

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

ВАРАВІН АНТОН ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.317.7:621.391

ФАЗОВА СИНХРОНІЗАЦІЯ ЧАСТОТИ ТВЕРДОТІЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ СИГНАЛІВ  
В КОРОТКОХВИЛЬОВІЙ ЧАСТИНІ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ  
РАДІОХВИЛЬ

01.04.03 – радіофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертація на правах рукопису

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

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Єрмак Геннадій Павлович,**  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
НАН України, м. Харків,  
старший науковий співробітник відділу теорії дифракції  
і дифракційної електроніки

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Маслов Вячеслав Олександрович,**  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
МОН України  
завідувач кафедри квантової радіофізики

кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Мищенко Валерій Васильович,**  
Радіоастрономічний Інститут НАН України, м. Харків,  
старший науковий співробітник відділу міліметрової  
радіоастрономії

Захист відбудеться «5» грудня 2019 р. о 15 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

Автореферат розісланий «23» жовтня 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

**Актуальність теми.** Радіофізичні дослідження у радіоспектроскопії, діелектрометрії, фізиці плазми, вимірюванні характеристик НВЧ-пристроїв та інших галузях науки і техніки вказують на необхідність створення джерел сигналів із низькими рівнями фазових шумів і високою стабільністю частоти для створення вимірювальних систем високої роздільної здатності міліметрового та терагерцового діапазонів довжин хвиль із метою підвищення інформативності та якості фізичних експериментів.

Аналіз вимог, що висуваються до сучасних вимірювальних систем із високою роздільною здатністю, показав, що подальше поліпшення їх чутливості та роздільної здатності може бути реалізовано тільки із застосуванням фазової синхронізації частоти джерел сигналів і методів цифрового синтезу сигналів.

Одним із перспективних типів джерел сигналів у короткохвильовій частині міліметрового та терагерцового діапазонів слід вважати джерела, що побудовані на основі помножувальних ланцюжків, які містять стабілізовані твердотільні мікрохвильові генератори з низьким рівнем фазових шумів і активні лавинно-пролітні діодні (ЛПД) – помножувачі частоти високої кратності множення. Однак проблеми, що пов'язані з фазовою синхронізацією частоти джерел сигналів на ЛПД-помножувачах частоти, ще недостатньо вивчені і вимагають розробки нових методів синхронізації частоти і дослідження характеристик радіофізичних вимірювальних систем, побудованих на основі таких надвисокочастотних (НВЧ) джерел.

Одним із важливих напрямків застосування радіофізичних методів досліджень є мікрохвильова інтерферометрія, що призначена для вимірювання електронної щільності високотемпературної плазми. У зв'язку зі зростанням вимог, які висувають до інтерферометрів у сучасних термоядерних установках, зокрема, необхідності використання сигналів інтерферометрів у системах управління параметрами плазми, актуальним завданням є розробка НВЧ методів вимірювання щільності плазми у реальному масштабі часу.

Таким чином, дисертація, яка присвячена розробці та дослідженню методів фазової синхронізації частоти твердотільних джерел сигналів на основі ЛПД-помножувачів частоти і методу однозначного вимірювання фази для НВЧ інтерферометрії високотемпературної плазми у режимі реального часу, знаходиться у руслі загальних тенденцій розвитку радіофізичних методів досліджень, що спрямовані на створення систем із високою роздільною здатністю у міліметровому та терагерцовому діапазонах, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є узагальненням результатів досліджень, які проводилися у відділі теорії дифракції і дифракційної електроніки (2007-2017 рр.) ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України у рамках держбюджетних тем: «Електродинаміка відкритих резонансних систем та періодичних структур із композитними матеріалами; розробка когерентних джерел і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (номер держреєстрації 0107U001082, 2007-2011 рр.); «Розробка нових моделей і методів вивчення тонкої структури електромагнітних полів у діапазонах частот від одиниць мегагерц до десятків гігагерц у природних неоднорідних, анізотропних середовищах та поблизу поверхонь їх розподілу для задач

дистанційного зондування і радіолокації» (номер держреєстрації 0111U010476, 2012-2014 рр.); «Електродинаміка відкритих резонансних систем, періодичних структур із композитними матеріалами та антенних систем; прямі та зворотні задачі; розробка когерентних джерел, елементної бази і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (номер держреєстрації 0111U010480, 2012-2016 рр.); «Дослідження властивостей природних середовищ, їх поверхонь розподілу та структурних неоднорідностей методами дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «Сенсорика», номер держреєстрації 0115U002003, 2017 р.). Автор є одним із виконавців наведених тем.

**Мета і задачі дослідження. Метою дослідження** є розробка методу фазової синхронізації частоти ЛПД – помножувачів та методу однозначного вимірювання фази у режимі реального часу для підвищення інформативності та якості фізичних експериментів у процесі вирішення задач радіоспектроскопії, інтерферометрії високотемпературної плазми та дослідження електродинамічних характеристик НВЧ-пристроїв.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні **завдання**:

1. Провести аналіз сучасного стану методів синхронізації частоти джерел сигналів у вимірювальних системах із високою роздільною здатністю стосовно завдань інтерферометрії високотемпературної плазми, радіоспектроскопії та векторних вимірювань у міліметровому та терагерцовому діапазонах. Узагальнити дані та накопичений досвід попередніх досліджень для вибору найбільш адекватних методів, щоб взяти їх за основу для досягнення поставленої мети роботи.

2. Розробити методику фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у векторному аналізаторі (ВА) двоміліметрового діапазону та провести дослідження амплітудних і фазових характеристик високодобротних відкритих резонаторів (ВР) міліметрового діапазону.

3. Реалізувати методику фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у цифровому синтезаторі частоти міліметрового діапазону для підвищення точності вимірювання спектрів поглинання магнітних зразків у квазіоптичному ЕПР-спектрометрі. Провести вимірювання спектрів електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) зразків із відомими магніторезонансними властивостями.

4. Розробити методику фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у джерелі опромінення матриці контактів Джозефсона для підвищення точності та стабільності Державного еталона одиниці електрорушійної сили (ЕРС) і напруги. Провести дослідження рівня нестабільності вихідної частоти розробленого джерела міліметрового діапазону з використанням результатів вимірювань величини похибки еталона.

5. Розробити метод однозначного вимірювання фази й алгоритми лінеаризації характеристик фазових детекторів (ФД) у двочастотному гетеродинному інтерферометрі з фазовою синхронізацією частоти ЛПД-помножувачів міліметрового діапазону. Провести вимірювання лінійної інтегральної концентрації електронів високотемпературної плазми на термоядерній установці токамак «COMPASS-D».

6. Розробити схемне рішення та провести моделювання роботи інтерферометра з однозначним вимірюванням фази в установці токамак «COMPASS-U» у терагерцовому діапазоні.

**Об'єкт дослідження** – процеси фазової синхронізації частоти твердотільних джерел НВЧ випромінювання.

**Предмет дослідження** – фазо-синхронізовані лавинно-пролітні діодні помножувачі частоти у складі вимірювальних систем із високою роздільною здатністю міліметрового діапазону довжин хвиль.

**Методи досліджень** – у роботі використовуються експериментальні методи досліджень застосування фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у розроблених векторному аналізаторі, спектрометрі й інтерферометрі міліметрового діапазону та застосуванні цифрових методів фазового детектування й алгоритмів обробки сигналів інтерферометрів під час дистанційного зондування високотемпературної плазми у режимі реального часу.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Створено методику фазової синхронізації частоти активних ЛПД-помножувачів високої кратності у гетеродинному векторному аналізаторі двоміліметрового діапазону, що забезпечує похибку вимірювання фази  $0,1^\circ$ , динамічний діапазон 80 дБ і частотну роздільну здатність  $\sim 100$  Гц.

2. Розроблено методику фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у цифровому синтезаторі частоти як НВЧ джерела ЕПР-спектрометра міліметрового діапазону, що забезпечує відносну нестабільність частоти синтезатора до  $2 \times 10^{-10}$  і мінімальний крок перебудови частоти 10 Гц.

3. Запропоновано та практично реалізовано методику фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів джерела опромінення матриці контактів Джозефсона у Державному еталоні одиниці ЕРС і напруги, яка дозволила підвищити точність еталона на три порядки.

4. Вперше запропоновано метод однозначного вимірювання фази у двочастотних гетеродинних інтерферометрах міліметрового та терагерцового діапазонів довжин хвиль, що дозволяє вимірювати великі фазові набіги та контролювати щільність високотемпературної плазми у реальному масштабі часу.

