

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

НАРЕЖНИЙ ОЛЕКСІЙ ПАВЛОВИЧ

УДК 621.396.96

**ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ГРУПОВИХ КВАНТОВИХ  
СТАНДАРТІВ У РАДІОТЕХНІЧНІЙ СИСТЕМІ СИНХРОНІЗАЦІЇ  
ЧАСУ ТА ЧАСТОТИ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Костира Олександр Олексійович,**  
докторант кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, м. Харків

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Єрмаков Геннадій Валентинович,**  
завідувач кафедри бронетанкового озброєння і військової техніки факультету військової підготовки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, м. Харків;

доктор технічних наук  
**Павліков Володимир Володимирович,**  
доцент кафедри проектування радіоелектронних систем літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Захист відбудеться "30" вересня 2014 р. в 15-00 годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розіслано "29" серпня 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



д-р техн. наук Безрук В.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Аналіз сучасних робіт дозволяє виділити два основних напрямки підвищення стабільності відтворення, зберігання і передачі шкали часу радіотехнічними системами синхронізації часу та частоти. Перший напрямок, пов'язаний з удосконаленням і створенням нових технічних засобів (стандартів частоти і часу), базується на останніх досягненнях фундаментальних наук. Другий напрямок має на меті об'єднання декількох елементів – зберігачів одиниць фізичної величини та їхнє спільне використання у якості групових еталонів (ГЕ) з метою підвищення точності, стабільності та надійності формованих одиниць. Цей підхід дозволяє підвищити точність без значних додаткових витрат на основі удосконалення тільки методів теорії групового еталонування і статистичних методів обробки результатів звірень.

Застосування відомих методів теорії групування на основі стохастичних моделей групового зберігача (еталона) не дозволяє одержати вигреш у точності і стабільності відтворення, зберігання і передачі шкали часу радіотехнічними системами синхронізації часу та частоти при використанні ними групи пасивних квантових стандартів частоти (КСЧ). Основу даних методів складають відомі моделі флуктуаційних явищ КСЧ зі складу ГЕ частоти, що будуються на передумові відсутності їхнього взаємного впливу. Однак припущення про взаємну некорельованість флуктуацій частоти при об'єднанні в групу, наприклад рубідієвих КСЧ, на практиці дуже важко виконати. При цьому спостерігаються такі фізичні явища, як затягування частот, стрибки частоти, биття, які не укладаються у відомі моделі і розглядаються як грубі промахи або шуми типу випадкових блукань, що призводить до завищення оцінок випадкових складових відтворення одиниць кожною мірою. Залишаються також за межами уваги процеси (в основному ті, що мають квазіперіодичний характер), зумовлені взаємним впливом один на одного вихідних гармонічних сигналів мір і які вносять вагомий внесок у систематичні складові похибки відтворення, зберігання і передачі розміру одиниць часу і частоти ГЕ. Вирішення даних протиріч вимагає розробки нового класу математичних моделей групи пасивних КСЧ, що дозволяють враховувати специфічні особливості їхньої взаємодії при об'єднанні в ГЕ.

Тому є актуальною тема дисертації, яка направлена на вирішення науково-прикладної задачі підвищення стабільності групових квантових стандартів у радіотехнічній системі синхронізації часу та частоти на основі розробки методу компенсації похибки від взаємодії пасивних КСЧ групового еталона.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Дослідження, результати яких знайшли відображення в дисертаційній роботі, виконувались здобувачем у межах науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДДКР): НДДКР шифр “Тополя” – “Створення робочого еталона часу і частоти Збройних сил України” та НДР шифр “Теза” – “Дослідження метрологічних характеристик вихідних та робочих еталонів військового призначення одиниць часу та частоти. Забезпечення функціонування Центру метрологічного контролю МО України” в рамках проекту “Функціонування” – Державної Програми “Створення і розвитку Державної служби єдиного часу та еталонних частот”, введеної в дію Постановою КМУ №434 від 16.07.1995 р.; НДДКР (№ держреєстрації 0108U008343) – “Створення вторинного еталона одиниць

часу і частоти на базі синтезованих рубідієвих мір частоти”, яка виконувалась у Національному науковому центрі „Інститут метрології” в межах Державної програми розвитку еталонної бази, яка затверджена Постановою КМУ №676 від 23.07.2008 р. В даних роботах автор брав участь як відповідальний виконавець.

**Мета і задачі досліджень.** *Метою роботи є підвищення точності відтворення, зберігання і передачі розміру одиниць часу і частоти груповим еталоном, що складається з КСЧ пасивного типу на парах рубідію Rb87 за рахунок компенсації їх похибок від взаємодії між собою.*

*Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні часткові задачі:*

– провести аналіз відомих методів формування групових шкал часу (ШЧ) та групових частот;

– обґрунтувати флуктуаційну математичну модель поведінки частоти групи КСЧ з урахуванням їх взаємодії шляхом удосконалення моделі системи зв'язаних осциляторів на основі урахування в ній фізичних процесів, що відбуваються в КСЧ;

– розробити метод компенсації похибки від взаємодії КСЧ групового еталона, заснований на рішенні умовно коректних задач математичної фізики – пошуку та визначення регуляризованих параметрів, які необхідні для одержання стійких оцінок поведінки повної фази (частоти) вихідних сигналів групового еталона часу і частоти (ГЕЧЧ) при ідентифікації групи вдосконаленою моделлю системи зв'язаних осциляторів;

– провести експериментальні дослідження фізичних процесів, які відбуваються в ГЕЧЧ, який складається з пасивних КСЧ, що охоплені системою взаємних зв'язів по частоті, і класифікувати їх.

**Об'єкт досліджень** – процес формування фізичної (апаратної) шкали часу в груповому еталоні часу і частоти при наявності похибки від взаємодії квантових стандартів (мір) частоти, що утворюють груповий еталон.

**Предмет досліджень** – метод формування шкали часу групового еталона, що забезпечує компенсацію похибки від взаємодії системи зв'язаних квантових стандартів (мір) частоти.

**Методи досліджень** ґрунтуються на теорії коливальних систем, теорії флуктуацій в квантових генераторах, теорії автоматичного управління, теорії сигналів, апараті інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду та методах статистичної регуляризації некоректних задач математичної фізики, комп'ютерному моделюванні з використанням сучасної системи комп'ютерної математики MATLAB, теорії обробки результатів вимірювань, теорії похибок та теорії випадкових процесів.

**Наукова новизна отриманих результатів** роботи полягає в тому, що:

1. Удосконалена флуктуаційна математична модель поведінки повної фази (частоти) ГЕЧЧ як стохастичної системи електрично зв'язаних осциляторів з близькими частотами, що, на відміну від відомих моделей, враховує взаємну кореляцію, зумовлену взаємним впливом (похибкою від взаємодії) КСЧ в групі, та дозволяє врахувати динаміку зміни систематичної і випадкової (корельованої і некорельованої) складових похибки поведінки повної фази, зумовлену нелінійними ефектами взаємодії (дістало подальший розвиток).

2. Вперше розроблено метод компенсації похибки від взаємодії КСЧ

ГЕЧЧ, що, на відміну від відомих методів групового еталонування, ґрунтується на вирішенні умовно коректних задач математичної фізики та дозволяє врахувати похибку від взаємодії за рахунок ідентифікації оптимального режиму взаємодії і невідомих параметрів флуктуаційної математичної моделі поведінки частоти (фази) вихідних сигналів КСЧ зі складу групового еталона за результатами взаємних звірень у часовій області, крім того отримані аналітичні вирази для оцінки систематичної та випадкової складової похибки формування ШЧ, зумовлені похибкою від взаємодії КСЧ зі складу групи.

3. Отримали подальший розвиток методи передаточних функцій Адамара і Аллана для оцінки спектральної щільності фазових (частотних) флуктуацій КСЧ, які відрізняються від класичних уявлень вказаних методів тим, що в них використана процедура регуляризації обертання інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду при неточно заданих правих частинах і на їх основі вперше обґрунтовані критерії ідентифікації амплітуд і частот на фоні негаусовських шумів за рахунок інтегральної апроксимації закону розподілу похибки цих процедур перетворення.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблено методичні та прикладні основи для створення якісно нових видів мобільних автоматизованих еталонних комплексів часу і частоти, в яких взаємний вплив (взаємодія) КСЧ буде компенсуватися аналітичними методами компенсації похибки від взаємодії.

2. Запропонована методика оцінки спектральних характеристик КСЧ, яку можливо використовувати в прецизійних аналізаторах спектра при вимірюванні спектральної щільності потужності фазових (частотних) флуктуацій у безпосередній близькості до носійної частоти.

3. Розроблено алгоритм функціонування відомчого вихідного еталону одиниць часу і частоти. В основу даного алгоритму формування групової шкали часу покладена модель регулярних і детермінованих складових сигналу квантових стандартів частоти, що будується на підставі математичних і фізичних досліджень системи зв'язаних осциляторів.

4. Запропоновано нове технічне рішення реалізації приймача-компаратора для використання телевізійних сигналів геостаціонарних штучних супутників Землі та розроблено практичні рекомендації з побудови елементів систем високоточної синхронізації групи квантових стандартів частоти із застосуванням сигналів наземних і космічних спільних джерел.

