, "Применение диэлектрического волновода для контроля содержания воды в спирте", *Электромагнитные волны и системы*, 2000. Т. 5, №1, с. 32-40.
91. А. Я. Кириченко, Н. С. Аникина, В. Г. Гержикова, К. В. Голубничая, А. О. Горобченко, Т. А. Жилиякова и О. Т. Николов, "Изучение диэлектрической проницаемости многокомпонентных растворов на двух частотах", *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2010, № 4, т.15, с. 46-50.
92. 20-40GHz Medium power amplifier CHA3093c. (Datasheet)
93. Г. Л. Маттей, Л. Янг и Е. М. Т. Джонс, "Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, Т. 1", - М.: Связь, 1971. - 440 с.
94. "Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника", Под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – М.: Радио и связь. 1984. – 296 с.

95. “Распространение ультракоротких радиоволн”, Перевод с англ. под ред. Б.А. Шиллерова, *М: Сов. радио*, 1954, 710 с.
96. Л. А. Ванштейн, “Открытые резонаторы и волноводы”, *М: Сов. радио*, 1966 – 475 с.
97. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, “Электродинамика сплошных сред”, *М: Наука*, 1982, – 620 с.
98. Б. С. Черний, М. Е. Ильченко и Ю. П. Матусов, “Теория термокомпенсированных составных диэлектрических СВЧ резонаторов”, *Радиотехника и электроника*, – 1979. – Т. 24, №2. – с. 242 – 247.
99. А. А. Кураев, Т. Л. Попкова и А. К. Сеницын, “Электродинамика и распространение радиоволн», – *Севастополь : Изд-во Вебер*, 2008. – 331 с. – ISBN 978-966-335-173-5.
100. “ГОСТ 8.524-85. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения”, – Введ. 01.07.86. – *М: Издательство стандартов*, 1985. – 34 с.
101. Д. П. Царапкин, “Генераторы СВЧ на диодах Ганна”, – *М: Радио и связь*, 1982. – 112 с.
102. “Создание полупроводниковых генераторов миллиметрового диапазона квазиоптического типа”, *Отчёт по теме «Резонатор» №ГР 81.093.674, рук. Б. М. Булгаков*, Харьков, 1985
103. D. M. Smith, “Relative Humidity Effects in Microwave Resonators”, *IEEE Trans.* – 1967. - Vol. MTT-15, No.8. - pp. 480-482.
104. Б. М. Булгаков, В. Н. Скресанов и А. И. Фисун, “Исследование открытых резонаторов с прямоугольными неоднородностями на зеркале”, *Известия ВУЗов, Радиофизика*, 1983, Т. 26, №4. с. 447-454.
105. Б. М. Булгаков, М. П. Натаров и В. Н. Скресанов, “Метод измерения эффективности возбуждения и вывода энергии в открытых резонаторах”, *Приборы и техника эксперимента*, 1988. - №4, с. 118-120.

106. W. H. Haydl, "Harmonic Operation of GaAs Millimetre Wave Transferred Electron Oscillators", - *Electron. Lett.*, 1981, v.17, No22, pp.825-826.
107. M. I. Lazarus, F. R. Pantosa, S. Norak and M. G. Somekh, "Wideband Tunable mm-Wave Gunn Oscillator Design", - *Electron. Lett.*, 1981, v.17, No20, pp.739-741.
108. Л. Г. Гассанов, Л. С. Назаренко, А. И. Ковальчук, В. Т. Цыкалов и Б. С. Черний, "Экспериментальные исследования генераторов на диодах Ганна миллиметрового диапазона длин волн", - *Электронная техника. Электроника СВЧ*, 1979, №3, с. 20-25.
109. А. С. Косов и В. Г. Еленский, "Генераторы гармоник миллиметрового диапазона на основе диодов Ганна", - *Зарубежная радиоэлектроника*, 1987, №2, с. 54-65.
110. Н. А. Васильев, В. С. Лукаш, В. В. Муравьев и В. И. Шалатонин, "Состояние и основные проблемы разработки генераторов миллиметрового диапазона на диодах Ганна (Обзор)", - *Изв. вузов. Радиоэлектроника*, 1985, т. 28, Р 10, с. 42-50.
111. О. Н. Литвиненко, "Основы радиооптики", - *Киев: Техніка*, 1974. - 208 с.
112. C. L. Holloway, D. I. Hill, R. A. Dalke and G. A. Hufford, "Radio Wave Propagation Characteristics in Lossy Circular Waveguides Such as Tunnels, Mine Shafts, and Boreholes", *IEEE Trans. On Antennas and Propagations*. - 2000. - Vol. 48, no.9. - pp. 1354-1366.
113. З. Е. Еременко, "Электромагнитные СВЧ колебания в структурах с регулярными и случайными неоднородностями", Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Харьков - 2011.
114. В. Н. Скресанов, Е. М. Ганапольский и З. Е. Ерёмченко, "Дифференциальный диэлектрометр для определения комплексной диэлектрической проницаемости сильно поглощающих жидкостей",