5. Запропоновано та апробовано методику лінеаризації фазової характеристики та алгоритми калібрування фазометрів інтерферометра, що засновані на застосуванні вагових функцій і сумарно-різницевого аналізу, які дозволяють знизити нелінійність фазової характеристики фазометрів до значення менше 1 градуса у діапазоні  $0-360^\circ$ .

6. Запропоновано схемне рішення та проведено моделювання роботи інтерферометра для однозначного вимірювання фази у реальному масштабі часу в установці токамак «COMPASS-U» у терагерцовому діапазоні.

#### **Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Створений цифровий синтезатор частоти використовується як джерело сигналів для опромінення матриці контактів Джозефсона в Українському державному еталоні одиниці ЕРС і напруги у ННЦ «Інститут метрології», м. Харків.

2. Створений гетеродинний інтерферометр двоміліметрового діапазону з однозначним вимірюванням фази використовується в Інституті фізики плазми Чеської академії наук для вимірювання лінійної інтегральної концентрації електронів високотемпературної плазми у режимі реального часу на токамаці «COMPASS-D».

3. Запропоновану методику фазової синхронізації частоти активних ЛПД-помножувачів може бути використано під час розробки когерентних приймально-передавальних пристроїв для застосування у спектроскопії та радіолокаторах високої роздільної здатності міліметрового діапазону.

4. Запропонований метод однозначного вимірювання фази може бути використано у радіохвильових методах неруйнівного контролю характеристик матеріалів і речовин у режимі реального часу.

5. Розроблені методики лінеаризації характеристик цифрових фазових детекторів на програмованих логічних матрицях можуть бути використані у радіолокаційних фазометричних системах і для діагностики плазми.

**Особистий внесок здобувача.** Дослідження проводилися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України протягом декількох років особисто здобувачем і у співавторстві. Особистий внесок дисертанта полягає у наступному:

у розробці методики фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів [1, 2]; у створенні та експериментальних дослідженнях гетеродинного векторного аналізатора [3, 4, 11, 12, 16]; у розробці синтезатора частоти для квазіоптичного ЕПР-спектрометра міліметрового діапазону та у експериментальних дослідженнях ЕПР спектрів магнетиків [5, 10, 13–15]; у дослідженнях з реалізації методу однозначного вимірювання фази у двочастотному інтерферометрі міліметрового діапазону та розробці алгоритмів роботи та лінеаризації фазових характеристик фазових детекторів для «однозначного» вимірювання фази [7, 8, 17–20]; у розробці однозначного інтерферометра з фазовою синхронізацією частоти передавальних і приймальних пристроїв і експериментальних дослідженнях інтерферометра у процесі вимірювання щільності плазми [21, 22]; у розробці однозначного інтерферометра терагерцового діапазону [9, 22].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні наукові результати доповідалися на кваліфікаційному семінарі Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України з проблеми «Теорія дифракції і дифракційна електроніка» та на наступних наукових конференціях: International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo-2017); IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017); XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2017); 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW-2016, MSMW-2013).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи відображено у 22 роботах, з них: 10 статей у наукових міжнародних та українських фахових журналах, 12 тез доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, 2 додатків, її повний обсяг становить 165 сторінок. У дисертації наведено 47 рисунків, 3 таблиці, список використаних джерел, що складається зі 106 найменувань на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено: об'єкт, предмет і методи досліджень; взаємозв'язок проведених досліджень із науковими програмами, планами та темами; наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача; наведені дані про апробацію та публікацію результатів дисертаційної роботи.

У **розділі 1** виконано огляд літератури, присвяченої описам методів фазової синхронізації частоти електронно-вакуумних і твердотільних генераторів та результатам їх застосування у векторних аналізаторах, спектрометрах та інтерферометрах міліметрового та субміліметрового діапазонів довжини хвиль.

Сформульовано задачі, які необхідно вирішити для створення джерел сигналів для вимірювальних систем високої роздільної здатності та розробки методів побудови інтерферометрів міліметрового та терагерцового діапазонів довжин хвиль, що працюють у режимі реального часу.

У **розділі 2** запропоновано та досліджено методика фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів високої кратності множення (виробництва ДП НДІ «Оріон», м. Київ) у гетеродинному ВА двоміліметрового діапазону.

Для реалізації методики були розроблені та досліджені: схема ВА з використанням двох твердотільних джерел сигналів з електронним перестроюванням частоти на основі ЛПД-помножувачів, приймальні пристрої, система фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) для синхронізації частот помножувальних джерел, векторний приймач, цифрова система збору даних і управління перебудовою частоти (СУПЧ), а також програма управління й обробки даних вимірювань на ПК [1, 2]. Структурну схему ВА наведено на рис. 1.

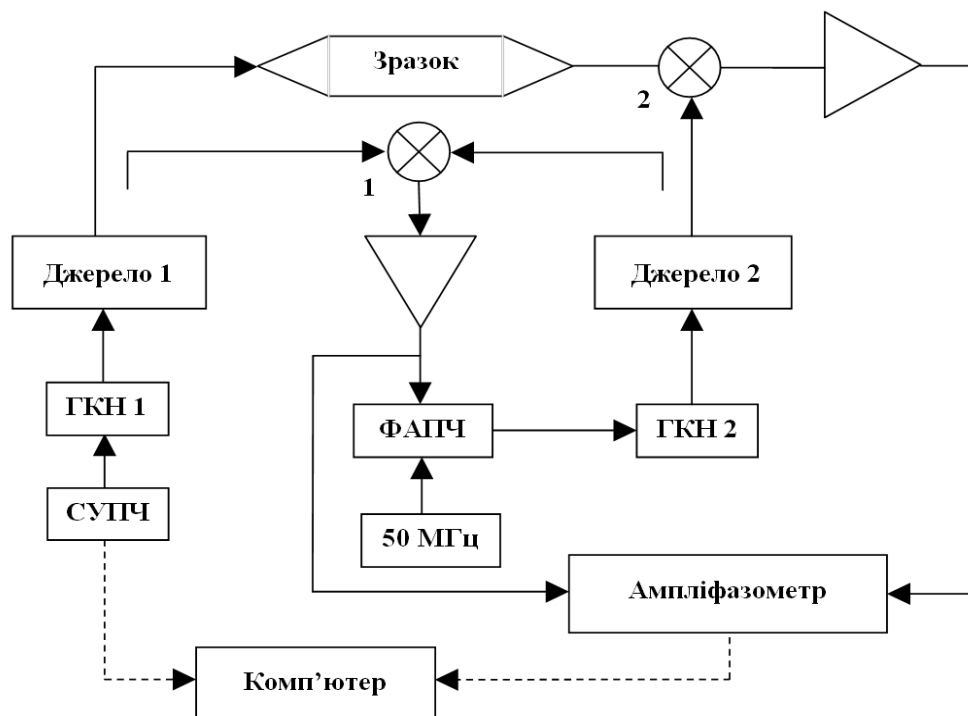


Рисунок 1 – Структурна схема векторного аналізатора

ВА складається з двох джерел двоміліметрового діапазону: керуючого (Джерело 1) і керованого (Джерело 2); двох генераторів, що керуються напругою (ГКН 1 і ГКН 2); змішувача 1 системи ФАПЧ; змішувача 2 і підсилювача проміжної частоти (ППЧ) векторного приймача; ампліфазометра, СУПЧ і ПК.

Кожне з помножувальних джерел містить трикаскадний підсилювач потужності сантиметрового діапазону з коефіцієнтом посилення  $< 25$  дБ, активний ЛПД-помножувач частоти високої кратності та смугово-проникний фільтр зі смугою пропускання  $138,5 \pm 1,5$  ГГц. Сигнал ГКН із діапазоном перестроювання частоти  $6,3 \pm 0,035$  ГГц надходить на підсилювач потужності та далі на помножувач, налаштований на двадцять другу гармоніку частоти задавального генератора.

Принцип роботи ВА заснований на порівнянні амплітуд і фаз сигналів проміжної частоти опорного каналу з сигналом, що пройшов через досліджуваний об'єкт на тій самій проміжній частоті.

Однією з вимог, які висувають до характеристик НВЧ-джерел ВА, є можливість синхронного перестроювання частот передавача та гетеродина для підтримання сталості їх різницевої частоти в усьому діапазоні перестроювання частоти передавача.