Основні результати досліджень впроваджені: Центральним управлінням метрології і стандартизації Збройних Сил України, в Метрологічному центрі військових еталонів Збройних Сил України та в Національному науковому центрі «Інститут метрології», що підтверджується відповідними актами.

**Достовірність і обґрунтованість отриманих наукових результатів** підтверджуються: високою відповідністю результатів натурних експериментальних досліджень на відомчому вихідному еталоні одиниць часу та частоти з теоретичними результатами; коректним використанням відомих методів теорії нелінійних коливань та математичного апарату для вирішення умовно коректних та зворотних задач математичної фізики у теоретичних дослідженнях.

**Особистий внесок здобувача.** Нові наукові результати одержані здобувачем особисто. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачу належать на-

ступні результати. В [5, 7, 9, 15, 18, 26, 27] здобувачем проведені дослідження теоретичних і експериментальних даних про флуктуації КСЧ при наявності похибки від взаємодії. В [4, 7, 8] здобувачем отримані результати теоретичного аналізу вдосконаленої флуктуаційної математичної моделі поведінки повної фази (частоти) групового еталона як стохастичної системи електрично зв'язаних осциляторів з близькими частотами. В [5, 10] здобувачем проведені дослідження сучасних стохастичних моделей групових еталонів при некомпенсованій похибці від взаємодії. При проведенні досліджень в [1, 4, 5, 6] здобувачем зроблені врахування впливу некомпенсованої похибки від взаємодії на особливості флуктуацій КСЧ, які до недавнього часу розглядалися як «аномалії». В [3, 10, 31 – 34] здобувачем проведений порівняльний аналіз відомих методів та базових математичних моделей теорії групового еталонування, умови їх застосовності для формування шкали часу групового еталона. В [7, 8] здобувачем розроблена флуктуаційна математична модель, що враховує похибку від взаємодії КСЧ в груповому еталоні. При проведенні досліджень в [13] здобувачем розроблений новий критерій ідентифікації амплітуд і частот квазіперіодичних складових флуктуацій фази, зумовлених похибкою від взаємодії, на основі аналізу похибки оцінок взаємної спектральної щільності потужності фазових (частотних) флуктуацій КСЧ, отриманих в результаті регуляризації обертаня інтегрального рівняння Фредгольма першого роду. В [23 – 25] здобувачем запропонований спосіб виділення і компенсації прихованих квазіперіодичних складових ШЧ ГЕЧЧ по оцінкам взаємної спектральної щільності потужності фазових (частотних) флуктуацій КСЧ, оснований на регуляризації процедур обертаня інтегрального рівняння Фредгольма першого роду при неточно заданих правих частинах. При проведенні досліджень в [2, 12, 17] здобувачем розроблена процедура оцінки параметрів стохастичної складової флуктуаційної математичної моделі, що враховує похибку від взаємодії КСЧ в ГЕЧЧ при формуванні ШЧ, на основі регуляризації рішення виродженої системи рівнянь, що пов'язує короткочасну нестабільність частоти кожного КСЧ в груповому еталоні з результатами їх парних звірень. В [7, 12] здобувачем запропонований метод формування ШЧ еталона часу і частоти, оснований на ідентифікації групового еталона моделлю стохастичної системи зв'язаних осциляторів з близькими частотами, яка враховує похибку від взаємодії КСЧ в ГЕЧЧ. При проведенні досліджень в [9, 22] здобувачем проведена класифікація можливих режимів взаємодії прецизійних мір частоти в ГЕЧЧ як системи зв'язаних осциляторів з близькими частотами на основі порівняльного аналізу результатів числового моделювання і експериментальних досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи представлені та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: 1-му Міжнародному форумі «Електроніка та молодь у ХХІ століті» (Харків, 1997 р.) [28]; 1-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ–2002), (Харків, 2002 р.) [22]; 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія в електроніке – 97» (Харків, 1997 р.) [19, 20]; 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірвальна техніка» (Метрологія – 99), (Харків, 1999 р.) [21]; 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірвальна техніка» (Метрологія – 2002), (Харків, 2002 р.) [23]; 4-й Міжна-

родній науково-технічній конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія – 2004), (Харків, 2004 р.) [24]; 5-й Міжнародній науково-технічній конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія –2006), (Харків, 2006 р.) [25]; 6-й Міжнародній науково-технічній конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія–2008), (Харків, 2008 р.) [27]; науковому семінарі загальноінститутських кафедр “Моделювання в військово-наукових дослідженнях”, Одеський інститут Сухопутних військ, (Одеса, 2006 р.) [26]; 2-й, 5-й, 7-й, 8-й, 9-й, 10-й науково-технічній конференціях Харківського університету Повітряних Сил “Новітні технології – захисту повітряного простору“, (Харків, 2006 р., 2009 р., 2011 р., 2012 р., 2013 р., 2014 р.) [29, 30, 31, 32, 33, 34].

**Публікації.** Основні наукові результати за темою дисертації опубліковані в 18 статтях у періодичних виданнях, які входять до переліку фахових видань України, статті [1, 2] опубліковані в журналі «Метрологія та прилади», який включено до міжнародної науково метричної бази даних Index Copernicus, видано 16 тез доповідей на наукових конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 289 сторінок. Основний обсяг дисертації міститься на 161 сторінці та має 19 ілюстрацій за текстом, 1 таблицю за текстом, у тому числі 10 ілюстрацій на 10 сторінках, 3 додатки на 104 сторінках, список використаних літературних джерел із 224 найменувань на 24 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми та сформульовані об’єкт, предмет, мета, наукова задача досліджень, показані зв’язок роботи з науковими темами і програмами, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок автора в друкованих працях із співавторами, наведені дані про апробацію, публікації і впровадження основних результатів роботи.

**У першому розділі** на основі аналізу існуючих методів і способів формування ГЕ показано, що практичне застосування в частотно-часових вимірюваннях знайшли тільки різні модифікації методу аналітичного формування середньозважених частот або ШЧ, що відноситься до класичного (традиційного) статистичного методу теорії групового еталонування.

Показано, що для розв’язання наукової задачі зменшення похибки відтворення, зберігання і передачі розміру одиниць частоти (фази) на підставі удосконалення математичних моделей ГЕ необхідно вирішити наступні взаємозалежні часткові наукові задачі:

– класифікувати фізичні процеси, що відбуваються в ГЕ, які складаються з прецизійних мір та охоплені системою взаємних зв’язків по частоті, на основі експериментальних досліджень;

– ідентифікувати квазіперіодичні складові ходу ШЧ ГЕ, зумовлені взаємодією прецизійних мір у методі формування ШЧ ГЕ на основі стохастичної моделі системи зв’язаних осциляторів;

– ідентифікувати стохастичні складові ходу ШЧ ГЕ, зумовлені взаємодією прецизійних мір у методі формування ШЧ ГЕ на основі стохастичної моделі систе-

ми зв'язаних осциляторів;

– визначити умови застосовності методу формування ШЧ ГЕ на основі стохастичної моделі системи зв'язаних осциляторів.

**Другий розділ** присвячений ідентифікації основних типів флуктуацій частоти вихідного сигналу КСЧ та виявлення способів їх відображення в математичній моделі квазігармонійного сигналу [7, 8]. Показано, що найбільш ємною з точки зору класифікації усіх видів флуктуацій частоти і визначення ступеня їх впливу на стабільність вихідного сигналу і, як наслідок, на точність формування ШЧ, є спектральна щільність потужності фазових флуктуацій (СЦПФФ).

Способи усунення або зменшення технічних шумів істотно простіше способів усунення стохастичних флуктуацій. Для цього їх потрібно лише виділити і класифікувати. Однак використання у якості характеристики оцінок середніх квадратичних відхилень частоти не дозволяє цього зробити. У цьому випадку використовуються спектральні методи аналізу сигналів [11].

Виділення, класифікація і зменшення впливу таких паразитних явищ, як терморезонанс резонатора квантового автогенератора, биття близьких частот групи мір, що знаходяться всередині однієї системи і мають частоти, відхилені від частоти пілот-сигналу на  $10^{-3} \dots 10^{-6}$  Гц, вкрай утруднені. Рішення задачі виявлення періодичностей у смузі аналізу менше 1 Гц від номінального значення в частотній області пропонується здійснювати за результатами вимірювань у часовій області (опосередковані вимірювання).

Зв'язок між часовою і частотною областями може бути заданий у виді лінійного інтегрального рівняння Фредгольма першого роду:

$$\sigma^2(N, T, \tau) = \int_0^{\infty} |H_{\text{цф}}(N, F, \tau)|^2 |H_{\text{и}}(F)|^2 S_{\varphi}(F) dF, \quad (1)$$

де  $S_{\varphi}(F)$  – оцінка однобічної спектральної щільності потужності фазових флуктуацій (СЦПФФ);  $H_{\text{и}}(F)$  – частотна характеристика вимірювача (компаратора), яка еквівалентна фільтрові нижніх частот з частотою зрізу  $f_c$ ;  $H_{\text{цф}}(N, F, \tau)$  – частотна характеристика цифрового фільтра, реалізованого при визначенні оцінки дисперсії  $\sigma^2(N, T, \tau)$  для кількості вимірів в одній вибірці  $N$  й інтервалі часу виміру  $\tau$  ( $T$  – інтервал часу між сусідніми вимірами).

