

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ШЕВЧЕНКО КОСТЯНТИН ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 621.317.7.089

**РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ПОБУДОВИ
РАДІОВІМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ
З КОМУТАЦІЙНО-МОДУЛЯЦІЙНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ**

Спеціальність 05.11.08 - радіовимірювальні прилади

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Вінниця – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі автоматизації та комп'ютерних систем Київського національного університету технологій та дизайну, м. Київ, Міністерство освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Яненко Олексій Пилипович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», професор
кафедри радіоконструювання і виробництва
радіоапаратури.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Манойлов В'ячеслав Пилипович,
Житомирський державний технологічний
університет, завідувач кафедри радіотехніки і
телекомунікацій

доктор технічних наук, професор
Філіпський Юрій Костянтинович,
інститут радіоелектроніки та телекомунікацій
Одеського національного політехнічного
університету, професор кафедри
радіотехнічних пристроїв

доктор технічних наук, професор
Величко Олег Миколайович,
Науково-виробничий інститут метрологічного
забезпечення вимірювання електромагнітних
величин, м. Київ, директор

Захист відбудеться « 13 » листопада 2015 року о 10-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий « 12 » жовтня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

К.В. Огородник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У виробках, які виготовляються із застосуванням новітніх технологій, все більш широке використання знаходять матеріали на основі кераміки, скла, високомолекулярних полімерів, природних та штучних волокон, до яких висуваються високі вимоги щодо відповідності міжнародним стандартам.

Останніми роками також істотно виросла частка дрібносерійного наукоємного виробництва, при переналаштуванні якого відповідно до вимог споживача, які швидко змінюються, потрібно проводити вимірювання ряду параметрів матеріалів та технологічних процесів.

Широкого поширення для визначення параметрів матеріалів і виробів набули радіовимірювальні прилади, засновані на вимірюванні параметрів електромагнітних хвиль широкого частотного діапазону, що взаємодіють з досліджуваними об'єктами, або вимірювання параметрів низькоінтенсивних електромагнітних сигналів, що генеруються самим об'єктом досліджень. Найбільшу інформативність з точки зору визначення характеристик складу та властивостей матеріалів і речовин в силу ряду об'єктивних факторів, забезпечує високочастотний діапазон, що поєднує власне високочастотний, надвисокочастотний (НВЧ) та вкрай високочастотний (ВВЧ) діапазони електромагнітних коливань.

Значний внесок у розвиток теорії радіовимірювальних приладів внесли роботи таких відомих вчених як М.І. Білько, Г.Д. Бурдуна, В.А. Вікторова, В.І. Водотовки, Л.Г. Гасанова, Н.А. Есепкіної, Б.Г. Кадука, І.В. Лебедева, В.П. Манойлова, В.С. Осадчука, О.В. Осадчука, Ю.Ф. Павленко, Ю.Н. Парійського, Ю.О. Скрипника, О.С. Совлукова, В.С. Троїцького, М.А. Філінюка, О.П. Яненко та інших.

На сьогоднішній день високочастотний діапазон є достатньо освоєним в аспекті апаратурного забезпечення. Існують чисельні засоби для вимірювання параметрів сигналів високочастотного діапазону – частоти, потужності, фазової затримки, коефіцієнтів відбиття, поглинання та інших параметрів за значної потужності інформативних сигналів.

Проте, через ряд причин така апаратура, не може задовольнити існуючі вимоги за наявності низькоінтенсивних сигналів. Обумовлено це відносно невисокою чутливістю радіовимірювальних приладів, значними похибками вимірювань, складністю переналаштування на інші діапазони вимірювань.

Більшість вимірювальних приладів використовують в своїй основі методи, які базуються на зондуванні об'єкту дослідження електромагнітним випромінюванням, потужність якого складає 1...20 мВт, або проходженні через об'єкт електричного струму.

В багатьох випадках, особливо при дослідженні малих об'ємів речовин, такі методи не можуть забезпечити достовірних результатів внаслідок руйнування структурної організації речовини на молекулярному рівні. Значною мірою це стосується сучасних нанотехнологій та наноматеріалів. В таких випадках доцільно використовувати методи, які базуються на вимірюванні параметрів власних шумових електромагнітних випромінювань речовин, утворюваних тепловим рухом носіїв зарядів. Але, спектральна щільність потужності таких випромінювань занадто мала ($10^{-20} \dots 10^{-18} \frac{\text{Вт} \cdot \text{Гц}}{\text{см}^2}$) і не може бути оцінена за допомогою існуючих засобів

вимірювань, що є значною проблемою. Обумовлено це тим, що інтенсивність власних шумів елементів та вузлів високочастотного тракту вимірювальних приладів порівняна, або навіть більша за рівень інформативного сигналу.

З наукової та практичної точок зору існує необхідність визначення спектральних характеристик досліджуваних об'єктів у високочастотному діапазоні, проведення аналізу резонансних явищ, визначення характеристик відбиття та поглинання, можливість оцінки широкосмугових шумових сигналів тощо. Для проведення таких вимірювань необхідна розробка нових методів та синтез нових структур побудови вимірювальних приладів, які забезпечать можливість вимірювання параметрів низькоінтенсивних високочастотних сигналів в широкому частотному діапазоні.