Різниця частот джерел 1 і 2 ( $F_1$  та  $F_2$ ) підтримується постійною в усьому діапазоні ВА за допомогою системи ФАПЧ шляхом синхронізації частоти другого джерела  $F_2$  відносно частоти першого джерела  $F_1$  за постійного зсуву частоти  $F_{nc}$ , тобто:

$$F_2 = F_1 - F_{nc}. \quad (1)$$

Оскільки другий свіп-генератор (ГКН 2) є охоплений ФАПЧ (синхронізований з ГКН 1), шумові компоненти фаз двох джерел  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  будуть тими ж самими, тобто:

$$\Phi_1 = \Phi_2. \quad (2)$$

У цьому випадку фаза детектованого сигналу  $\Phi_{nc}$ , є фазою, що вноситься випробуваним пристроєм.

Відмінною особливістю методу є те, що порівняння частот (фазова синхронізація) помножувальних джерел проводиться на вихідних частотах, що дозволило знизити рівень фазових шумів і взаємної нестабільності частот джерел.

У підрозділах 2.2 і 2.3 наведено результати розробки методики синхронізації частоти ЛПД-помножувачів, досліджено приймально-передавальні пристрої векторного аналізатора сигналів і змішувальні пристрої когерентного приймача та системи фазового автопідстроювання частоти. Наведено результати розробки ампліфазометра (АФМ) векторного приймача ВА. Запропоновані рішення, які дозволяють усунути неоднозначність визначення фази та помилок визначення фази, пов'язаних із нелінійністю характеристики фазового детектора на основі АФМ у діапазоні вимірювання фази до 360 градусів.

У підрозділах 2.4 і 2.5 наведені результати дослідження спектральних характеристик, амплітудної та фазової чутливості векторного аналізатора та методика дослідження взаємної нестабільності частоти синхронізованих джерел сигналів векторного аналізатора.



Дослідження режимів синхронізації та ступеня взаємної нестабільності частот джерел 1 і 2 проводилося шляхом аналізу спектра сигналу різницевої частоти, наведеного на рис. 2. Ширина спектра на рівні  $-3$  дБ від частоти-носія становить  $30$  Гц, що відповідає відносній нестабільності частоти  $\sim 2 \times 10^{-10}$ .

Виміряні значення характеристик ВА склали: частотна роздільна здатність  $\sim 100$  Гц, значення потужності фазових шумів  $N_{\text{ш}} = -138 \pm 5$  дБ/Гц, а динамічний діапазон (за відношення сигнал/шум  $P_{\text{с.ш.}} = 1$  у смузі пропускання  $1$  Гц)  $D = 120$  дБ.

У пункті 2.5.2 наведені результати експериментальних досліджень амплітудних і фазових характеристик високодобротних ВР за допомогою ВА двоміліметрового діапазону. На рис. 3 представлено амплітудні та фазові характеристики ВР двоміліметрового діапазону. Як видно з рис. 3, за зміни частоти переданого сигналу спостерігається S-подібна зміна фази, а мінімум прийнятого сигналу спостерігається на резонансній частоті резонатора.

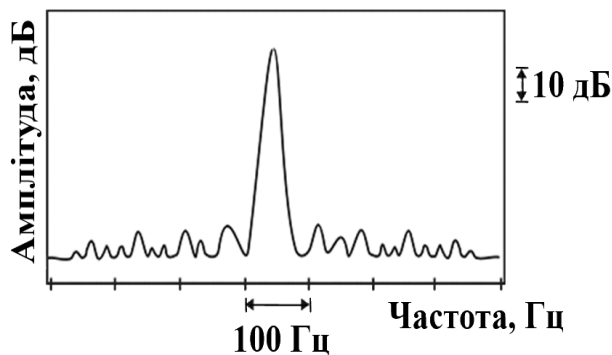


Рисунок 2 – Спектр помножувального джерела 1, виміряний на проміжній частоті

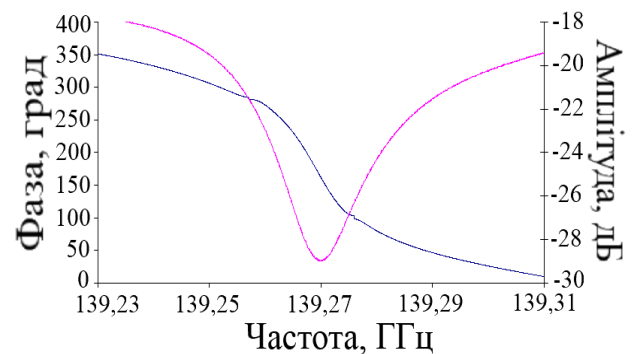


Рисунок 3 – Амплітудна та фазова характеристики ВР двоміліметрового діапазону

Результати тестування запропонованої методики дозволяють стверджувати, що ВА такого типу можуть працювати у будь-якій частині міліметрового діапазону за відповідної заміни помножувачів частоти.

У підрозділі 2.6 проведені дослідження із застосуванням методики фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у джерелі сигналів ЕПР-спектрометра та в експериментах, спрямованих на зменшення метрологічної похибки Державного еталона одиниці ЕРС і напруги.

У пункті 2.6.1 досліджено вплив стабільності частоти джерела сигналу на основі ЛПД-помножувачів частоти з фазовою синхронізацією на точність вимірювання спектрів ЕПР магнетиків в ЕПР-спектрометрі чотириміліметрового діапазону. Цей метод дозволяє досить точно вимірювати енергію переходів між спіновими підрівнями магнетика  $\Delta E_{mn}$ , розміщеного у постійному магнітному полі та опроміненого НВЧ-хвилею. Процес описується виразом (3):

$$\Delta E_{mn} = h\omega_{mn} = g\beta H_{mn}, \quad (3)$$

де  $\Delta E_{mn}$  – різниця енергій двох спінових підрівнів  $m$  і  $n$ , між якими відбувається електронний-перехід;  $\omega_{mn}$  – відповідна резонансна частота НВЧ-хвилі;  $H_{mn}$  – значення

статичного магнітного поля, за якого спостерігається магнітний резонанс;  $g$  – фактор спектроскопічного розщеплення;  $\beta$  – магнетон Бора;  $h$  – постійна Планка.

Однак, при переході у високочастотну частину міліметрового діапазону проявляється низка факторів, які погіршують роздільну здатність методу ЕПР. Одним з таких факторів є нестабільність частоти  $\delta\omega$  джерела НВЧ-випромінювання. Як видно з (3), нестабільність частоти  $\delta\omega$  буде призводити до неоднорідного розширення лінії ЕПР порядку  $\delta H \approx (h/g\beta)\delta\omega$ , що досягає помітних величин. Крім того, під час використання у спектрометрі ЕПР високодобротних ( $Q \approx 10^3 - 10^4$ ) квазіоптичних резонаторів нестабільність частоти призводить до паразитної амплітудної модуляції інформаційного сигналу.

У зв'язку з цим, одним із завдань досліджень була розробка джерела сигналу ЕПР-спектрометра чотириміліметрового діапазону на основі синтезаторів прямого цифрового синтезу частоти, що забезпечує точність встановлення частоти до 10 Гц і відносно довготривалу нестабільність частоти до  $2 \times 10^{-10}$ . Експериментальні дослідження впливу стабільності частоти джерела сигналу на точність вимірювання спектрів проведено у ЕПР-спектрометрі «КВАРК» [5, 13] під час вимірювання спектрів магніторезонансного поглинання тонкої плівки  $Fe^{3+}$ , розміщеної у високодобротному квазіоптичному резонаторі (рис. 4).

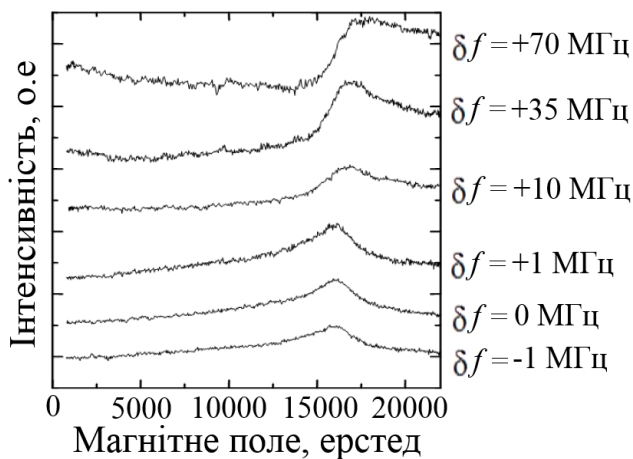


Рисунок 4 – ЕПР відгук від зразка  $Fe^{3+}$  на центральній частоті 70 ГГц за різних величин відбудови частоти ( $\delta f$ ) генератора від частоти резонатора

У пункті 2.6.2 наведені результати досліджень з опромінення матриці контактів Джозефсона у новому типі еталона одиниці ЕРС і напруги, принцип дії якого полягає у тому, що під час опромінення такої матриці НВЧ сигналами на вольт-амперній характеристиці матриці формуються сходинки постійної напруги  $U_n$ , пов'язаної з частотою  $f$  співвідношенням:

$$U_n = \frac{nhf}{2e} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (4)$$

де  $h$  – постійна Планка,  $e$  – елементарний заряд [10].