Задача виділення схованих періодичностей у фазових флуктуаціях прецизійних мір частоти на основі визначення спектральних характеристик фазового шуму по обмірюваних або аналітичних залежностях нестабільності частоти (дисперсія) у часовій області є зворотною задачею для рівняння (1). При рішенні зворотної задачі поряд із проблемами збіжності виникають труднощі, пов'язані з її некоректністю. Пропонується оцінку “фонової” частини енергетичного спектра на основі відомих апріорних даних [11, 14] шукати у вигляді функції:

$$\hat{S}_{\varphi}(F) = \sum_{l=0}^{L=4} s_l F^{-l}, \quad (2)$$

де  $s_l$  – коефіцієнти, що кількісно визначають вид фазових шумів.

Збіжність інтегрального рівняння (1) на нижній межі інтегрування при застосуванні моделі (2) поводження “фонової” частини СЦПФФ накладає обме-



ження на вид частотної характеристики  $H_{\text{цф}}(N, F, \tau)$  і, відповідно, на вибір виразів для одержання оцінок  $\sigma^2(N, T, \tau)$ . Для задоволення цього обмеження необхідно, щоб  $\lim_{F \rightarrow 0} |H_{\text{цф}}(N, F, \tau)|^2 \rightarrow 0^\gamma, (\gamma \geq 4)$ . Для всіх існуючих видів оцінок дисперсії фазових флуктуацій зазначена вимога виконується. Однак оптимальним для задач виділення схованих періодичностей є застосування частотних характеристик дисперсії Аллана і зваженої за біноміальним законом дисперсії Адамара [14].

Показано, що задачу виділення схованих періодичностей у фазових флуктуаціях прецизійних мір частоти можна розбити на наступні етапи [11]:

- оцінка “фонової” частини спектральної щільності потужності;
- оцінка СЦПФФ із максимальним розрізненням по частоті аналізу;
- статистична процедура виділення спектральних ліній періодичностей з максимальним дозволом по частоті аналізу на рівні “фонової” частини СЦПФФ.

При цьому рішення задачі виділення схованих періодичностей зведеться до наступної послідовності операцій.

1. Визначення оцінки “фонової” частини СЦПФФ виду (1) за допомогою дисперсії Аллана. З урахуванням виразів (1) і (2) зв'язок між обмірюваними статистиками  $\sigma^2(2, T, \tau)$  й оцінками  $s_l$  коефіцієнтів розкладання “фонової” частини СЦПФФ представляється у виді векторно-матричного рівняння

$$\vec{S} = [G^T \Sigma^{-1} G]^{-1} G^T \Sigma^{-1} \langle \vec{D}_A \rangle, \quad (3)$$

де  $\vec{S} = [s_l]$  – вектор шуканих коефіцієнтів розкладання спектральної щільності в степеневий ряд розмірністю  $(5 \times 1)$ ;  $\vec{D}_A = [\sigma^2(2, T, \tau_i)]$  – вектор статистик дисперсії Аллана ( $N = 2$ ), обмірюваних при різних  $\tau_i$  – характерних часах вимірювань ( $i = 1 \dots V$ );  $G = [g_{il}] = \int_0^{f_c} |H_A(2, F, \tau_i)|^2 F^{2-l} dF$  – матриця вагових коефіцієнтів розмірністю  $(V \times 5)$  [11];  $\Sigma$  – коваріаційна матриця адитивних шумів компаратора, що виникають при вимірюванні статистик  $\sigma^2(2, T, \tau)$ , розмірністю  $(V \times V)$ .

Для одержання значимих оцінок коефіцієнтів  $s_l$  характерний час вимірювань  $\tau_i$  повинен вибиратися таким чином, щоб значення  $1/\tau_i$  перекривали діапазон частот, на яких є вагомі внески всіх складових “фонової” частини СЦПФФ.

2. Оцінка СЦПФФ із максимальним розрізненням по частоті аналізу за допомогою зваженої за біноміальним законом дисперсії Адамара  $\sigma_{\text{Н,ВС}}^2(N, T, \tau)$ . Користуючись селективними властивостями  $\sigma_{\text{Н,ВС}}^2(N, T, \tau)$  і наявністю фільтра нижніх частот компаратора шляхом варіації часу вимірювань  $\tau$  за визначеним законом [11] інтегральне рівняння (1) зводиться до спільної системи лінійно незалежних алгебраїчних рівнянь, розв'язання якої у векторному

вигляді запишемо як

$$\bar{S}_\varphi = A^{-1} \langle \bar{D}_{H,BC} \rangle, \quad (4)$$

де  $\bar{S}_\varphi = [S_\varphi(F_k)]$  – вектор розмірністю  $(M+1)$  шуканих значень СЦПФФ у  $M+1$  вузлах сітки частот  $F_k = (2k+1)/\tau_{\max}$  (інтервал  $\tau_{\max}$  дорівнює половині інтервалу спостереження  $T$  за умови проведення суміжних вибірок),  $k=0\dots M$  (параметр  $M = \text{ent}[(\tau_0 f_c + 1)/2]$ );  $A = [a_{ij}]$  – матриця розмірністю  $(M+1) \times (M+1)$ , елементи  $a_{ij}$  якої можуть приймати значення 0 або 1, при цьому всі елементи головної діагоналі рівні 1, всі елементи, розташовані нижче головної діагоналі рівні 0, а одиничні елементи, розташовані вище головної діагоналі, проріджені нулями за правилом проріджування резонансних частот, отриманому для додаткових цифрових фільтрів Адамара [11, 14];  $\langle \bar{D}_{H,BC} \rangle$  – вектор розмірністю  $(M+1)$ , елементи якого визначаються за результатами вимірів дисперсії Адамара  $\sigma_{H,BC}^2(N, T, \tau_k)$  і задаються виразом  $[d_k] = \left[ \frac{\tau_k^3 f_0^2 [(N+1)!]^2}{2(2N+2)!} \langle \sigma_{H,BC}^2(N, \tau_k) \rangle \right]$ , де  $f_0$  – номінальне значення частоти КСЧ.

3. Перевірка адекватності моделі виду (2), що описує “фонову” частину СЦПФФ досліджуваних прецизійних мір частоти на основі аналізу вектора залишків. Елементи вектора залишків мають такий вигляд

$$\Delta S_\varphi(F_k) = S_\varphi(F_k) - \bar{S} [F_k^0, F_k^{-1}, \dots, F_k^{-4}]^T. \quad (5)$$

При правильному виборі структури моделі (2) і її адекватності результатам вимірювань вектор залишків  $\Delta \bar{S}_\varphi = [\Delta S_\varphi(F_k)]$  буде визначатися тільки похибкою оцінки СЦПФФ із максимальним розділенням по частоті аналізу.

Основними видами похибок оцінки СЦПФФ із максимальним розрізненням по частоті аналізу будуть: похибка квантування вимірювача інтервалів часу компаратора, похибка, зумовлена неідеальністю амплітудно-частотної характеристики компаратора, що обмежує смугу аналізу СЦПФФ, і похибка, зумовлена неідентичністю смуг пропускання еквівалентних фільтрів Адамара для різних значень параметра  $\tau_k$ .

За умови визначеності амплітудно-частотної характеристики компаратора, з припущенням про рівномірність розподілу щільності імовірності похибки квантування вимірювача інтервалів часу, отримані аналітичні співвідношення для оцінок перших двох типів похибок:

$$\widehat{\Delta \bar{S}}_\varphi = A^{-1} (\Delta \bar{D}_{KB} + \Delta \bar{D}_{ACH}), \quad (6)$$

де  $\Delta \bar{D}_{KB} = [\Delta \bar{D}_{KB,k}] = \left[ \frac{\tau_k f_0^2 T_{сч}^2}{6\mu_{KB}^2} \right]$ ,  $\mu_{KB}$  – узагальнений коефіцієнт компарування компаратора,  $T_{сч}$  – роздільна здатність за часом вимірювача інтервалів часу

$$\text{компаратора; } \Delta \bar{D}_{\text{АЧХ}} = [\Delta D_{\text{АЧХ},k}] = \left[ \frac{S_{\varphi}(F_M)(2N+2)!}{\tau_k[(N+1)!]} \sum_{m=M+1}^{\infty} |H_m(F_m)|^2 \right].$$

Щодо третьої складової похибки можна стверджувати, що її можна звести до нуля шляхом вибору числа  $N$  у виразі (1) таким чином, щоб ефективні значення площ між функціями частотних характеристик усієї системи еквівалентних фільтрів Адамара в смузі резонансу  $F_k$  і віссю частот збігалися.