- Тезисы докл. 18-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекомм. Технологии», – Севастополь, Крым. – 2008. – с. 751-752.*
115. Z. Eremenko and V. Skresanov, “High loss liquids permittivity measurement using millimeter wave differential dielectrometer”, *Proc. 40th European Microwave Conference*, [28-30 September 2010. – Paris, France.] – pp. 1532-1535.
116. E. M. Ganapolskii, Z. E. Eremenko and V. N. Skresanov, “Millimeter wave dielectrometer for high loss liquids based on Zenneck wave”, *Measurement Science and Technology*, – 2009. – V. 20. – 055701. – pp. 1-8.
117. Э. Л. Гинзтон, “Измерения на сантиметровых волнах”, – М. Иностран. Литература, 1960., 620 с.
118. H. Kienitz and K. N. Marsh, “Recommended reference materials for realization of physicochemical properties section – permittivity”, *Pure Appl. Chem.* 53 (1981), pp. 1847–1862.
119. U. Kaatze, “Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature”, *J. Chem. Eng. Data* 34 (1989), pp. 371–374.
120. З. Е. Еременко, В. Н. Скресанов, В. Г. Гержилова, Т. А. Жилиякова и Н. С. Аникина, “Корреляция комплексной диэлектрической проницаемости и физико-химических параметров столовых вин”, *Тезисы докл. 19-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекомм. Технологии», Севастополь, Крым, 2009, с. 843-844.*
121. Н. С. Анікіна, В. Г. Гержилова, Т. А. Жилиякова, З. Е. Еременко та В.М.Скресанов, “Застосування діелектрометрії міліметрового діапазону для визначення автентичності виноградних соків і столових вин”, *ВиноГрад*, 2010 №1-2, с. 45-47.
122. Т. А. Жилиякова, И. Ф. Ткачев, О. А. Горобченко, О. Т. Николов и С. В. Гаташ, “Диэлектрические характеристики белых столовых и крепких вин”, *Виноделие и виноградарство*, №1, 2005, с. 30-32.

123. Т. А. Жиякова, О. А. Горобченко, О. Т. Николов, Г. В. Голубничая, “СВЧ-диэлектрометрия биотехнологических жидкостей”, – Киев: Наукова думка, 2015. 110 с.

ДОДАТОК А

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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”, *Радиофізика та електроніка, –Харків: Ін-т радіофізики та електроніки НАН України*, 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*, –М, №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*, – 75, N(1), pp. 83-98, 2016.

ДОДАТОК Б

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. 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.
2. 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.
3. В. Н. Скресанов, 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. 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.

ДОДАТОК В

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

- 1 Б. М. Булгаков, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, В. И. Ткаченко и А. И. Шубный, «Генератор», *А.с. № 1568206, Б.И. № 20*, 1990
- 2 А. И. Бородин, Б. М. Булгаков, В. Н. Макаров, М. П. Натаров и А. И. Шубный, «Полупроводниковый генератор», *А.с. №1658370 Б.И. №23*, 1991
- 3 Б. М. Булгаков, А. П. Кусайкин, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, и А. И. Шубный, «Генератор», *А.с. № 1774460, Б.И. № 41*, 1992
- 4 Б. М. Булгаков, В. В. Гламаздин, В. А. Карпович, М. П. Натаров, О. Г. Нечаев, В. М. Родіонова, В. М. Скресанов і О. І. Шубний, «Квазіоптичний суматор потужностей», *Патент на винахід №84164 Бюл. №18*, 25.09.2008
- 5 В. М. Скресанов, О. А. Баранник, В. В. Гламаздин, В. А. Золотарьов, М. П. Натаров, М. Т. Черпак, О. І. Шубний та ін., «Смуго-пропускальний фільтр», *Патент на винахід №109490. Бюл. №16*, 25.08.2015
- 6 В. М. Скресанов, О. А. Баранник, В. В. Гламаздин, М. Т. Черпак, О. І. Шубний та ін., «Вимірювальний резонатор з хвилями шепочучої галереї», *Патент на винахід №110214. Бюл. №23*, 10.12.2015