Аналіз результатів експериментів, наведених на рис. 4, показав, що застосування розробленого синтезаторного джерела сигналу дозволяє проводити прецизійні вимірювання ЕПР спектрів за умови резонансної зміни магнітної сприйнятливості зразка залежно від величини розбіжності власної частоти резонатора та частоти генератора, а величина співвідношення сигнал/шум у зареєстрованих ЕПР відгуках не зменшується при відстроюванні частоти генератора від резонансної частоти відкритого резонатора.

Таким чином, наприклад, сигнал із частотою 70 ГГц створює елементарну сходинку з висотою близько 150 мкВ. З використанням матриці з великою кількістю послідовно ввімкнених контактів Джозефсона стає можливим відтворення напруг до рівня 10 В.

З рівняння (4) випливає, що стабільність частоти НВЧ джерела є основним чинником, що визначає метрологічну похибку подібних еталонів. Для забезпечення відносної похибки напруги еталона близько  $1 \times 10^{-9}$  відносна нестабільність частоти НВЧ джерела має бути не гіршою ніж  $1 \times 10^{-10}$ . З цією метою було розроблено цифровий синтезатор частоти чотириміліметрового діапазону на основі ЛПД-помножувачів із фазовою синхронізацією для опромінення матриці контактів Джозефсона у Державному еталоні одиниці ЕРС і напруги. Застосування даного синтезатора дозволило підвищити точність еталона на три порядки. Цей результат дає можливість стверджувати, що досягнута нестабільність частоти синтезатора склала  $1 \times 10^{-10}$  [14].

Результати проведених досліджень показують, що характеристики джерел сигналів, побудованих на основі ЛПД-помножувачів з фазовою синхронізацією частоти, дозволяють створювати вимірювальні системи з високою роздільною здатністю у короткохвильовій частині міліметрового діапазону.

**У розділі 3** наведено результати дослідження та реалізації методу однозначного вимірювання фази у двочастотному гетеродинному інтерферометрі міліметрового діапазону на ЛПД-генераторах.

У сучасних термоядерних установках поряд із вимірюванням щільності плазми гостро стоїть завдання використання сигналів інтерферометрів для управління даним параметром у режимі реального часу і, таким чином, утримання плазми шляхом додаткового її нагрівання із застосуванням потужних джерел енергії. Більшість інтерферометрів забезпечує вимірювання тільки швидких змін фази до значень  $2\pi N$  (де  $N \gg 1$ ), але вони не дають однозначного вимірювання фази, що потрібно у випадку, коли у плазмі є великі стрибки значень щільності протягом часу її життя. При використанні сигналів інтерферометра для управління процесами горіння й утримання плазми у реальному масштабі часу необхідно, щоб значення фази, що вимірюються, не перевищували  $2\pi$  за час життя плазми.

У підрозділах 3.1-3.2 наведено опис структурної схеми інтерферометра з «однозначним» каналом вимірювання фази, принципу формування «однозначного» каналу та обґрунтування методу однозначного вимірювання фази у двочастотному гетеродинному інтерферометрі [6].

Для реалізації методу однозначного вимірювання фази опромінення плазми проводиться на двох різних, але близьких частотах, сформованих у каналах А і В, уздовж одного променя, але у зустрічних напрямках. Таким чином, існує дві вимірювальних НВЧ-хвилі, які пройшли один і той же шлях, одна – яка несе інформацію про додатковий фазовий зсув  $\varphi_1$ , викликаний плазмою, і приймається на зондувальній частоті  $f_1 = 131$  ГГц, і друга – з фазовим зсувом  $\varphi_2$ , викликаним проходженням того ж шляху, але в зустрічному напрямку і на зондувальній частоті  $f_2 = 133$  ГГц [18, 19]. Фазові зсуви  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  обох хвиль відрізняються несуттєво ( $\varphi_1 > \varphi_2$ ).

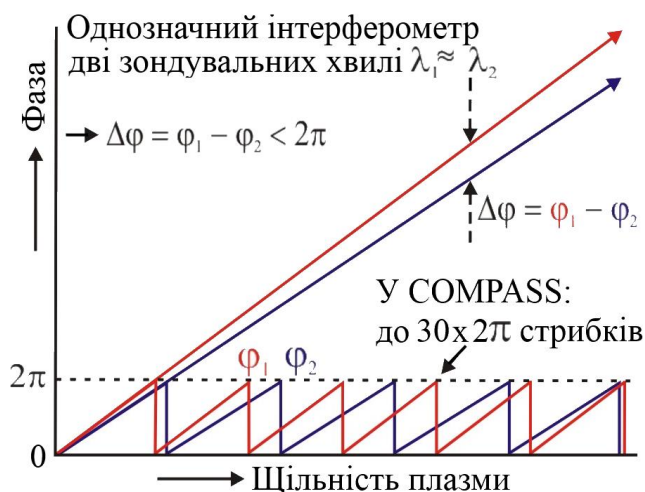


Рисунок 5 – Обґрунтування формування «однозначного» каналу вимірювання фази (канал А – верхня крива, канал В – нижня крива)

Для того, щоб не втратити інформацію про тонку структуру процесів, які відбуваються у плазмовому шнурі, і одночасно отримувати інформацію про щільність плазми у реальному масштабі часу, одним із завдань була розробка триканальних фазометрів з «однозначними» каналами вимірювання фази.

У підрозділі 3.4 наведено результати розробки та дослідження двох типів триканальних фазометрів для двочастотного однозначного гетеродинного інтерферометра: фазометра, заснованого на двох ампліфазометрах AD8302 [7, 17], і фазометра, виконаного на програмованих логічних матрицях (ПЛМ) [18, 19]. Розроблено методику лінеаризації фазової характеристики фазометрів і алгоритм корекції фазових помилок [7, 20].

У пунктах 3.4.1-3.4.2 запропоновано методику усунення проблеми неоднозначності визначення фази у діапазонах від 0 до +180 і від 0 до -180 градусів у фазометрі на АФМ. Було розроблено схему та методику перетворення фази з 180-градусного вигляду до 360-градусного (рис. 6) на основі введення до вимірювальної схеми другого АФМ і лінії затримки. З рис. 6 видно, що одному і тому ж значенню кута відповідають різні значення напруг на виходах АФМ 1 та АФМ 2. Вимірювання, що проведені з використанням такої схеми по двох каналах, знімають неоднозначність за фазою, і діапазон вимірювання розширюється до 360 градусів. Однак з наведеного графіка видно, що після підсумовування сигналів обох АФМ одному значенню фази відповідають два значення амплітуди. Для усунення цього ефекту та досягнення однозначного вимірювання фази у діапазоні 0–360 градусів за допомогою двох АФМ AD8302 було розроблено та застосовано сумарно-різницевий алгоритм прийняття рішення, заснований на аналізі поведінки сумарної та різницевої характеристик сигналів АФМ 1 та АФМ 2, наведених на рис. 7, і коригуванні результатів вимірювань у мікропроцесорі фазового детектора за допомогою спеціально розробленої програми. Спільний аналіз двох характеристик дозволив реалізувати однозначне вимірювання фази у діапазоні 0–360 градусів за допомогою двох АФМ AD8302.

Як показано на рис. 5, сигнал у різницевому «однозначному» каналі формується шляхом вимірювання фазового набігу між двома вимірювальними каналами інтерферометра.

У процесі вимірювання різниці фаз зондувальних хвиль (за відповідного вибору частот  $f_1$  та  $f_2$ ) величина фазового зсуву ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) не перевищує  $360^\circ$ .

Визначення різницевої фази дає можливість оцінювати щільність плазми у реальному масштабі часу без використання додаткових алгоритмів перерахунку.