Проведений числовий аналіз похибок оцінки СЦПФФ дозволяє стверджувати, що при правильному виборі структури моделі (2) і оцінки параметрів коваріаційної матриці адитивних шумів компаратора  $\Sigma$  математичне очікування залишку  $M\{\Delta \bar{S}_{\varphi}\} = 0$ , а оцінка дисперсії  $D\{\Delta \bar{S}_{\varphi}\} \approx D\{\Delta \hat{S}_{\varphi}\}$  [11, 13].

4. Виявлення спектральних ліній, відповідних схованим періодичним складовим, шляхом застосування при аналізі вектора залишків  $\Delta \bar{S}_{\varphi}$  статистичного критерію ідентифікації значимих періодичностей [13].

5. Компенсація виявлених спектральних ліній, відповідних схованим періодичним складовим, методом розширеного фільтра Калмана. Пропонується варіант аналітичного рішення рівнянь Рикаті для коваріаційної матриці, що дозволяє побудувати адаптивний алгоритм спостереження за нестационарним полігармонійним процесом на тлі шумів на тривалих інтервалах часу формування ШЧ [7].

Вірогідність і працездатність запропонованого способу виділення схованих періодичностей підтверджується результатами натурних експериментів із групою рубідієвих стандартів частоти [11, 13].

**У третьому розділі** розроблено метод виявлення, виділення і компенсації флуктуації частоти і фази мір у груповому еталоні, що мають квазіперіодичний і стохастичний корельований тип прояву з позицій поведінки групи як багаточастотної автоколивальної системи [7, 12].

Відносно повільно мінливої фази кожного генератора в групі (при наявності електричних зв'язків) можна записати наступне диференціальне рівняння:

$$\dot{\varphi}_i = \Delta_{i0} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{\alpha_{ik}}{2} \frac{A_k}{A_i} \cos[\Psi_{ik}(t) + \varphi_{ik}], \quad (7)$$

де  $\Delta_{i0} = \omega_i - \omega_0$  – різниця частот між  $i$ -м осцилятором (мірою) і його номінальним значенням;  $\alpha_{ik}$  – коефіцієнти зв'язку між  $i$ -ю і  $k$ -ю мірами;  $A_k, A_i$  – амплітуди коливань  $k$ -ї та  $i$ -ї міри;  $\Psi_{ik}(t) = \varphi_i(t) - \varphi_k(t)$  – різниця фаз коливань, що генеруються  $i$ -ю і  $k$ -ю мірами,  $n$  – число мір у групі.

Реально в процесі взаємних звірень мір у групі вимірюваними (з похибкою, обумовленою шумами компаратора) є лише різниці  $\Psi_{ik}(t)$ , щодо яких з урахуванням (7) можна записати наступне рівняння

$$\dot{\Psi}_{ik}(t) = \Delta_{ik} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left( \frac{\alpha_{ij}}{2} \frac{A_j}{A_i} \cos[\Psi_{ij}(t)] \right) - \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^n \left( \frac{\alpha_{kp}}{2} \frac{A_p}{A_k} \cos[\Psi_{kp}(t)] \right), \quad (8)$$

де  $\Delta_{ik} = \Delta_{i0} - \Delta_{k0}$ .

Показано, що з урахуванням близькості між собою власних резонансних частот всіх мір у групі в залежності від співвідношень значень  $\Delta_{ik}$  і  $\frac{\alpha_{ik}}{2} \frac{A_k}{A_i}$  можливі різні типи рішення даної системи, що визначають відповідні режими роботи системи зв'язаних мір [9, 12, 22]:

$$\Delta_{ik} > \frac{\alpha_{ik}}{2} \frac{A_k}{A_i} \text{ – режим биттів несинхронних мір,}$$

$$\Delta_{ik} \approx \frac{\alpha_{ik}}{2} \frac{A_k}{A_i} \text{ – режим “дивного аттрактора”,}$$

$$\Delta_{ik} < \frac{\alpha_{ik}}{2} \frac{A_k}{A_i} \text{ – режим взаємної синхронізації (затягування частоти) де-}$$

якої частини мір (або всіх мір).

Режим дивного аттрактора привносить в систему додатковий шум. Не кращим з цієї ж точки зору є режим взаємної синхронізації мір, що входять до складу групи, оскільки наявність у системі шумів призводить до спонтанних зривів взаємної синхронізації. Наявність таких зривів унеможлиблює побудову математичної моделі стану ГЕ, яка змогла б з необхідною точністю визначати і прогнозувати поточні значення ШЧ і еталонної частоти.

Тому впливає рекомендація: при експлуатації еталона, створеного на основі групи КСЧ, доцільно розводити їхні частоти на відстань, що більш ніж у  $n$  разів перевищує смугу взаємної синхронізації кожної пари мір. Це, по-перше, запобігає взаємній синхронізації мір і, як наслідок, наявність спонтанних стрибків частоти при зривах синхронізації, і, по-друге, не породжує в спектрі вихідного сигналу яскравих ліній на комбінаційних частотах (стосовно до різниць частот).

Розведення частот сигналів мір частоти в групі на відстань, яка перевищує смугу захоплення частот, хоча і призводить до модуляції частоти вихідного сигналу кожної міри обмеженим набором квазігармонійних сигналів, проте дозволяє прогнозувати результуюче відхилення частоти й у подальшому компенсувати його. У цьому випадку з урахуванням того, що в ГЕ в стаціонарному режимі амплітуди коливань на виході всіх мір постійні  $A_k \approx A_i$ , рівняння стану повільно мінливих фаз кожної міри (7) істотно спрощується:

$$\varphi_i = \Delta_{i0} t + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{\alpha_{ik}}{2\Delta_{ik}} \sin(\Delta_{ik} t + \varphi_{ik}) + C, \quad (9)$$

де  $C$  – константа інтегрування (у ГЕ часу і частоти визначає початкове відхилення ШЧ від еталонного значення).

Для побудови моделі поведінки мір у ГЕ необхідно враховувати, що поряд з детермінованими процесами в ній присутні і випадкові складові  $X(t)$  (як адитивні члени в рівнянні (9)).

Існуючі методи вимірювання характеристик прецизійних мір дозволяють одержувати тільки різницеві фази  $\Psi_{ik}(t)$  (див. рівняння (8)) між мірами [1, 2, 21]. Тому для ідентифікації ГЕ стохастичною моделлю системи зв'яза-

них осциляторів необхідний ще один незалежний реперний сигнал з відомими характеристиками, який дозволяє перетворити систему, що не спостерігається, на систему, що спостерігається [7, 12, 17]. Як реперний сигнал для ГЕ доцільно використовувати еталонні сигнали частоти і часу (ЕСЧЧ), передані різними службами часу і частоти [1, 21].

У дискретному часі вектор стану девіації частоти ГЕ, обумовлений рівнянням (1) і доповнений скалярним рівнянням поточного стану фази ЕСЧЧ, можна записати у вигляді

$$\bar{\varphi}(k) = \bar{X}(k) + \bar{U}(k), \quad (10)$$

де  $\bar{X}(k)$  – вектор, елементи якого  $\bar{\varphi}_1(k), \dots, \bar{\varphi}_n(k), \bar{\varphi}_{\text{ПС}}(k)$  є середнім значеннями випадкових складових фази між двома сусідніми моментами вимірювань ( $t_k$  і  $t_{k-1}$ );  $\bar{\varphi}_{\text{ПС}}(k)$  – поточне середнє значення фази прийнятого сигналу

ЕСЧЧ;  $\bar{U}(k)$  – вектор, елементи якого  $\tilde{\varphi}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n A_j \sin(\Delta_{ij}t + \varphi_{ij})$ , а останній еле-

мент  $\tilde{\varphi}_{\text{ПС}}(k)$  – поточне середнє значення повільно мінливої складової фази ЕСЧЧ.

Вектор випадкових складових відтворення фаз на локальних інтервалах часу при реалізації одночасно проведених парних звірень групи з  $n$  мір за допомогою  $m$  компараторів має вигляд:

$$\bar{X}(k) = \Phi(k, k-1)\bar{X}(k-1) + \bar{\xi}(k),$$

де  $\bar{\xi}(k)$  – вектор адитивних шумів, що привносяться в систему (шуми елементів схеми мір і шуми на трасі проходження ЕСЧЧ), з нормальним розподілом, нульовим середнім і позитивно визначеною коваріаційною матрицею  $\Sigma(k)$ ;  $\Phi(k, k-1)$  – перехідна матриця розмірністю  $(n+1) \times (n+1)$ , елементи якої визначають у лінійному наближенні ступінь взаємного впливу елементів вектора  $\bar{X}(k)$ .

У дискретному часі, припускаючи адитивність шуму компараторів, вектор вимірів системи має такий вигляд

$$\bar{Z}(k) = H\bar{\varphi}(k) + \bar{\eta}(k), \quad (11)$$

де  $\bar{Z}(k)$  – результати вимірювань компараторів;  $\bar{\eta}(k)$  – шуми засобів звірень (компараторів);  $H$  – передаточна матриця процесу парних звірень групи мір з ЕСЧЧ, яка має розмірність  $(m \times n + 1)$ . На підставі численних експериментальних даних можна вважати, що вектор  $\bar{\eta}(k)$  має нормальний розподіл з нульовим середнім і позитивно визначеною коваріаційною матрицею  $R$ . Показано, що матриці  $H$ ,  $R$  можна визначити під час попередньої атестації системи внутрішніх та зовнішніх звірень ГЕ і в процесі роботи алгоритму припускати заданими й незмінними.