В такій постановці тема дисертаційної роботи щодо розробки теоретичних основ побудови високочутливих радіовимірювальних приладів є актуальною та відповідає потребам сьогодення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки в Україні. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 1999 – 2014 років відповідно до тематичних планів виконання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт Київського національного університету технологій та дизайну, де автор був науковим керівником або відповідальним виконавцем, а саме: "Створення електрофізичних моделей взаємодії зовнішніх електромагнітних полів з внутрішніми електромагнітними полями живих організмів та розробка на їх основі діагностичної та лікувальної медичної апаратури" (№ держ. реєстрації – 0100U006039), "Теоретичні основи взаємодії електромагнітних полів людини з матеріалами одягу та створення надвисокочастотної апаратури оцінки відбиткових та поглинальних властивостей матеріалів" (№ держ. реєстрації – 0103U000849), "Теоретичні основи та методологія оцінки комфортності одягу за електрофізіологічними показниками біологічно активних точок людини" (№ держ. реєстрації – 0106U000889), "Дослідження впливу бар'єрних властивостей матеріалів одягу та взуття на організм людини та створення апаратури для оцінки слабких частотно-хвильових взаємодій" (№ держ. реєстрації – 0109U002466), "Розробка концепції та методів підвищення чутливості та роздільної здатності засобів пошуку прихованих металевих предметів" (№ держ. реєстрації 0109U002473), "Наукові основи побудови засобів вимірювання показників комфортності матеріалів для одягу за їх хвильовими властивостям в електромагнітних полях надвисоких частот" (№ держ. реєстрації 0112U000262).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення чутливості і точності, розширення діапазону робочих частот та функціональних можливостей високочастотних радіовимірювальних приладів за рахунок нових методів та засобів перетворення, виділення та вимірювання інформативних параметрів низькоінтенсивних високочастотних монохроматичних та шумових сигналів на фоні власних шумів перетворювальних елементів трактів вимірювальної апаратури з використанням комутаційно-модуляційних перетворень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати зв'язок фізико-хімічних властивостей досліджуваних об'єктів з їх електрофізичними властивостями, зокрема, провідністю, діелектричною проникністю, діелектричними втратами та рівнем власного радіотеплового випромінювання та оцінити можливість використання спеціалізованих радіовимірювальних приладів для оцінки властивостей досліджуваних об'єктів шляхом вимірювання низькоінтенсивних інформативних сигналів.

2. Розвинути теоретичні основи побудови радіовимірювальних приладів з використанням методів комутаційно-модуляційних перетворень та структурного синтезу вимірювальних перетворювачів.

3. Розробити структурно-алгоритмічні моделі комутаційно-модуляційних радіовимірювальних приладів з використанням зондуючих електромагнітних сигналів та вимірюванням основних параметрів реакції досліджуваних об'єктів для частотного діапазону, де сенсори можна вважати елементами із зосередженими параметрами та частотного діапазону, де сенсори є елементами із розподіленими параметрами.

4. Розробити структурно-алгоритмічні моделі комутаційно-модуляційних радіовимірювальних приладів з використанням власного радіотеплового випромінювання досліджуваних об'єктів, проаналізувати основні параметри перетворення надвисокочастотного каналу і причини, які впливають на чутливість та точність вимірювання інформативних параметрів низькоінтенсивних сигналів.

5. Розробити методи зниження флуктуаційного порогу чутливості, підвищення чутливості та точності вимірювання, розширення діапазону робочих частот та функціональних можливостей радіовимірювальних приладів, та на їх основі синтезувати високочутливі одно- та двохходові структури приймальної радіометричної апаратури для вимірювання енергетичних, спектральних і кореляційних характеристик надвисокочастотних сигналів.

6. Сформувати комплекс показників для оцінки метрологічних характеристик радіометричних вимірювальних приладів.

7. Експериментально дослідити запропоновані в роботі радіовимірювальні засоби з комутаційно-модуляційним перетворенням шляхом вимірювання властивостей досліджуваних об'єктів різної фізичної природи.

Об'єкт дослідження. Процеси комутаційно-модуляційного перетворення інформативних параметрів високочастотних низькоінтенсивних сигналів досліджуваних об'єктів.

Предмет дослідження. Одноканальні та двоканальні високочастотні вимірювальні структури з комутаційно-модуляційним перетворенням інформативних параметрів власних низькоінтенсивних електромагнітних випромінювань досліджуваних об'єктів або їх реакції на зовнішні зондуючі електромагнітні сигнали.