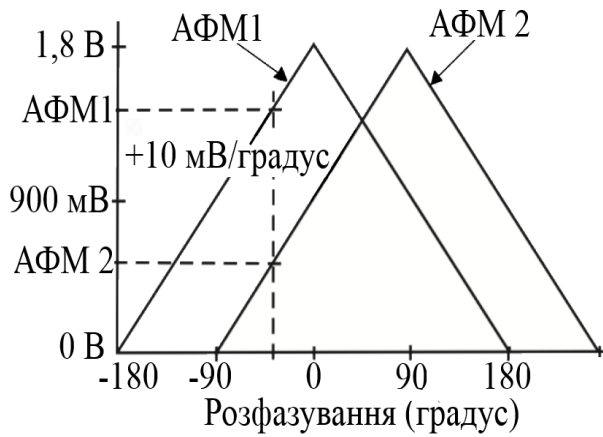


Рисунок 6 – Криві фазової чутливості двох фазових детекторів на основі АФМ AD8302

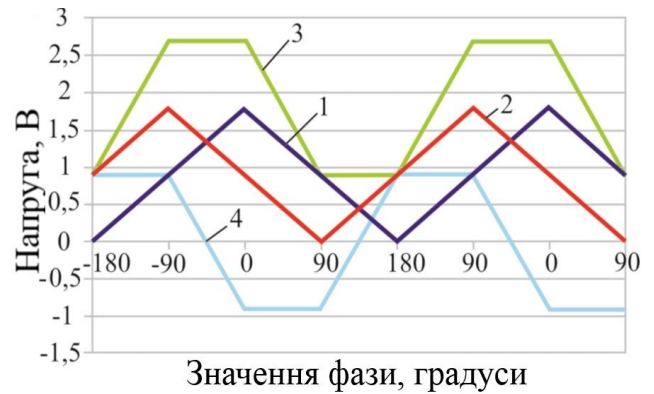


Рисунок 7 – Фазові характеристики двох АФМ AD8302 із сумарним і різницевим каналами: характеристики АФМ 1 та АФМ 2 (криві 1, 2), сумарна та різницева характеристики (криві 3, 4)

На рис. 8 наведено результуючу характеристику фазового детектора у діапазоні 0–700 градусів після застосування алгоритму корекції. Як видно з графіка, фазова характеристика змінюється за лінійним законом у діапазоні 0–360 градусів. Така поведінка свідчить про правильну реалізацію алгоритму корекції фазової характеристики детектора.

У пункті 3.4.3 проведено розробку методу лінеаризації фазової характеристики й алгоритму калібрування фазометрів на основі вагових функцій.

На рис. 9 наведені фазові характеристики, побудовані за результатами вимірювань двох АФМ AD8302 із сумарним і різницевим каналами під час подачі на їх входи двох близьких частот: характеристики прямого та зсунутого каналів (криві 1, 2), сумарна та різницева характеристики (криві 3, 4).



Рисунок 8 – Результуюча характеристика фазового детектора після застосування алгоритму корекції

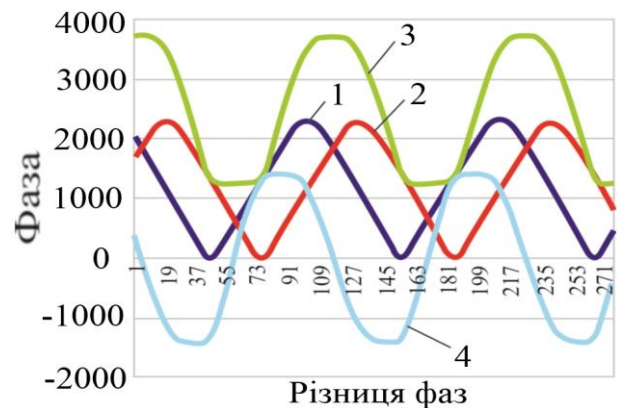


Рисунок 9 – Фазові характеристики двох АФМ AD8302 із сумарним і різницевим каналами, виміряні за подачі на їх входи двох близьких частот

На графіках видно викривлення форми сигналів поблизу точок перегинів фазової характеристики та спотворення горизонтальних ділянок графіків сигналів сумарного і різницевого каналів, що особливо сильно проявляється поблизу точок перегину.



У цифровий алгоритм пошуку стану системи було введено дистанційно налаштовуваний довірчий інтервал для максимуму та мінімуму сумарного і різницевого сигналів. Застосування налаштовуваного інтервалу дозволило з необхідною точністю визначити стан ФД для реалізації алгоритму відтворення фазової характеристики. У результаті такого калібрування нелінійність фазової характеристики вдалося знизити до значення менше 1 градуса у діапазоні 0–360 градусів.

У пункті 3.4.4 наведені результати розробки та дослідження триканальних фазометрів на основі ПЛМ. Зміни, проведені у системі нагрівання плазми у токамаці «COMPASS», сформулювали нові вимоги до інтерферометра, у тому числі і до характеристик фазометра. У зв'язку із труднощами реалізації цих вимог на аналогових ФД на основі AD8302 було проведено пошук вирішення цих завдань на більш сучасній елементній базі. Одним з таких рішень є побудова фазових детекторів на логічних елементах – ПЛМ.

Триканальний фазометр на основі ПЛМ було встановлено у схему інтерферометра, де на його входи після другого перетворення частоти ( $F_{m\omega 2} = 133$  МГц) надходили сигнали приймальних каналів А і В та опорного каналу. Для імітації відбиття від плазми використовувався кутиковий відбивач.

На осцилограмах 1 і 2 (рис. 10) помітні пилкоподібні перевероти фази у каналах А і В, які виникають під час проходження значення фази через 360 градусів під час переміщення кутикового відбивача, а сигнал різницевого – «однозначного» каналу 3 поводить себе стабільно без стрибків за значень набігу фази більших ніж 30 переверотів фази у «швидких» каналах А і В.

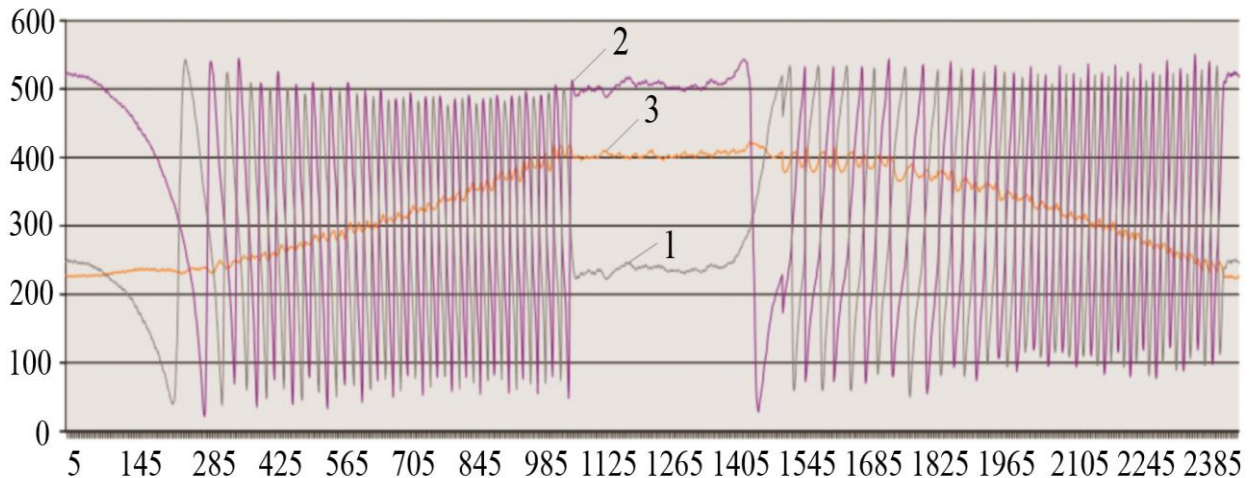


Рисунок 10 – Осцилограми сигналів, виміряні на виходах триканального фазометра на основі ПЛМ під час переміщення кутикового відбивача:

1 – канал А, 2 – канал В, 3 – однозначний канал

З метою коригування алгоритму роботи ФД були проведені тестові вимірювання сигналів на виході «однозначного» каналу, результати яких були використані для калібрування фазової характеристики фазометра. На рис. 11, а наведено осцилограми сигналу, вимірюного на виході «однозначного» каналу інтерферометра до коригування алгоритму 1, а також імпульс увімкнення плазми 2 та імпульс увімкнення джерела додаткового нагрівання плазми 3.