Адаптивний рекурентний алгоритм оцінювання поточного стану ШЧ ГЕ будується на основі методу фільтра Калмана. Модель спостереження задається рівнянням (10), а модель вимірювань – рівнянням (11).

Для ініціалізації фільтра Калмана необхідно визначити початкові умови  $\hat{\bar{X}}(k_0) = \bar{q}_0$  і  $\hat{P}(k_0, k_0) = P_0$ ,  $\hat{\bar{U}}(0)$ , крім того, необхідно одержувати оцінки матриць  $\Phi(k, k-1)$ ,  $\Sigma$ ,  $\bar{U}(k)$  і мати апріорну інформацію про матриці  $H$ ,  $R$ .

Отримано рішення задачі ідентифікації повільних девіацій фази  $\bar{U}(k)$  в режимі біттів (визначення амплітуд  $A_j$ , частот  $\Delta_{ij}$  і фаз  $\varphi_{ij}$ ) [11, 13]. Для ідентифікації матриць  $\Phi(k, k-1)$  та  $\Sigma$  при наявності взаємодії стохастичних складових вихідних сигналів мір у групі і зовнішньому реперному сигналі розроблена процедура, що швидко сходиться [18].

Відповідна оцінка  $\hat{\bar{X}}(k_0)$  початкового значення вектора  $\bar{X}(k)$  визначається методом апостеріорної імовірності (MAI) [12]. При цьому  $\bar{\mu}_{X_0} \approx \bar{U}(k_0)$ , а коваріаційна матриця  $V_{X_0}$  визначається рівнянням  $V_{X_0} = \hat{\Phi}^T \Sigma \hat{\Phi}$  і використовується як початкове значення коваріаційної матриці  $P(k_0, k_0)$ . Структурна схема методу компенсації похибки від взаємодії КСЧ приведена на рис. 1.

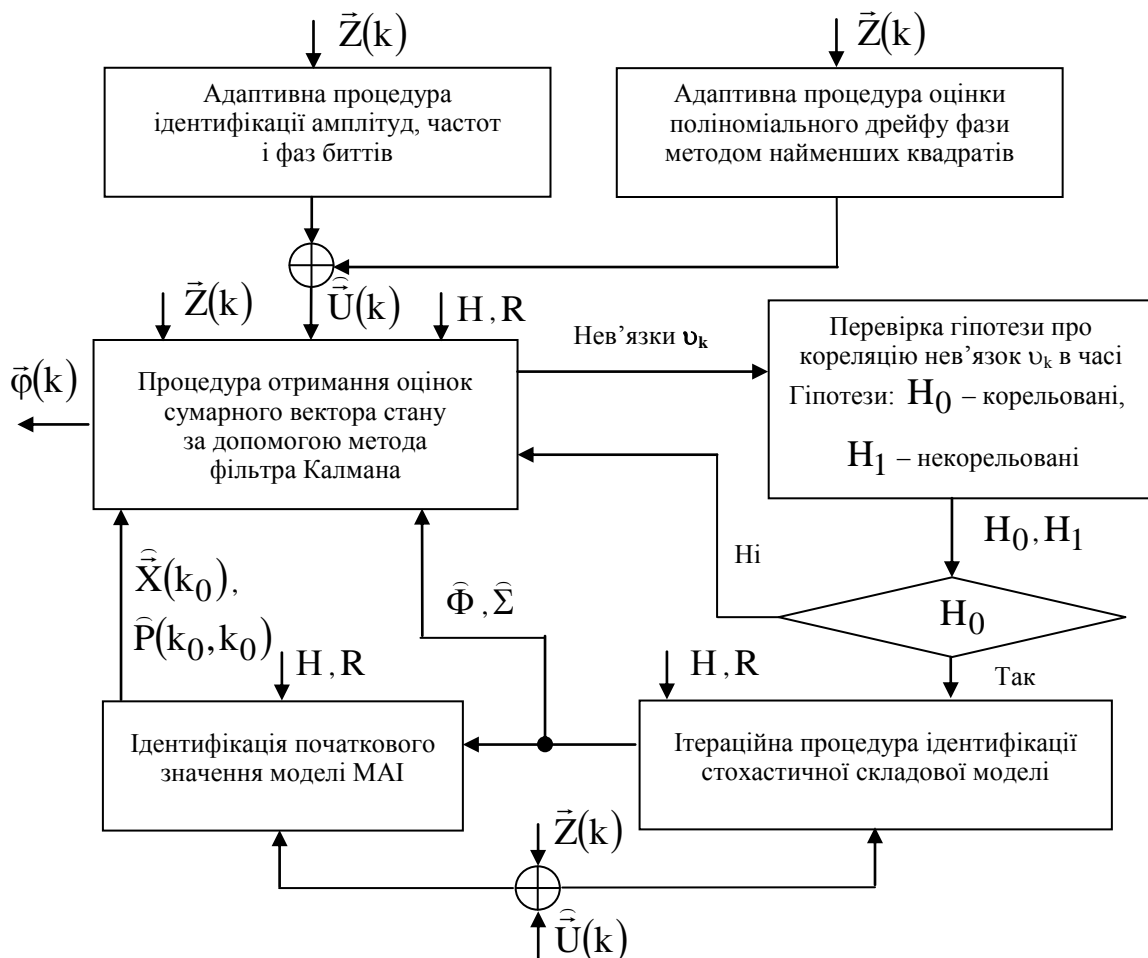


Рис. 1 Структурна схема методу компенсації похибки від взаємодії КСЧ при формуванні ШЧ ГЕЧЧ

Розроблений у дисертаційній роботі метод, на відміну від відомих методів групового еталонування, враховує процеси взаємодії мір між собою і може знайти застосування у вторинних еталонах часу і частоти, що функціонують в автономному режимі на тривалих інтервалах часу.

У четвертому розділі проведено дослідження можливостей розробленого

методу. З цією метою отримано лінеаризоване рівняння стану фазових флуктуацій групового еталону та рівняння їх спостереження на обмеженому інтервалі часу за допомогою компараторів. При цьому виділено члени суми, що визначають стохастичну поведінку фазових флуктуацій КСЧ та вплив детермінованих періодичних збуджень, які можуть бути зумовлені проникненням гармонік мережі живлення, періодичною девіацією частоти дослідного сигналу за рахунок биття частот зв'язаних між собою квантових автогенераторів при наявності в них терморезонансу резонаторів та ін. [27].

За допомогою розроблених у другому розділі процедур проведено дослідження тонкої структури СЩПФФ групи прецизійних мір частоти та виявлено наступні явища:

- стан групового еталону з «малими» значеннями різниць частот КСЧ зі складу групи еквівалентний режиму взаємодії системи зв'язаних осциляторів з великими значеннями коефіцієнтів зв'язку. Аналіз СЩПФФ в такому стані показує, що в системі з'являються спектральні лінії на комбінаційних частотах, які досить суттєво збуджують спектральну щільність варіацій фаз вихідних сигналів КСЧ. Зведення частот КСЧ, що знаходяться в складі групи, призводить до появи в їхніх вихідних сигналах додаткових шумоподібних складових, які за своїм спектральним складом наближаються до марківського випадкового процесу;

- режим биття еквівалентний частотній модуляції вихідних сигналів  $i$ -ї та  $k$ -ї мір частоти зі складу системи зв'язаних осциляторів квазігармонійним сигналом із частотою, яка дорівнює різниці частот  $\Delta_{ik}$ . При розведенні частот сигналів, генерованих КСЧ, що працюють у складі групи, на відстань, яка перевищує смугу захоплення частот в СЩПФФ можливо виявити  $n(n-1)$  яскравих спектральних ліній. Оскільки дані спектральні лінії як правило не мають кратності частот (іраціональні співвідношення різницевої частоти), то зовнішні прояви даного явища будуть еквівалентні поводженню в часі шумів типу випадкових блукань. Саме вони є причиною наявності в загальному спектрі складових, обернено пропорційних четвертій ступені частоти відстройки в загальному функціональному поводженні СЩПФФ. Систематична складова похибки визначення дійсного значення частоти яскравих ліній, що обумовлені режимом биття, залежить як від тривалості процесу виміру частоти КСЧ, так і від початкового моменту вимірів, оскільки ця частота не є стаціонарною.

В дисертаційній роботі наведені результати досліджень впливу взаємних зв'язків між звірюваними мірами на їх метрологічні характеристики. Поряд с детермінованими процесами в КСЧ урахувувались і випадкові складові (шуми).

Результати числового моделювання поведінки різниці фаз  $\Phi$  моделі двох зв'язаних осциляторів при різних співвідношеннях параметрів  $b/a$  ( $a$  – відносна різниця власних значень резонансних частот звірюваних мір,  $b$  – параметр, що визначає зв'язок між звірюваними мірами) і  $\sigma/a$  ( $\sigma^2$  – дисперсія нормального білого шуму з нульовим математичним очікуванням і кореляційною функцією  $R(\tau) = \sigma^2 \delta(\tau)$ ) представлені на рис. 2. Поведінка періодичної складової  $\Phi$  при взаємозв'язку між мірами в режимі биттів, при відсутності шуму (крива 1) у при наявності шуму (крива 2) представлена на рис. 3.