Методи дослідження. Методологічну основу дисертаційної роботи складає системний підхід до проектування радіовимірювальних приладів. Для теоретичних узагальнень і аналізу математичних моделей кіл радіовимірювальних приладів застосовані методи досліджень, що базуються на використанні загальної теорії радіотехнічних вимірювань, структурно-алгоритмічного математичного і комп'ютерного моделювання та аналізу, комутаційно-модуляційних перетворень,

спектрального та кореляційного аналізу, теорії випадкових сигналів для оцінки впливу завад і власних шумів перетворювальних трактів на похибки вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті проведених досліджень запропонований комплексний підхід до проектування радіовимірювальних приладів широкого частотного діапазону, який забезпечує підвищення точності та чутливості вимірювання параметрів сенсорів з зосередженими та розподіленими параметрами за рахунок подальшого розвитку та використання методу комутаційно-модуляційних перетворень, в основу якого покладено наступні нові наукові результати:

1. Розвинуто способи побудови спеціалізованих вимірювальних каналів з комутаційно-модуляційним перетворенням низькоінтенсивних високочастотних сигналів із зразковими сигналами або сигналами кіл зворотних зв'язків, що значною мірою вирішує проблему підвищення чутливості та точності вимірювання параметрів високочастотних сигналів, які несуть інформацію про стан та склад досліджуваних об'єктів, на фоні прогресуючих (дрейфових) похибок сенсорів і вимірювальних перетворювачів.

2. Вперше запропоновані нові методи структурного синтезу радіовимірювальних приладів, які базуються на вимірюванні нерівномірності (частотної дисперсії) амплітудно- та фазочастотних характеристик сенсорів, що взаємодіють з досліджуваними об'єктами, зокрема, запропоновано двочастотний метод вимірювання частотної дисперсії електропровідності середовищ у високочастотних кондуктометричних сенсорах, в якому відносна частотна дисперсія однозначно визначається відносною різницею регульованої зразкової міри в каналі опорної напруги і не залежить від температурної та часової нестабільності коефіцієнтів перетворення вимірювальної схеми, що дозволяє на 8...10% зменшити похибки вимірювань.

3. Вперше запропоновані нові методи структурного синтезу надвисокочастотних вимірювальних засобів, зокрема, метод вимірювання коефіцієнта відбиття в смузі поглинання, заснований на налагодженні частоти опромінюючих коливань на частоту релаксації (максимум поглинання), яка однозначно пов'язана з вимірюваним параметром, та метод вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі, в якому використання автоматичного регулювання параметрів вимірювального каналу виключає вплив нестабільності параметрів його елементів та нестабільності потужності НВЧ генератора на результат вимірювання та дозволяє на 6...8% підвищити точність вимірювань.

4. Вперше запропонований новий метод розподілу сигналів, які відповідають точкам перегину резонансних кривих вимірювального і опорного сенсорів, з подальшим порівнянням отриманих часових інтервалів, який дозволяє на 10...12 % зменшити похибку вимірювання зсуву частот низькодобротних резонансних надвисокочастотних сенсорів, що характерно для відкритих сенсорів з зовнішнім розташуванням досліджуваних матеріалів.

5. Розвинуто методи придушення флуктуаційних складових поблизу частоти модуляції з використанням комутаційно-модуляційних алгоритмів заміщення, інвертування та протиставлення сигналів у вимірювальних каналах, що дозволило

виділяти слабкі корисні сигнали на фоні шумових завад та забезпечило подальше підвищення чутливості і точності вимірювання інформативних параметрів.

6. Вперше обґрунтовано можливість використання власних шумів радіометрів з гетеродинним перетворенням частоти для організації від'ємних та додатних зворотних зв'язків, що забезпечує зменшення флуктуаційного порогу чутливості при вимірюванні щільності потужності низькоінтенсивних високочастотних сигналів до 10^{-14} Вт/см² і зниження на 10...12% похибок від нестабільності параметрів радіометричних перетворювачів та зменшення сталої часу вимірювання.

7. Запропоновані нові структури побудови радіометрів з компенсаційним, модуляційним та кореляційним перетворенням сигналів, які за рахунок використання розвинутих в роботі комутаційно-модуляційних методів забезпечили можливість вимірювання власного радіотеплового випромінювання зі спектральною щільністю потужності на рівні 10^{-22} ... 10^{-21} Вт/(Гц*см²) від об'єктів різної фізичної природи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розвитку основ проектування високочутливої вимірювальної апаратури для визначення інформативних параметрів високочастотних низькоінтенсивних сигналів, що несуть інформацію про склад та стан досліджуваних об'єктів. На основі отриманих наукових результатів:

1. Запропоновано структурні реалізації високочастотних засобів вимірювання нерівномірності частотних характеристик досліджуваних об'єктів з часовим розподілом зондуючих сигналів, що дозволяє визначати якісний і кількісний склад та властивості досліджуваних речовин.

2. Отримано аналітичний опис метрологічних характеристик радіометричної апаратури та методику оцінки систематичних і випадкових похибок радіометрів при вимірюванні надвисокочастотних низькоінтенсивних електромагнітних випромінювань.

3. Запропоновано структури високочутливих радіометрів з використанням методів комутаційно-модуляційних перетворювань, а також структури і алгоритми перетворення для інженерного проектування радіометричної апаратури підвищеної чутливості з розширеними частотними діапазонами та функціональними можливостями.

4. Визначено джерела та отримано аналітичні вирази для оцінки похибок комутаційних перетворювачів, впливу НВЧ-шумів, асиметрії комутуючих імпульсів, що забезпечує проектування структури радіометричного перетворювача з мінімальними похибками перетворення та підвищує точність вимірювань.