Як видно з рис. 11, а, фазові помилки виникали у діапазоні  $\pm 20^\circ$  в областях  $+180$  та  $-180$  градусів. Завдяки використанню кутикового відбивача стало можливим визначити періодичність появи цих помилок і скорегувати вибір коефіцієнтів для сумарно-різницевого аналізу фазових кривих.

На рис. 11, б представлено сигнал «однозначного» каналу після корекції алгоритму обчислень – крива 4. Як видно з поведінки графіка сигналу «однозначного» каналу, внесені виправлення підвищили лінійність фазової характеристики фазометра у діапазоні  $0-360^\circ$ .

Випробування фазометрів у складі інтерферометра продемонстрували можливість вимірювання щільності плазми без неоднозначностей визначення фазового зсуву під час проходження хвиль інтерферометра через плазму.

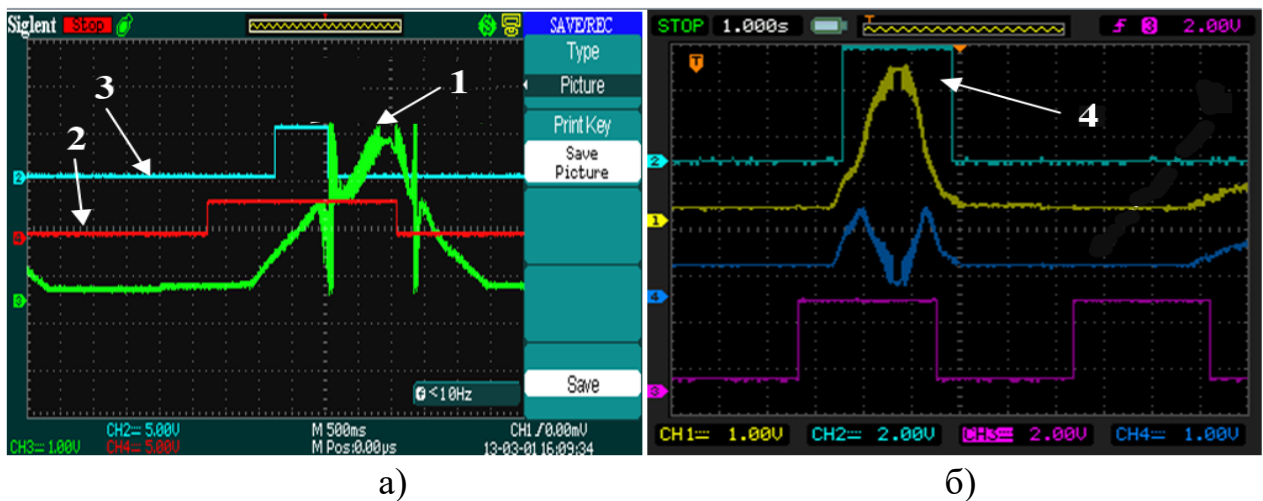


Рисунок 11 – Осцилограми сигналів, що виміряні на виході «однозначного» каналу інтерферометра

У розділі 4 наведено результати дослідження та реалізації методу однозначного вимірювання фази, описаний у розділі 3, у новому двочастотному гетеродинному інтерферометрі на ЛПД-помножувачах з фазовою синхронізацією частоти, що працює на частотах 138,9 ГГц та 139,6 ГГц [8, 21].

У підрозділах 4.1, 4.2 описано методики побудови та реалізації «однозначного» інтерферометра з фазовою синхронізацією частоти передавальних і приймальних пристроїв, принцип роботи та структуру двочастотного інтерферометра.

У підрозділах 4.3, 4.4 запропоновано методику формування «однозначного» каналу вимірювання фази і наведені результати експериментів з вимірювання щільності плазми у реальному масштабі часу.

Після завершення лабораторних випробувань інтерферометра були проведені його випробування на токамаці «COMPASS» під час вимірювання щільності плазми у реальному масштабі часу та порівняння результатів вимірювань із даними, отриманими за допомогою іншого типу діагностики щільності, заснованого на вимірюванні «томпсонівського розсіювання» плазми.

На рис. 12 наведені результати вимірювання інтегральної щільності плазми, виміряні за допомогою однозначного інтерферометра (крива 1) і за методом «томпсонівського розсіювання» (крива 2).

Як показав аналіз результатів дослідження інтерферометра, він забезпечує вимірювання фази в межах  $0-720^\circ$  до величини щільності плазми  $10 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  із часовою роздільною здатністю 100 мкс.

Виконано порівняння результатів вимірювань інтегральної щільності плазми, отриманих із застосуванням двох розроблених інтерферометрів: інтерферометра 133 ГГц (крива 1) і 140 ГГц (крива 2) в одній і тій самій установці токамак (рис. 13). Випробування фазометрів у складі інтерферометрів продемонстрували можливість вимірювання щільності плазми без неоднозначностей визначення фазового зсуву під час проходження хвиль інтерферометра через плазму.

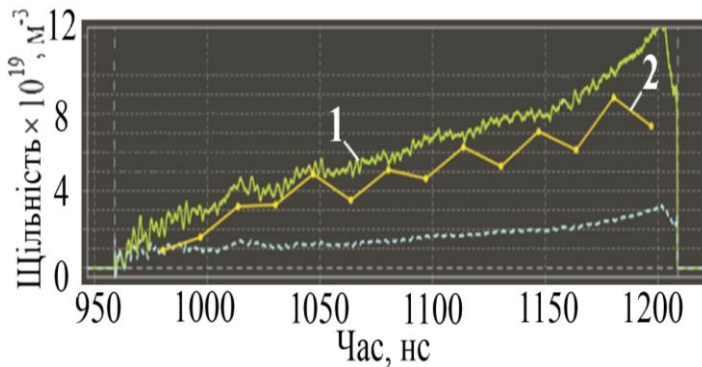


Рисунок 12 – Результати вимірювання щільності плазми

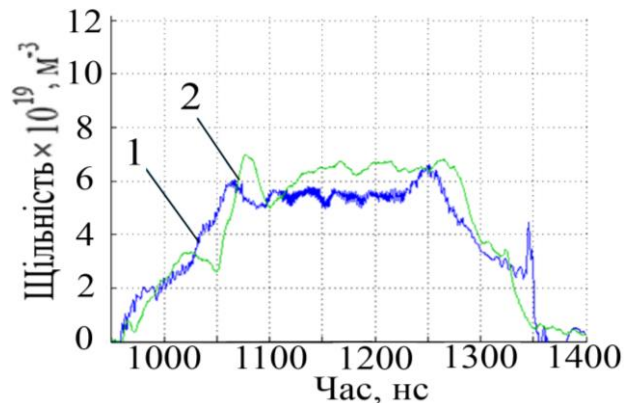


Рисунок 13 – Вимірювання щільності плазми

У роботі запропоновано рішення створення однозначного інтерферометра, для роботи у терагерцовому діапазоні на частоті 400 ГГц [9, 22]. Система буде використовувати два терагерцових приймально-передавальних пристрої і буде відповідати принципу однозначного вимірювання фази. Проведено оцінку корекцій сигналу, які відповідають ефектам нелінійності, викликаним показником заломлення плазми. Для моделювання поширення зондувальних хвиль у плазмі використовувалася програма FIESTA-8.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано та досліджено нові методики фазової синхронізації частоти твердотільних джерел випромінювання у короткохвильовій частині міліметрового діапазону довжин хвиль і метод однозначного вимірювання фази для інтерферометрії високотемпературної плазми у режимі реального часу. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Запропоновано та реалізовано методику фазової синхронізації частоти активних ЛПД-помножувачів високої кратності множення у розробленому гетеродинному векторному аналізаторі двоміліметрового діапазону, що забезпечує похибку вимірювання фази  $0,1^\circ$ , динамічний діапазон 80 дБ і частотну роздільну здатність  $\sim 100$  Гц.



2. З метою підвищення точності вимірювання спектрів поглинання магнітних зразків у ЕПР-спектрометрі запропоновано методику фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у цифровому синтезаторі частоти міліметрового діапазону як НВЧ-джерела квазіоптичного ЕПР-спектрометра, що забезпечила відносну нестабільність частоти синтезатора до  $2 \times 10^{-10}$  і мінімальний крок перебудови частоти 10 Гц. Проведено вимірювання спектрів магніторезонансного поглинання тонкої плівки  $\text{Fe}^3$  у міліметровому діапазоні довжин хвиль.