Результати числового моделювання поведінки двох електрично зв'язаних

осциляторів при наявності в системі фазового шуму показують: поведінка фази  $\Phi$  в цьому випадку буде залежати не тільки від співвідношення  $b/a$ , але і від співвідношення  $\sigma/a$ .

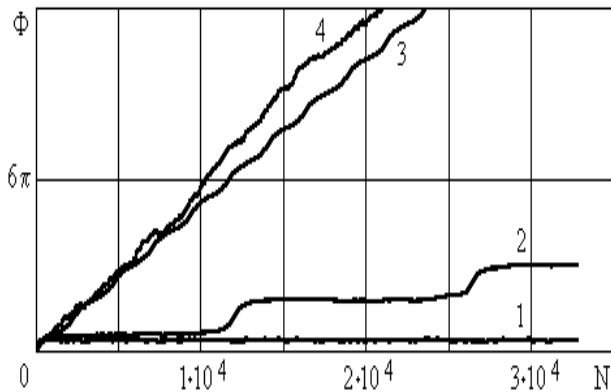


Рис. 2 Результати числового моделювання поведінки різниці фаз  $\Phi$  моделі двох зв'язаних осциляторів при різних співвідношеннях параметрів  $b/a$

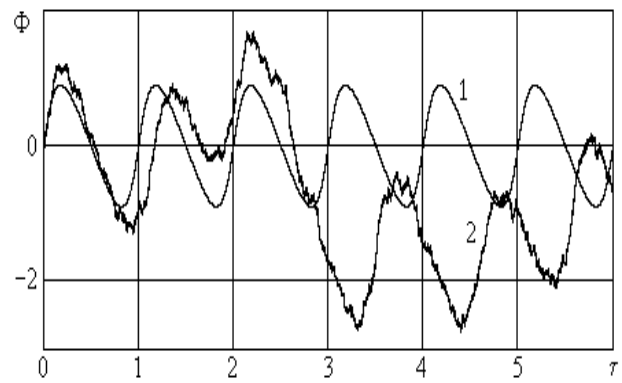


Рис. 3 Поведінка періодичної складової  $\Phi$  при взаємозв'язку між мірами в режимі биттів: 1 – при відсутності шуму; 2 – при наявності шуму

Залежності від співвідношення параметрів  $b/a$  і  $\sigma/a$  (див. рис 4) системі зв'язаних осциляторів при наявності адитивного фазового шуму властиві наступні режими:

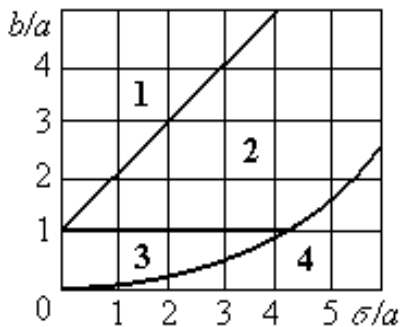


Рис. 4 Режими системи зв'язаних осциляторів при наявності адитивного фазового шуму

- режим жорсткої синхронізації (область 1 на рис. 4);
- режим синхронізації з наявністю стрибкоподібних змін різниці фаз, що виникають у випадкові моменти часу (область 2 на рис. 4);
- режим биттів (область 3 на рис. 4);
- випадковий процес з лінійним ростом різниці фаз (область 4 на рис. 4).

Експериментальні дослідження проводились для групи однотипних рубідієвих КСЧ (типу СЧВ-74) шляхом їх взаємних звірень за допомогою частотних компараторів (типу Ч7-39) в режимі вимірювання різниці часу " $\Delta t$ ". Час вимірювань  $\tau_{\text{и}} = 1$  с, кількість усереднень вибрано рівним 1, інтервал спостереження складав 24 години. На рис. 5,6 представлені результати вимірювань різниці моментів «нуль перетинань» сигналів частотою 5 МГц від першого і другого стандартів СЧВ-74, а також першого і третього стандартів СЧВ-74, що входять до складу групової міри.

Поведінка різниці фаз перших двох звірюваних стандартів, осцилограма якої приведена на рис. 5, відповідає режиму биттів (область 3 на рис. 4).

У відповідності з видом наведеної на рис. 6 осцилограми різниці фаз першого і третього стандартів можна зробити висновок, що їх взаємодія відповідає режиму синхронізації з наявністю стрибкоподібних змін різниці фаз (область 2 на рис. 4).

Порівняння результатів числового моделювання (рис. 2) та натурального ек-



сперименту (рис. 5 та рис. 6) дозволяє зробити висновок про близькість результатів теоретичних і експериментальних досліджень взаємодії рубідієвих мір частоти в групі.

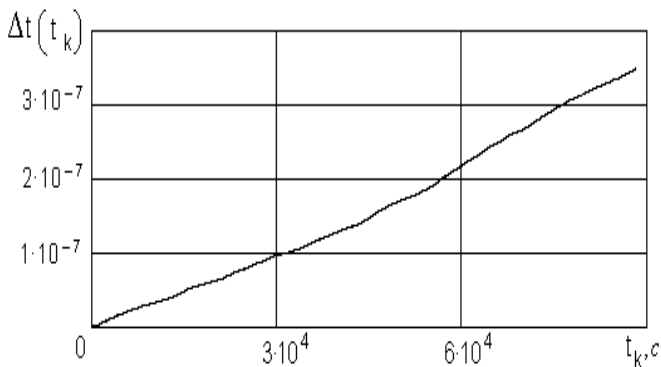


Рис. 5 Результати експериментальних досліджень поведінки різниці фаз двох КСЧ в режимі биттів

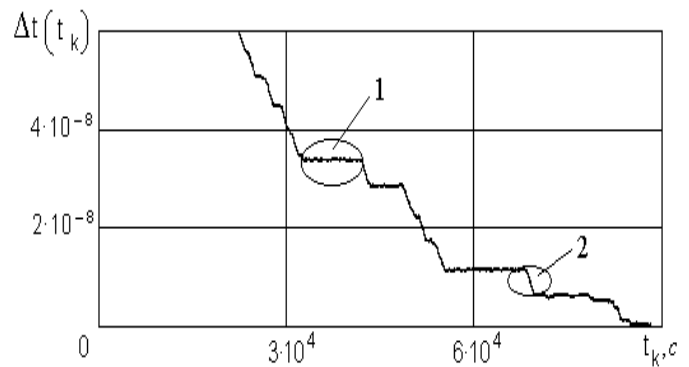


Рис. 6 Результати експериментальних досліджень поведінки різниці фаз двох КСЧ в режимі синхронізації

Показано, що використання стохастичної системи зв'язаних осциляторів як математичної моделі стану ГЕ дозволяє урахувати явища, зумовлені взаємодією прецизійних мір при їх об'єднанні в групу [7].

## ВИСНОВКИ

Дисертація є дослідженням, у якому отримано нове рішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення стабільності групових квантових стандартів у радіотехнічній системі синхронізації часу та частоти за рахунок запровадження методу компенсації похибки від взаємодії пасивних КСЧ при об'єднанні їх в групу. Даний метод для значень коефіцієнтів електричного зв'язку КСЧ  $\geq 0,01$ , при яких відомі методи групового еталонування не працюють, дозволяє отримати оцінку дисперсії шумів кожного КСЧ за результатами парних звірень з відносною похибкою визначення  $< 5\%$ . При цьому отримані наступні нові результати.

*В області теорії:*

1. Удосконалена флуктуаційна математична модель поведінки повної фази (частоти) ГЕЧЧ як стохастичної системи електрично зв'язаних осциляторів з близькими частотами. Дана модель дозволила виявити, що для різних типів пасивних КСЧ характерна наявність загальної фундаментальної закономірності: відсутність можливості компенсувати похибку від взаємодії тільки апаратними методами. Це зумовлено тим, що такі квантові системи характеризуються високою еквівалентною добротністю  $\sim 10^6 \div 10^9$  і відносним відхиленням частоти від номінального значення порядку  $10^{-12} \div 10^{-14}$  та, відповідно, навіть при будь-якому малому зв'язку (взаємозв'язку) буде відбуватися повний обмін енергією між КСЧ в процесі їх звірення, що накладатиме свій відбиток на їх метрологічні характеристики.

2. Розроблено теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації нового класу математичних моделей ГЕЧЧ, що ґрунтуються на представленні групи як системи зв'язаних осциляторів. Запропоновано метод компенсації похибки від взаємодії КСЧ ГЕЧЧ, що ґрунтується на вирішенні умовно коректних задач математичної фізики та дозволяє врахувати похибку від взаємодії

за рахунок ідентифікації оптимального режиму взаємодії і невідомих параметрів флюктуаційної математичної моделі поведінки частоти (фази) вихідних сигналів КСЧ зі складу групового еталона за результатами взаємних звірень у часовій області, крім того отримані аналітичні вирази для оцінки систематичної і випадкової складової похибки формування ШЧ, зумовлені похибкою від взаємодії КСЧ зі складу групи.