5. Розроблено рекомендації щодо проектування модуляційних радіометрів з мінімізацією впливів завад та неінформативних факторів на чутливість і точність, що забезпечує покращення метрологічних характеристик радіометричної апаратури.

6. Використання запропонованих в роботі методів побудови радіовимірювальних приладів з комутаційно-модуляційними перетвореннями дозволило вперше експериментально оцінити параметри власного електромагнітного випромінювання води та водних розчинів тривалого зберігання, випромінювальну здатність матеріалів для одягу та інших досліджуваних об'єктів.

Теоретичні та експериментальні дослідження, виконані автором в Київському національному університеті технологій та дизайну Міністерства освіти і науки України, спрямовані на розробку високочутливої радіовиміральної апаратури високочастотного та надвисокочастотного діапазонів для вимірювання параметрів низькоінтенсивних сигналів, інформативні параметри яких містять інформацію про кількісний та якісний склад досліджуваних об'єктів. За результатами досліджень створені та впроваджені:

- перетворювач вологості плівкових матеріалів діапазону частот 850...900 МГц, який забезпечує вимірювання вологості плівкових матеріалів в діапазоні 4...18 % з похибкою не більше ± 1 %;

- перетворювач концентрації бінарних розчинів діапазону частот 650...700 МГц, який забезпечує контроль концентрації водних розчинів спирту, диметилформаміду в діапазоні 40...80 % з похибкою не більше $\pm 1,5$ %;

- широкосмугова установка для вимірювання малих рівнів потужності міліметрового діапазону хвиль у діапазоні частот 37,5...53,5 ГГц, з флюктуаційною чутливістю $3 \cdot 10^{-14}$ Вт на діапазон вимірювання потужності $3 \cdot 10^{-6}$... $3 \cdot 10^{-13}$ Вт з похибкою не більше ± 10 %;

- вузькосмуговий модуляційний радіометр діапазону 1 ГГц зі смугою частот ± 200 МГц з флюктуаційним порогом чутливості $3 \cdot 10^{-15}$ Вт на діапазон вимірювання потужності $3 \cdot 10^{-7}$... $3 \cdot 10^{-14}$ Вт з похибкою не більше ± 10 %.

Розроблені технічні рішення захищені патентами України та впроваджені в експлуатацію та використовуються у Головній організації з метрологічного забезпечення електричних та радіотехнічних вимірювань МОЗ України — НДЦ квантової медицини "Відгук", м. Київ (акт від 18.04.2007 р.), ТОВ "Термал Віжн Технолоджис" (акт №01/28.03 від 28.03.2015 р.) Казенному науково-дослідному підприємстві "Кварсит", м. Костянтинівка (акт від 14.06.2012 р.), Київському національному університеті технологій та дизайну на кафедрі автоматизації та комп'ютерних систем (акт від 26.02.2003), кафедрі матеріалознавства (акт від 08.09.2006 р.), електрохімічної енергетики та хімії (акт від 17.10.2008 р.), в Національному технічному університеті України «КПІ» на кафедрі конструювання і виробництва радіоелектронної апаратури (акт від 20.02.2002 р.).

На розроблені методи та засоби вимірювань отримані 30 патентів, що підтверджують новизну та актуальність запропонованих рішень.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні і практичні результати отримані автором самостійно. У роботах, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати. В роботах [1-3] систематизовано комплексний підхід до проектування радіовиміральної апаратури з використанням методів комутаційно-модуляційних перетворень, окремі питання алгоритмізації роботи радіовиміральної апаратури різних частотних діапазонів запропоновані здобувачем в [4, 7, 11, 12, 16-18, 22, 23, 26, 56, 60, 62, 68, 70, 72, 80], питання структурної побудови радіовиміральної апаратури – в роботах [27, 38, 39, 44, 54, 55, 57 – 59, 61, 63 - 67, 69, 71 – 81, 83 - 85]. В роботах [13, 19, 20, 31 – 33, 40, 45 – 47, 50] здобувачу належить опис електрофізичних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання з досліджуваними об'єктами та процесів їх перетворення в радіовиміральної апаратурі. В роботах [5, 6, 8-10, 24, 28, 41-43, 49,

51, 53] здобувачем розроблено методи підвищення точності вимірювань та оцінки метрологічних характеристик розроблених засобів, а також розробка методів радіометричного контролю з урахуванням специфіки прикладних задач [14, 15, 21, 25, 29, 30, 34 - 37].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що викладені в дисертації, були апробовані на наукових конференціях, серед яких:

- 12 – 19, 21 – 24 Международная Крымская конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 2002 - 2009, 2011 - 2014;

- 7 Международная конференция по квантовой медицине «Теоретические и клинические аспекты квантовой медицины», Донецк, 2003;

- 10 Международная научная конференция «Теория и техника приема, передачи и обработки информации», Харьков-Туапсе, 2004;

- Міжнародна конференція „Інноваційні технології – майбутнє України”, Київ, 2005;

- Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 50-річчю кафедри АКС Київського національного університету технологій та дизайну, Київ, 2008;

- Міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка”, Харків, 2006;

- 14 Российский симпозиум с международным участием «Миллиметровые волны в медицине и биологии», Москва, 2007;