3. Запропоновано та реалізовано методику фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів у складі джерела опромінення матриці контактів Джозефсона у Державному стандарті одиниці ЕРС і напруги, яка дозволила підвищити точність еталона на три порядки.

4. Для вимірювання лінійної інтегральної концентрації електронів високотемпературної плазми у реальному масштабі часу запропоновано метод однозначного вимірювання фази у двочастотному гетеродинному інтерферометрі міліметрового діапазону, що дозволив проводити вимірювання щільності високотемпературної плазми до пікової щільності плазми  $10 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  із часовою роздільною здатністю 100 нс.

5. Запропоновано методику лінеаризації фазової характеристики й алгоритми калібрування фазометрів інтерферометра, яка заснована на застосуванні вагових функцій і сумарно-різницевого аналізу. Показано, що запропоновані методики дозволили знизити нелінійність фазової характеристики до значення менше 1 градуса у діапазоні  $0-360^\circ$ .

6. Запропоновано схемне рішення та проведено моделювання роботи однозначного інтерферометра в установці токамак «COMPASS-U» у терагерцовому діапазоні на частоті 400 ГГц.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ермак Г. П. Фазовая синхронизация источников 2-х мм диапазона, выполненных на основе ЛПД-умножителей высокой кратности / Г. П. Ермак, Е. А. Алексеев, А. В. Варавин // Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна, № 570. – *Радиофизика та електроніка*. – 2002. – Вип. 2. – С. 163–166.

2. Ermak G. P. Phase Locking of 2-mm Wave Sources upon High-Order IMPATT Multipliers / G. P. Ermak, A. V. Varavin, and E. A. Alekseev // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 2003. – Vol. 24, № 10. – PP.1609–1616.

3. Ермак Г. П. Твердотельная приемо-передающая система для векторных измерений в 2-х миллиметровом диапазоне длин волн / Г. П. Ермак, А. В. Варавин, В. П. Кочергин // *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр.* – 2005. – Т. 10, № 2. – Харьков. – С. 321–325.

4. Ermak G. P. 2-mm Wave Vector Network Analyzer Upon High-Order IMPATT Multipliers / G. P. Ermak, A. V. Varavin // *Intern. Journ. of Infrared and Millimeter Waves*. – 2006. – Vol. 27, № 5. – PP. 681–686.

5. Варавин А. В. Прецизионный контроль частоты в ЭПР-спектрометре миллиметрового диапазона / А. В. Варавин, Г. П. Ермак, С. В. Недух,

П. И. Познахирев, С. И. Тарапов, М. К. Ходзицкий // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. – 2006. – Т. 11, № 3. – Харьков. – С.451–455.

6. Varavin M. New design of microwave interferometer for tokamak COMPASS / M. Varavin, J. Zajac, F. Zacek, S. Nanobashvili, G. Ermak, A. Varavin, A. Vasilev, M. Stumbra, A. Vetoshko, A. Fateev, V. Shevchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, № 10. – PP. 935–942.

7. Варавин А. В. Трехканальные фазовые детекторы на основе амплифазометров AD8302 и программируемых логических матриц для гетеродинного интерферометра миллиметрового диапазона / А. В. Варавин, Г. П. Ермак, А. С. Васильев, А. В. Фатеев, Н. В. Варавин, Ф. Жачек, Я. Заяц // Радиофизика и электроника. – 2016. – Т. 7 (21), № 4. – С. 61–70.

8. Varavin A. V. Two frequency «unambiguous» heterodyne interferometer based on phase locked millimeter-wave band transceivers / A. V. Varavin, G. P. Ermak, A. S. Vasilev, A. V. Fateev, N. V. Varavin, F. Žaček, J. Zajac, A. V. Zorenko // Telecommunication and Radio Engineering. – 2017. – Vol. 76, № 10. – PP. 903–918.

9. Varavin M. Study for the microwave interferometer for high densities plasmas on COMPASS-U tokamak / M. Varavin, A. Varavin, D. Naydenkova, J. Zajac, F. Zacek, S. Nanobashvili, O. Bogar // Fusion Engineering and Design. – 2019. – doi:10.1016/j.fusengdes.2019.03.051, постійне посилання на статтю: sci-hub.tw/10.1016/j.fusengdes.2019.03.051.

10. Варавин А. В. Цифровой синтезатор частоты миллиметрового диапазона для облучения матрицы контактов Джозефсона в государственном эталоне единицы ЭДС и напряжения / А. В. Варавин, Г. П. Ермак, П. И. Познахирев, Ю. Нимейр, В. В. Аникин, А. И. Колбасин, Е. Ю. Лагутин // Український метрологічний журнал. – 2007. – № 3. – С. 12–15.

11. Ermak G. P. Dielectric Parameters Study Using a Waveguide Cavity and a Rigorous Processing Algorithm / G. P. Ermak, A. P. Poyedinchuk, A. V. Varavin, and N. P. Yashina // 33rd European Microwave Conference. – Munich, October 6–10, 2003. – Munich 2003. – PP. 751–753.

12. Derkach V. N. Measurement of dielectric losses in CVD diamonds in millimeter wave band at low temperatures / V. N. Derkach, G. P. Ermak, S. V. Nedukh, O. S. Plevako, S. I. Tarapov, A. V. Varavin // International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 05). – Torino, Italy, September 12–16, 2005.

13. Варавин А. В. Автоматизированный синтезатор частоты для квазиоптического ЭПР-спектрометра миллиметрового диапазона / А. В. Варавин, Г. П. Ермак, С. В. Недух, П. И. Познахирев, С. И. Тарапов, М. К. Ходзицкий // Proceedings of 16th International Crimean Conference on Microwaves and Telecommunication Technology. – Sevastopol, Ukraine, September 11–15, 2006. – PP. 841–842.

14. Варавин А. В. Стабилизированный твердотельный источник миллиметрового диапазона для облучения матрицы контактов Джозефсона в эталоне единицы ЭДС и напряжения / А. В. Варавин, Г. П. Ермак, П. И. Познахирев, В. В. Аникин, А. И. Колбасин // 5-я международная научно-техническая конференция «Метрология и измерительная техника». – Харьков, Украина, 10–12 октября, 2006. – С. 244–246.

15. Ermak G. V-band frequency synthesizer for the operation of Josephson arrays in voltage standards / G. Ermak, A. Varavin, P. Poznahirev, J. Niemeyer,

V. Anikin, A. Kolbasin, E. Lagutin // Proc. The 6th International Kharkov Symposium On Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves, 2007. – Kharkov, Ukraine, June 25–30, 2007. – Vol. 2. – PP. 861–863.

16. Ермак Г. П. Гетеродинный векторный анализатор двухмиллиметрового диапазона / Г. П. Ермак, А. В. Варавин // Proceedings of 20th International Crimean Conference on Microwaves and Telecommunication Technology. – Sevastopol, Ukraine, September 13–17, 2010. – PP. 823–824.

17. Ермак Г. П. Фазовые детекторы на основе амплифазометров AD8302 для гетеродинного интерферометра миллиметрового диапазона / Г. П. Ермак, А. В. Варавин, А. С. Васильев, М. Стумбра, А. В. Фатеев, Ф. Жачек, Я. Заяц // Proceedings of 22th International Crimean Conference on Microwaves and Telecommunication Technology. – Sevastopol, Ukraine, September 10–14, 2012. – PP. 827–828.

18. Ermak G. P. Two-wavelength millimeter wave «unambiguous» heterodyne interferometer / G. P. Ermak, A. V. Varavin, A. S. Vasilev, M. Stumbra, A. S. Fateev, F. Zacek, J. Zajac, N. Varavin, V. Shevchenko // Proc. The Eighth International Kharkov Symposium On Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13), 2013. – Kharkov, Ukraine, June 23–28, 2013. – PP. 529–531.

19. Varavin M. Modernization and calibration of interferometer of tokamak «Compass» / M. Varavin, J. Zajac, F. Zacek, S. Nanobashvili, G. Ermak, A. Varavin, A. Vasilev, M. Stumbra, A. Vetoshko, A. Fateev, V. Shevchenko // Proc. The Eighth International Kharkov Symposium On Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13), 2013. – Kharkov, Ukraine, June 23–28, 2013, PP. 571–575.