3. Отримали подальший розвиток методи передаточних функцій Адамара і Аллана для оцінки спектральної щільності фазових (частотних) флюктуацій КСЧ. Це дозволило визначати амплітуди прихованих періодичностей в діапазоні частот аналізу від  $10^{-4}$  Гц до 1 Гц відносно номінального значення частоти КСЧ з відносною похибкою по амплітуді  $<1\%$ . При цьому похибка визначення центральної частоти квазіперіодичної складової не перевищує смуги розмиття СЩПФФ, а поріг визначення прихованої періодичності на фоні кольорових шумів при довірчій імовірності 0,99 не перевищує порогу статистичного критерію «трьох сігм».

*В області практичних розробок та експериментальних досліджень:*

1. Розроблено практичні рекомендації з реалізації обчислювальної схеми методу компенсації похибки від взаємодії КСЧ ГЕЧЧ, яка реалізована у вигляді методичної інструкції Міністерства Оборони України – МІ МО 29-2003 „Методика повірки робочих еталонів військового призначення першого розряду одиниць часу і частоти”.

2. Запропоновані методичні та прикладні основи для створення якісно нових видів мобільних автоматизованих еталонних комплексів часу і частоти, які реалізовані у вигляді методичної інструкції Міністерства Оборони України – МІ МО 25-2002 „Методика звірення вихідного еталона військового призначення одиниць частоти і часу з Державним еталоном за допомогою приймача сигналів супутникової радіонавігаційної системи”.

3. Розроблено алгоритм функціонування відомчого вихідного еталону одиниць часу і частоти, якій дозволяє отримати відносну систематичну зміну частоти на інтервалі спостереження 10 діб на рівні  $\pm 1,4 \cdot 10^{-13}$  та середньоквадратичну відносну випадкову варіацію частоти за 1 добу на рівні  $\leq 2,6 \cdot 10^{-12}$ .

4. Запропоновано нове технічне рішення реалізації телевізійного приймача-компаратора для використання телевізійних сигналів геостаціонарних супутників Землі. Експериментально підтверджено, що даний пристрій дозволяє на носійній частоті сигналу супутника 3,72 ГГц на інтервалі спостереження  $1,5 \cdot 10^3$  с отримати оцінку відносного відхилення частоти опорного КСЧ із складу ГЕ на рівні  $\pm 1 \cdot 10^{-12}$ .

*Наукові та прикладні результати досліджень*, що отримані в дисертації, доцільно використовувати: в метрологічних та інших організаціях при проведенні робіт по повірці (атестації) КСЧ груповим способом; в науково-дослідних організаціях для обґрунтування напрямків удосконалення КСЧ, оцінки їх основних похибок, прогнозування метрологічної надійності та поведінки метрологічних характеристик засобів вимірювань часу та частоти; на підприємствах приладобудівної промисловості при створенні нового покоління повірочних установок з поліпшеними метрологічними та технічними характеристиками; у вищих навчальних закладах приладобудівних спеціальностей.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Нарезний А. П. Устройство поддержки синхронизации по телевизионному сигналу для цифровой сети связи АСУ ТП / Т. А. Гриненко, А. А. Костыря, А. П. Нарезний // Метрологія та прилади. – 2014. – № 3. – С. 44 – 50.
2. Нарезний О. П. Кореляційно-екстремальний метод вимірювання кута фазового зсуву між двома гармонійними сигналами / Ю. І. Євдокименко, О. П. Нарезний, М. І. Світенко // Метрологія та прилади. – 2013. – № 3(41). – С. 57 – 60.
3. Нарезний О. П. Математична модель територіально розподіленого еталону часу та частоти військового призначення / А. М. Носик, О. П. Нарезний, О. М. Носик // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – № 2(30). – С. 68 – 72.
4. Нарезний А. П. Метод оценки разности частот опорных генераторов АСУ специального назначения по начальной фазе синхронизируемого блока цифровой последовательности / Ан. М. Носик, Е. В. Шубин, А. П. Нарезний, Ал. М. Носик // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2011. – № 2(6). – С. 107 – 111.
5. Нарезний А. П. Синхронизация первичных атомных часов АСУ специального назначения по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем / Ан. М. Носик, А. П. Нарезний, Ал. М. Носик // Системи обробки інформації. Зб. наук. праць – Х.: ХУПС. – 2010. – Вип. 9(90). – С. 70 - 73.
6. Нарезний О. П. Особенности организации эталонного сервера часу АСУ специального назначения на основе атомного часовника, що синхронізується за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем / А. М. Носик, О. П. Нарезний // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2010. – № 2(4). – С. 141 – 145.
7. Нарезний А. П. Методика идентификации группы пассивных квантовых мер частоты при наличии погрешности от взаимодействия по результатам их взаимных сличений / В. Н. Чинков, А. П. Нарезний // Український метрологічний журнал. – 2009. – № 3. – С. 13 – 21.
8. Нарезний А. П. Математическая модель формирования групповой шкалы времени при условии взаимодействия атомных часов как системы связанных осцилляторов / В.Н. Чинков, А.П. Нарезний // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2005. – № 3(11). – С. 5 – 9.
9. Нарезний А. П. Исследование режимов взаимодействия прецизионных мер частоты с близкими частотами / В. Н. Чинков, А. П. Нарезний // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 5(21). – С. 52 – 56.
10. Нарезний А. П. Оценка погрешности формирования групповой средневзвешенной шкалы времени при условии взаимодействия атомных часов как системы связанных осцилляторов / В. Н. Чинков, А. П. Нарезний // Системи обробки інформації. Зб. наук. праць – Х.: ХУПС. – 2005. – Вип. 4(44). – С. 168 - 173.
11. Нарезний А. П. Идентификация скрытых периодичностей в нестационарных фазовых флуктуациях прецизионных мер частоты / А. П. Нарезний // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4. – № 2. – С. 148–152.

12. Нарезный А. П. Идентификация группового эталона частоты стохастической моделью системы связанных осцилляторов / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Системы обработки информации. Сборник научных работ. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 2(18). – С. 126 - 131.

13. Нарезный А. П. Критерий выделения квазипериодических составляющих, обусловленных взаимодействием мер в групповом эталоне частоты / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2002. – Вып. 126. – С. 227 - 230.

14. Нарезный А. П. Выделение скрытых периодичностей в фазовых флуктуациях прецизионных мер частоты / А. П. Нарезный // Системы обработки информации. Сборник научных работ. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вып. 1(7). – С. 29 – 32.

15. Нарезный А. П. Анализ стохастических характеристик группы мер частоты и времени при их взаимных сличениях / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Радиоэлектроника и информатика. – 1998. – № 3(04). – С. 44 - 46.

16. Нарезный А. П. Алгоритм формирования групповой шкалы времени / А. П. Нарезный // Сборник научных работ. – Х.: ХВУ. – 1998. – Вып. 21. – С. 37 – 41.

17. Нарезный А. П. Идентификация групповой меры частоты с использованием итерационных методов решения стационарных задач / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 1998. – № 109. – С. 76 – 80.

18. Нарезный А. П. Оценка погрешностей определения стохастических характеристик группы мер частоты и времени при их взаимных сличениях / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Радиоэлектроника и информатика. – 1997. – № 1. – С. 37 – 39.

19. Нарезный А. П. Оптимизация графа сличений групповой меры частоты и времени / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Работы конференции “Метрологическое обеспечение в области электрических, магнитных та радиовимірювань” (Метрологія в електроніці – 97). – Х.: ДНВО “Метрологія”. – 1997. – Том 2. – С. 31 – 33.

20. Нарезный А. П. О возможности определения среднеквадратического отклонения частоты косвенным путем / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Работы конференции “Метрологическое обеспечение в области электрических, магнитных та радиовимірювань” (Метрологія в електроніці – 97). – Х.: ДНВО “Метрологія”. – 1997. – Том 2. – С. 34 – 36.

21. Нарезный А. П. Приемник компаратор телевизионный для приема эталонных сигналов времени и частоты / А. В. Васильченко, А. С. Клейман, О. Л. Корабельский, А. П. Нарезный, В. Н. Романько // Научные работы 2-й Международной научно-технической конференции “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія – 99). – Х.: ХДНДІМ. – 1999. – Том 1. – С. 128 – 130.

22. Нарезный А. П. Моделирование физических процессов поведения частоты в групповом эталоне – системе связанных осцилляторов / Т. А. Гриненко, Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Сборник научных трудов 1-го Международного радиоэлектронного Форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” (МРФ–2002). – Х.: ХНУРЭ. – 2002. – Ч. 2. –

С. 509 - 512.

23. Нарезный А. П. Идентификация периодических составляющих хода шкалы времени группового эталона на основе стохастической модели связанных осцилляторов / В. М. Гиренко, Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный // Наукові праці 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія – 2002). – Х.: ХДНДІМ. – 2002. – Том 1. – С. 146 – 149.