- Науково-технічна конференція «Приладобудування 2007: стан і перспективи», Київ, 2007;

- 8 Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Одеса, 2007;

- 3 Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування», Вінниця, 2007;

- Интеллектуальный форум “Открытая дверь. Новые концепции естествознания: применение в медицине”, Санкт-Петербург, 2007;

- Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, приборы и системы», Ялта, 2008 - 2013;

- V Международный конгресс “Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине”, Санкт-Петербург, 2009;

- 10, 11 Міжнародна науково-технічна конференція "Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів", Кременчук, 2011, 2012;

- 11 – 13 Міжнародна науково-технічна конференція "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах", Хмельницький, 2012;

- Всеукраїнська науково-практична конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2014", Львів, 2014.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 118 наукових праць: 3 монографії, 48 статей, в тому числі 45 в фахових наукових виданнях, що входять до Переліку фахових видань з технічних наук; 37 матеріалів та тез доповідей на наукових конференціях і симпозіумах, 30 патентів та авторських свідоцтв.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з переліку

умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 224 найменування та додатків, що включають акти впровадження, копії титульних сторінок патентів та результати розрахунків параметрів комутаційного перемикача. Основний зміст дисертації складає 272 сторінки. Загальна кількість - 334 сторінки, робота містить 70 рисунків та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету роботи та задачі досліджень. Дана характеристика наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведені дані про апробацію та впровадження результатів дисертації.

У першому розділі проаналізований зв'язок фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей досліджуваних об'єктів з параметрами вимірюваних сигналів, наведено структуру системи перетворень властивостей досліджуваних об'єктів при радіовимірюваннях. Розглянуті електричні та діелектричні властивості багатокомпонентних середовищ, досліджений та встановлений зв'язок електрофізичних параметрів речовини з її фізико-механічними властивостями. Показано, що речовина є основним фактором, який визначає результат вимірювання, за умови, що електромагнітні коливання в системі підлягають визначеному вирішенню електрофізичної моделі. Параметри чутливого елемента також враховуються в цій моделі, а речовина представляється у формі моделі еквівалентного електричного елемента, тому що під дією зовнішніх електромагнітних коливань чутливий елемент набуває нових електрофізичних характеристик. Таким чином, визначається зв'язок електромагнітного поля з фізико-хімічними властивостями речовини.

При використанні зовнішніх зондуючих електромагнітних хвиль навіть невисокої інтенсивності в ряді випадків відбувається зміна електричних та фізико-механічних властивостей досліджуваних об'єктів, про що свідчить велика кількість публікацій останніх років. Це приводить до того, що в деяких випадках отримані результати характеризують не власні параметри досліджуваного середовища, а змінені впливом електромагнітного опромінення, що суттєво спотворює результати вимірювань. В роботі обґрунтована можливість використання власного радіотеплового випромінювання для оцінки якісних та кількісних характеристик досліджуваних об'єктів, проаналізований механізм його виникнення та енергетичні характеристики для різних частотних діапазонів. Показано, що радіотеплові методи вимірювань відкривають нові можливості в неруйнівному дослідженні матеріалів і виробів за рівнем власного електромагнітного випромінювання (ЕМВ), яке визначається тепловими електричними флуктуаціями. В той же час подальший розвиток радіотеплових методів вимірювань пов'язаний з існуванням ряду проблем, серед яких складність підсилення в діапазоні НВЧ надзвичайно малого інформативного шумового радіовипромінювання ($10^{-17} \dots 10^{-13}$ Вт), неможливість виключення систематичних похибок адитивного і мультиплікативного характеру та також мінімізації випадкових похибок при вимірюванні низькоінтенсивних електромагнітних випромінювань існуючими методами вимірювання.

Показано, що одним з перспективних напрямків підвищення чутливості та точності радіовимірювальних приладів є використання методу комутаційно-модуляційних перетворень. На прикладі технічних рішень, виконаних за участю автора, розглянуті основні принципи структурної побудови вимірювальних приладів з комутаційно-модуляційними перетвореннями. Доведено, що побудова структурних каналів радіовимірювальних приладів з комутаційно-модуляційним перетворенням вимірюваної та природної (або штучно створеної) зразкової величини вирішує значною мірою проблему підвищення точності вимірювання сигналів на фоні прогресуючих (дрейфових) похибок сенсорів і вимірювальних перетворювачів.

В другому розділі досліджені принципи структурної побудови радіовимірювальних приладів, сенсори яких можна вважати елементами з зосередженими параметрами.

Одним з перспективних електрофізичних методів дослідження складу речовини є визначення у широкому частотному діапазоні електропровідності сенсору, який містить досліджувану речовину. Наявність у рідині або газі домішкових компонентів може бути визначена за нерівномірністю (дисперсією) частотної характеристики сенсора з досліджуваною речовиною.

Частотну дисперсію електрофізичних параметрів матеріалів і рідких середовищ оцінюють за ступенем нерівномірності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) або нелінійності фазочастотної характеристики (ФЧХ) резистивних, ємнісних або індуктивних сенсорів в залежності від типу електропровідності досліджуваної фази.