20. Varavin M. Development of Phase Meters Based on AD8302 and CPLD for Microwave Interferometer / M. Varavin, J. Zajac, F. Zacek, G. Ermak, A. Varavin, A. Vasilev, M. Stumbra, A. Vetoshko, A. Fateev, S. Nanobashvili // Proceedings of 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2014. – Gdańsk, Poland, June 16–18, 2014. – PP. 215–218.

21. Ermak G. P. Two Frequency Heterodyne Interferometer Based on Phase Locked 2–Millimeter Wave Transceivers / G. P. Ermak, A. V. Varavin, A. S. Vasilev, A. S. Fateev, F. Zacek, J. Zajac, N. Varavin, A. Zorenko // Proc. The Nine International Kharkov Symposium On Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16), 2016. – Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. – PP. 1–4, DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538013, IEEE Conference Publications.

22. Varavin M. Study for the microwave interferometer for high densities plasmas on COMPASS-U tokamak / M. Varavin, A. Varavin, D. Naydenkova, J. Zajac, F. Zacek // 30th Symposium on fusion technology (SOFT 2018). – Italy, September 16–21, 2018. – Contribution ID: 1116.

## АНОТАЦІЯ

**Варавін А. В. Фазова синхронізація частоти твердотільних джерел сигналів в короткохвильовій частині міліметрового діапазону радіохвиль.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню методів синхронізації коливань твердотільних джерел сигналів на основі ЛПД-помножувачів частоти та радіофізичних методів вимірювань у міліметровому та терагерцевому діапазонах довжин хвиль з метою підвищення інформативності та якості фізичних експериментів у процесі вирішення задач радіоспектроскопії та інтерферометрії високотемпературної плазми.

Запропоновано методику фазової синхронізації частоти активних ЛПД-помножувачів високої кратності у гетеродинному векторному аналізаторі двоміліметрового діапазону. Встановлено, що застосування методики верхньої синхронізації частот помножувальних джерел, заснованої на порівнянні фаз вихідних сигналів, дозволило досягти точності вимірювання фази  $0,1^\circ$ , динамічного діапазону 80 дБ і частотної роздільної здатності  $\sim 100$  Гц.

На основі мікрохвильових генераторів із діелектричними резонаторами та ЛПД-помножувачів частоти з ФАПЧ створено синтезатор частоти чотириміліметрового діапазону. Застосування синтезатора у Державному стандарті одиниці ЕРС і напруги, як джерела опромінення матриці контактів Джозефсона, підвищило точність еталона на 3 порядки.

Для вимірювання лінійної інтегральної концентрації електронів високотемпературної плазми у реальному масштабі часу запропоновано та досліджено метод однозначного вимірювання фази у двочастотних гетеродинних інтерферометрах міліметрового та терагерцевого діапазонів із використанням ЛПД-помножувачів із фазовою синхронізацією сигналів і однозначним каналом фазових вимірювань. Проведено вимірювання щільності плазми у режимі реального часу.

Запропоновано схемне рішення та проведено моделювання роботи однозначного інтерферометра в установці токамак «COMPASS-U» у терагерцевому діапазоні на частоті 400 ГГц.

Запропоновано методику лінеаризації фазової характеристики й алгоритми калібрування фазометрів інтерферометра, заснованих на застосуванні вагових функцій і сумарно-різницевого аналізу. Показано, що запропоновані методики дозволили знизити нелінійність фазової характеристики до значення менше 1 градуса у діапазоні  $0-360^\circ$ .

**Ключові слова:** фазова синхронізація, лавинно-пролітні діодні помножувачі частоти, ФАПЧ, міліметровий і терагерцевий діапазон, ЕПР-спектрометр, метод однозначного вимірювання фази, спектральні характеристики, стабільність частоти, роздільна здатність, двочастотний гетеродинний інтерферометр.

## АННОТАЦИЯ

**Варавин А. В. Фазовая синхронизация частоты твердотельных источников сигналов в коротковолновой части миллиметрового диапазона радиоволн.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2019.

Диссертационная работа посвящена исследованию методов синхронизации колебаний твердотельных источников сигналов на основе ЛПД-умножителей частоты и радиофизических методов измерений в миллиметровом и терагерцовом диапазонах длин волн с целью повышения информативности и качества физических экспериментов в процессе решения задач радиоспектроскопии и интерферометрии высокотемпературной плазмы.

Предложена методика фазовой синхронизации частоты активных ЛПД-умножителей высокой кратности в гетеродинном векторном анализаторе двухмиллиметрового диапазона. Установлено, что применение методики верхней синхронизации частот умножительных источников, основанного на сравнении фаз выходных сигналов, позволило достичь точности измерения фазы  $0,1^\circ$ , динамического диапазона 80 дБ и частотного разрешения  $\sim 100$  Гц.

На основе микроволновых генераторов с диэлектрическими резонаторами и ЛПД-умножителями частоты с ФАПЧ создан синтезатор частоты четырехмиллиметрового диапазона. Применение синтезатора в Государственном стандарте единицы ЭДС и напряжения как источника облучения матрицы контактов Джозефсона повысило точность эталона на 3 порядка.

Для измерения линейной интегральной концентрации электронов высокотемпературной плазмы в реальном масштабе времени предложен и реализован метод однозначного измерения фазы в двухчастотных гетеродинных интерферометрах миллиметрового и терагерцового диапазонов с использованием ЛПД-умножителей с фазовой синхронизацией сигналов и однозначным каналом фазовых измерений. Проведены измерения плотности плазмы в режиме реального времени.

Предложено схемное решение и проведено моделирование работы однозначного интерферометра в установке токамак «COMPASS-U» в терагерцовом диапазоне на частоте 400 ГГц.

Предложены методика линеаризации фазовой характеристики и алгоритмы калибровки фазометров интерферометра, основанных на применении весовых функций и суммарно-разностного анализа. Показано, что предложенные методики позволили снизить нелинейность фазовой характеристики до значения менее 1 градуса в диапазоне  $0-360^\circ$ .

**Ключевые слова:** фазовая синхронизация, лавинно-пролетные диодные умножители частоты, ФАПЧ, миллиметровый и терагерцовый диапазон, ЭПР-спектрометр, метод однозначного измерения фазы, спектральные характеристики, стабильность частоты, разрешение, двухчастотный гетеродинный интерферометр.

**ABSTRACT**

**Varavin A. V. Phase locking of solid-state signal sources in the shortwave part of the millimeter radio waves range.** – Qualification work is a manuscript.

Thesis for Candidate Degree of Physical and Mathematical Sciences in specialty 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to the study of methods for synchronizing oscillations of solid-state signal sources based on high-order IMPATT diodes frequency multipliers and radiophysical measurement methods in the millimeter and terahertz bands in order to increase the information content and quality of physical experiments in the process of solving problems of radio spectroscopy and interferometry of high-temperature plasma.

The method for phase locking of high-order IMPATT diodes multipliers in a heterodyne vector analyzer of a two-millimeter range is proposed. It was found that the application of the method of upper frequency synchronization of multiplying sources, based on a comparison of the phases of the output signals, made it possible to achieve: accuracy of phase measurement of  $0.1^\circ$ , dynamic range of 80 dB and frequency resolution of  $\sim 100$  Hz.

On the basis of microwave generators with dielectric resonators and IMPATT diodes frequency multipliers with a PLL, a four-millimeter frequency synthesizer was created. The use of a synthesizer in the State Standard for the unit of EMF and voltage as an irradiation source for the Josephson contact matrix increased the accuracy of the standard by 3 orders of magnitude.

For measurement of the electrons linear integral concentration in a high-temperature plasma in real-time, the unambiguous phase measurement method in a two-frequency heterodyne interferometer of a two-millimeter range based on the phase locked IMPATT diodes multipliers and the unambiguous channel of phase measuring was proposed and researched.

A circuit solution was proposed and the operation simulation for the unambiguous interferometer in the tokamak «COMPASS-U» in the terahertz band at 400 GHz was conducted.

A technique for linearizing the phase characteristic and calibration algorithms for interferometer phasometers based on the use of weight functions and sum-difference analysis were proposed. It is shown that the proposed methods made it possible to reduce the nonlinearity of the phase characteristic to a value of less than 1 degree in the range of  $0-360^\circ$ .

**Keywords:** phase synchronization, high-order IMPATT diodes frequency multipliers, PLL, millimeter and terahertz wave ranges, method of unambiguous phase measurement, spectral characteristics, frequency stability, resolution, two-frequency heterodyne interferometer.