24. Нарезный А. П. Способ выделения скрытых периодичностей в фазовых флуктуациях прецизионных мер частоты / Ю. И. Евдокименко, А. П. Нарезный, А. И. Левенберг // Наукові праці 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія – 2004). – Х.: ННЦ “Інститут метрології”. – 2004. – Том 1. – С. 195 – 197.

25. Нарезный А. П. Оценка спектральной плотности мощности фазовых флуктуаций мер частоты при условии их взаимного влияния через компаратор / А. П. Нарезный, А. И. Левенберг // Наукові праці 5-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія – 2006). — Х.: ННЦ “Інститут метрології”. – 2006. – Том 1. – С. 167 – 170.

26. Нарезный А. П. Об измерениях нестабильности частоты выходных сигналов мер частоты в групповом эталоне при наличии погрешности взаимодействия / В. Н. Чинков, А. П. Нарезный // Збірка матеріалів наукового семінару загально інститутських кафедр “Моделювання в військово-наукових дослідженнях”, 12 травня 2006 р. – Одеса: Одеський інститут сухопутних військ. – 2006. – С. 41 – 44.

27. Нарезный А. П. Об оценке влияния флуктуаций температуры СВЧ резонатора на долговременную стабильность рубидиевого дискриминатора / В. Н. Чинков, А. П. Нарезный // Наукові праці 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія – 2008) – Х.: ННЦ “Інститут метрології”. – 2008. – Том 1. – С. 173 – 175.

28. Нарезный А. П. Обработка результатов дискретных временных и траекторных измерений при синхронизации шкал времени по радиоканалу в системе с подвижными средствами / О.А. Гасуха, А.П. Нарезный // 1-й Международный молодежный форума "Электроника и молодежь в XXI веке" : тез. докл., 22-24 апреля 1997 г. – Х.: ХТУРЭ. – 1997. – С. 81.

29. Нарезный А. П. О применении вейвлет дисперсии для измерения флуктуаций частоты управляемой меры частоты и времени системы передачи эталонных сигналов времени по каналам цифрового телевидения / М.Л. Троцко, В.Н. Романько, А.П. Нарезный // Матеріали другої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – захисту повітряного простору“ : Тези доповідей – Х.: ХУПС. – 2006. – С. 92.

30. Нарезный А. П. Влияние погрешности взаимодействия на оценку спектральной плотности мощности фазовых флуктуаций квантовых мер частоты / А. П. Нарезный // Матеріали п'ятої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – захисту повітряного простору“ : Тези доповідей – Х.: ХУПС. – 2009. – С. 153.

31. Нарезный О. П. Особенности организации эталонного сервера часу АСУ

спеціального призначення / А. М. Носик, О. М. Носик, О. П. Нарезній // Матеріали Сьомої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – захисту повітряного простору“ : Тези доповідей. – Х.: ХУПС. – 2011. – С. 64.

32. Нарезній О. П. Пропозиції щодо організації еталонного серверу часу єдиної автоматизованої системи управління / А. М. Носик, О. М. Носик, О. П. Нарезній // Збірка тез доповідей Восьмої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – захисту повітряного простору“ : Тези доповідей. – Х.: ХУПС. – 2012. – С. 40.

33. Нарезній О. П. Дослідження програмно-апаратних засобів організації еталонного серверу часу єдиної автоматизованої системи управління / А. М. Носик, О. П. Нарезній, О. М. Носик, М. Л. Троцько // Збірка тез доповідей Дев'ятої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – захисту повітряного простору“ : Тези доповідей. – Х.: ХУПС. – 2013. – С. 46.

34. Нарезній О. П. Особливості синхронізації системного часу в АСУ спеціального призначення / А. М. Носик, О. П. Нарезній // Збірка тез доповідей Десятої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – захисту повітряного простору“ : Тези доповідей. – Х.: ХУПС. – 2014. – С. 44.

## АНОТАЦІЯ

**Нарезній О.П. Підвищення стабільності групових квантових стандартів у радіотехнічній системі синхронізації часу та частоти.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

В дисертації запропоновано та обґрунтовано метод підвищення стабільності групових еталонів частоти шляхом компенсації похибки від взаємодії на основі створення нової математичної моделі стохастичної і детермінованої складових стану системи зв'язаних осциляторів, що дозволяє адекватно описувати динаміку зміни стану миттєвого відносного відхилення частоти кожної прецизійної міри зі складу групи.

Отримані результати, що становлять основу вирішення важливої для теорії групового еталонування фізичних величин часу і частоти наукової задачі, яка полягає в розробці теоретичних основ нового класу математичних моделей групових еталонів, заснованих на уявленні групи як багаточастотної системи зв'язаних осциляторів. Запропонований підхід до групового еталона, як до системи зв'язаних осциляторів, дозволяє описати явища дискретних стрибків фаз, затягування частот засобів з близькими частотами (режим синхронізації), поява частотної модуляції, зумовленої амплітудно-фазової конверсією при биттях близьких частот і розглядаються в класичних моделях як флуктуаційні процеси.

**Ключові слова:** груповий еталон часу і частоти, шкала часу, спектральна щільність потужності флуктуацій, прецизійні міри частоти, апарат інтегральних перетворень, зв'язані осцилятори.

**АННОТАЦИЯ**

**Нарежний А.П. Повышение стабильности групповых квантовых стандартов в радиотехнической системе синхронизации времени и частоты.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

В диссертации предложен и обоснован метод повышения точности хранения и передачи размера физической величины групповыми эталонами времени и частоты путем компенсации погрешности от взаимодействия на основе построения новой математической модели стохастической и детерминированной составляющих состояния системы связанных осцилляторов, позволяющей адекватно описывать динамику изменения состояния относительного отклонения частоты каждой прецизионной меры из состава группы.

Получены результаты, составляющие основу решения важной для теории группового эталонирования физических величин времени и частоты научной задачи, состоящей в разработке теоретических основ нового класса математических моделей групповых эталонов, основанных на представлении группы как многочастотной системы связанных осцилляторов. Предлагаемый подход к групповому эталону, как к системе связанных осцилляторов, позволяет описать наблюдаемые явления дискретных скачков фаз, затягивания частот мер с близкими частотами (режим синхронизации), появление частотной модуляции, обусловленной амплитудно-фазовой конверсией при биениях близких частот и рассматриваемых в классических моделях как флуктуационные процессы. Получена взаимосвязь между количественными характеристиками физических явлений, возникающими во время работы прецизионных мер в составе группового эталона (биения близких частот, захват частоты, терморезонанс кварцевых резонаторов) и дестабилизирующими воспроизведение частоты (фазы) факторами, а также между метрологическими характеристиками этих мер.

Разработаны эффективные процедуры обращения интегрального уравнения Фредгольма первого рода, которые позволили производить идентификацию квазипериодических процессов по энергетическим спектрам фазовых флуктуаций прецизионных мер частоты в непосредственной близости от частоты несущей по результатам измерений фазовых флуктуаций во времени. При этом относительная погрешность определения амплитуды скрытых периодичностей в полосе анализа меньше 1 Гц относительно номинального значения частоты квантовых стандартов (мер) частоты не превышает 1 %.

Получены выражения, которые связывают между собой результаты измерений поведения фазовых флуктуаций прецизионных мер во времени с параметрами математической модели разработанного метода и обоснованы критерии их оценки.

Результаты диссертационных исследований позволяют расширить научные знания в области методов решения интегральных уравнений Фредгольма первого рода в разделах теории колебаний, а точнее – в понимании физических процессов, которые возникают при функционировании системы электрически объединенных квантовых стандартов (мер) частоты.

**Ключевые слова:** групповой эталон времени и частоты, шкала времени, спектральная плотность мощности флуктуаций, прецизионные меры частоты, аппарат интегральных преобразований.

## ABSTRACT

**Narezshny A.P. Increase of stability of the quantum group standards in radio system synchronization of time and frequency.** – a manuscript.

Thesis for the candidate's degree on specialty 05.12.17 – radio engineering and television systems. – Kharkov national university of radio electronics, Kharkov, 2014.

In the thesis the method of increase of accuracy of storage and transfer of the size of a physical quantity by group time and frequency standards by compensation of inaccuracy from cooperation on the basis of construction of a new mathematical model of the system of stochastic and determined components of the system condition of bound oscillators permitting to describe adequately the dynamics of changes of the condition of the relative frequency deviation of each precision measure from the group component is offered and proved.

The obtained results that form the basis of solution of the scientific task important for the theory of group calibration of the physical quantities of time and frequency, related to development of theoretical foundations of a new class of mathematical models of group standards, based on the representation of a group as multifrequency system of bound oscillators. The proposed approach to the group standard as to the system of coupled oscillators allows to describe the observed phenomena of discrete jumps phases, the tightening of frequencies of instruments with close frequencies (synchronization mode), appearance of frequency modulation caused by the amplitude-phase conversion at beatings of close frequencies and are considered in the classical models as fluctuation processes.

**Key words:** time and frequency group standard, time scale, spectral power density of fluctuations, precision frequency measures, device of integrated transformations, bound oscillators.



Підп. до друку 26.08.14. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ . Спосіб друку – ризографія  
Умов. друк. арк. 1,2. Тираж 100 прим.  
Зам. № 2-912. Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.  
61166, Харків, просп. Леніна, 14