Дисперсію електропровідності рідких середовищ зазвичай вимірюють мостовими схемами на різних частотах напруги живлення. Проте кращих результатів досягають застосовуючи двочастотний комутаційно-модуляційний метод вимірювання частотної дисперсії електропровідності вимірювальної комірки. Цей метод реалізується за допомогою структурної схеми, наведеної на рис. 1.

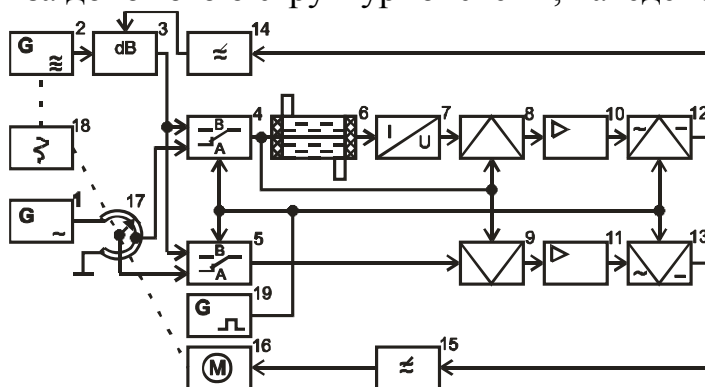


Рисунок 1 – Двочастотний вимірювач частотної дисперсії електропровідності кондуктометричних сенсорів

На схемі показані: 1, 2 – генератори опорної та змінної випробувальної частот; 3 – керований атенюатор; 4, 5 – керовані перемикачі; 6 – проточний сенсор з досліджуванним середовищем; 7 – перетворювач струм – напруга; 8, 9 – синхронні детектори; 10, 11 – підсилювачі низької частоти; 12, 13 – фазочутливі детектори; 14, 15 – фільтри нижніх частот; 16 – мікродвигун; 17 – реохорд; 18 – реєструючий прилад; 19 – генератор імпульсів низької частоти.

Алгоритм роботи наведеної схеми забезпечує однозначне вимірювання відносної частотної дисперсії сенсора $\varepsilon(\omega)$ за відносною різницею опорів плечей r_1 та r_2 реохорда, співвідношення яких для кожного значення випробувальної частоти встановлюється після виконання тактів комутаційно-модуляційного перетворення:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{1 - k_3}{k_3} = \frac{r_1 - r_2}{2r_2}, \quad (1)$$

де $k_3 = \frac{r_2}{r_1 + r_2}$ – коефіцієнт передачі реохорду 17.

Порівняно з відомими вимірювачами частотної дисперсії електропровідності кондуктометричних сенсорів підвищена точність реєстрації дисперсійної кривої за рахунок виключення інструментальних похибок від температурної та часової нестабільності коефіцієнтів перетворення елементів вимірювальної схеми та непостійності напруг генераторів 1 і 2.

Експериментальні дослідження показали можливість реєстрації відносного значення частотної дисперсії водних емульсій органічних та неорганічних речовин у діапазоні 0,05...50 % з відносною похибкою не більше 0,5 % в діапазоні частот 0,01...30 МГц. Проте конструктивні особливості кондуктометричних сенсорів не завжди дозволяють врахувати реактивну складову провідності комірки. Крім того, на результат вимірювання впливає нестабільність амплітуд генераторів опорної та випробувальної частот, що не дозволяє досягнути високої точності вимірювань.

Ці недоліки усуваються використанням структури та алгоритму вимірювання частотної дисперсії електропровідності, що забезпечує відтворення частотно-дисперсійної характеристики досліджуваного середовища незалежно від реактивних складових провідності сенсору та непостійності амплітуд генераторів опорної та випробувальної частот.

Функціональна схема запропонованого пристрою наведена на рис. 2.

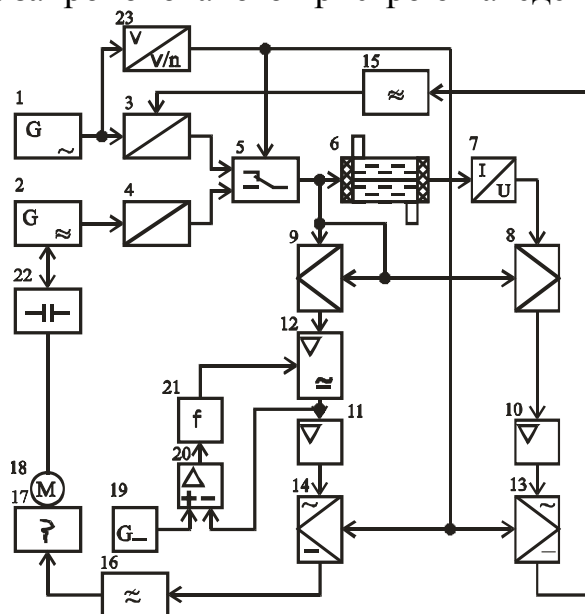


Рисунок 2 – Пристрій для вимірювання частотної дисперсії електропровідності широкопasmових кондуктометричних сенсорів

На схемі показані: 1, 2 – генератори опорної та випробувальної частот; 3, 4 – атенюатори; 5 – керований перемикач; 6 – кондуктометричний сенсор з досліджуванним середовищем; 7 – перетворювач струм – напруга; 8, 9 – синхронні детектори; 10, 11 – підсилювачі низької частоти; 12 – керований широкосмуговий підсилювач; 13, 14 – фазочутливі детектори; 15, 16 – фільтри нижніх частот; 17 – реєстратор; 18 – мікродвигун стрічкопротягувального механізму реєстратора; 19 – джерело постійної напруги; 20 – диференційний підсилювач; 21 – інтегратор; 22 – блок регулювання частоти генератора 2; 23 – дільник частоти.

Змінна складова напруги $U_{A2(\omega_2)}$, яка після перетворення реєструється реєстратором 17, є пропорційною частотній дисперсії електропровідності γ_{ω_2} :

$$U_{A2(\omega_2)} = \pm \frac{\gamma_{\omega_2}}{2 \pm \gamma_{\omega_2}} U_{G3}, \quad (2)$$

де $\omega_2 = var$ – частота випробувальної напруги; U_{G3} – вихідна напруга генератора G3.

Для багатокомпонентних слабоконцентрованих рідких середовищ дисперсія електропровідності сенсора у діапазоні частот до 30...50 МГц не перевищує 0,5...5 % (відносна дисперсія $\gamma_{\omega_2} = 0,005...0,05$), тоді

$$U_{A2(\omega_2)} = \pm S_0 \gamma_{\omega_2}, \quad (3)$$

де S_0 – постійна крутизна перетворення відносної частотної дисперсії електропровідності у напругу.

З отриманого рівняння видно, що напруга, яка реєструється, пропорційна відносній частотній дисперсії електропровідності на змінній випробувальній частоті ω_2 . За формою дисперсійної характеристики визначають кількісний та якісний склад досліджуваної речовини.

При створенні радіовимірювальних приладів широке застосування знаходять сенсори, які генерують електрорушійну силу (ЕРС) під дією фізичних, хімічних або механічних впливів. Прикладом таких пристроїв можуть служити хімічні джерела струму, термопари, фотодіоди, п'єзоелектричні датчики тощо. Такі елементи характеризуються двома основними параметрами – величиною ЕРС і внутрішнім опором. Для забезпечення високих метрологічних характеристик вимірювальної апаратури, до складу якої входять такі сенсори, необхідно мати можливість з високою точністю вимірювати залежності зміни опору від варіації ЕРС.

Для високоточних вимірювань малих змін опору при варіації ЕРС часто застосовують вимірювальні комутаційні мости, які потенційно мають високу чутливість, завадозахищеність і точність. Але при невірноваженості мосту комутація вимірювальної діагоналі викликає періодичні зміни вхідного опору мосту і, як наслідок, струми в діагоналі живлення. У момент рівноваги комутація вимірювальної діагоналі не викликає змін вхідного опору мосту. Однак, при цьому виникає додаткова похибка вимірювань від виникнення змінної складової ЕРС двополюсника в діагоналі живлення мосту, обумовлена періодичним перериванням вимірювальної діагоналі. Оскільки частота завади збігається з резонансною частотою індикатора рівноваги, зазначену похибку важко виключити.

Тому в роботі запропонований новий підхід до побудови мостових вимірювальних схем, який відрізняється від традиційних розширенням

функціональних можливостей, відсутністю необхідності використання зовнішньої напруги для живлення мосту, забезпечує підвищення точності і чутливості вимірювання внутрішнього опору і ЕРС.

На рис. 3 наведена структура запропонованої мостової схеми з комутаційно-модуляційним перетворенням.

До складу мостової схеми з комутаційно-модуляційним перетворенням входить вимірювальний міст 1, в одне з плечей якого включений досліджуваний активний двополусник 2 (R_x, E_x). Інші плечі утворені магазином опорів 3 (R_4) і зразковими резисторами 4 і 5 (R_2 і R_3). У вимірювальну діагональ мостової схеми включений автоматичний ключ 6, а до діагоналі живлення підключений диференціальний підсилювач 7. Схема також цифровий вольтметр 8, автоматичні ключі 9 і 10, конденсатори 11 і 12, нульовий індикатор 13 та мультівібратор 14.

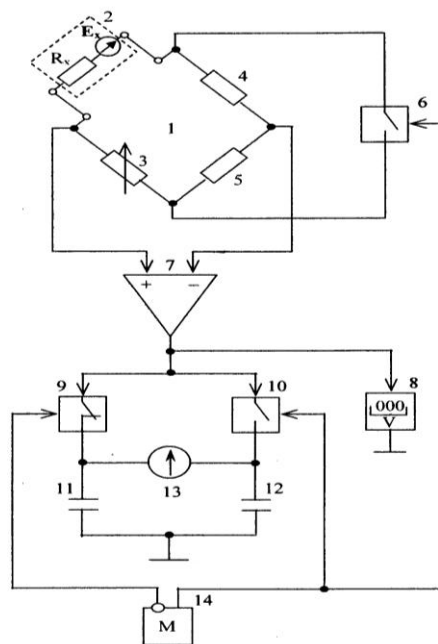


Рисунок 3 – Структура мостової схеми з комутаційно-модуляційним перетворенням

Під дією ЕРС E_x активного двополусника 2 через плечі мостової схеми 1 при розімкнутому ключі 6 протікає контурний струм I_1 :

$$I_1 = \frac{E_x}{R_x + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (4)$$

На входи диференціального підсилювача 7 впливає падіння напруги від струму I_1 на резисторах R_3 і R_4

$$U_1 = (R_3 + R_4) I_1 = \frac{(R_3 + R_4) E_x}{R_x + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (5)$$

Напруга U_1 підсилюється диференціальним підсилювачем 7 і через замкнутий автоматичний ключ 9 заряджає конденсатор 11 до напруги

$$U_2 = K_1 U_1 = K_1 \frac{(R_3 + R_4) E_x}{R_x + R_2 + R_3 + R_4}, \quad (6)$$

де K_1 – коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача.

При виконанні повного циклу алгоритму роботи пристрою і вирішенні рівняння відносно вимірюваного опору R_x , отримуємо:

$$R_x = R_4 \frac{R_2}{R_3}. \quad (7)$$

Таким чином, внутрішній опір активного двополусника 2 визначається незалежно від його ЕРС за встановленими значеннями магазину опорів 3 і величинами опорів резисторів плечей відношення мостової схеми 4 і 5.

При нульовому положенні індикатора 13 на вольтметр 8 подається напруга

$$U_8 = K_1 \frac{R_3 E_x}{R_2 + R_3}. \quad (8)$$

З рівняння видно, що покази вольтметра 8 пропорційні ЕРС активного двополюсника 2 і не залежать від його внутрішнього опору R_x .

Використання вимірювального пристрою, що реалізує мостовий метод вимірювання з комутаційно-модуляційним перетворенням, дозволяє здійснити роздільний вимір ЕРС і внутрішнього опору активних двополюсників за допомогою однієї мостової схеми без використання зовнішнього джерела живлення.

При застосуванні багатodeкадного магазину опорів підвищується чутливість і точність вимірювання внутрішнього опору активних двополюсників.

Важливою задачею в деяких сферах науки і техніки є підвищення чутливості і точності виявлення металевих предметів на провідному фоні досліджуваного середовища, що забезпечить виявлення малорозмірних металевих деталей і достовірну фіксацію їх місцезнаходження в досліджуваному просторі.

В роботі запропонована структура пристрою (рис. 4), який забезпечує вирішення цієї задачі з використанням методу комутаційно-модуляційних перетворень.

В диференціальному індукційному сенсори 1 плоскі котушки 2 і 3 виконані з однаковим числом витків на одній діелектричній основі 4, але з протилежним їх напрямком, і включені паралельно відносно автогенераторів 11 і 12.

За однакових частот автогенераторів через котушки 2 і 3 протікають однакові синфазні струми, які утворюють зустрічні магнітні поля Φ_1 і Φ_2 .

В процесі пошуку металевий предмет 21 потрапляє в змінне магнітне поле котушки 2, індукція якого в центрі плоскої котушки

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1 W_1}{2R_K} = \frac{\mu_0 P'_M}{2R_K F_1}, \quad (9)$$

де μ_0 – магнітна проникливість повітря; P'_M – магнітний момент, що створюється струмом I_1 котушки 2; W_1 – число витків котушки 2; R_K – середній радіус котушки 2; F_1 – площа котушки 2.

В результаті взаємодії котушки 2 з металевим предметом 21 за рахунок індукованих в ньому струмів магнітна індукція котушки зменшується на значення

$$\Delta B_1 = - \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{q}{l^6} \right) P'_M, \quad (10)$$

де q – коефіцієнт, який враховує форму і електричні властивості шуканого предмета 21; l – відстань до шуканого предмета 21.

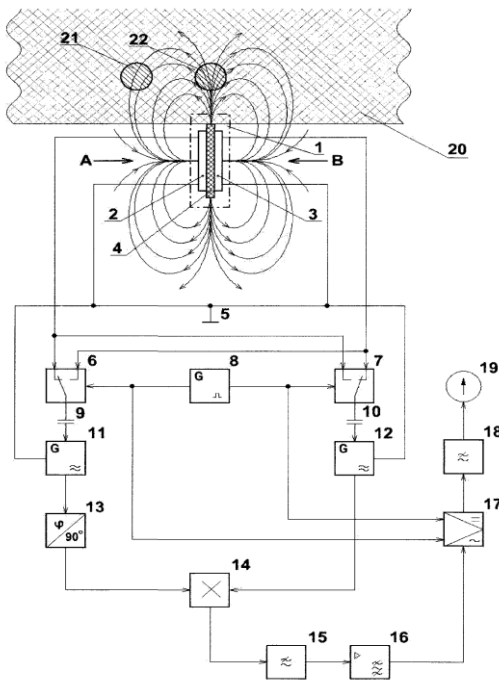


Рисунок 4 – Схема пристрою для виявлення малорозмірних металевих предметів

Частота автогенераторів 11 і 12 задається індуктивностями котушок 2 і 3 диференціального датчика 1 і послідовно з'єднаними конденсаторами 9 і 10, включеними в частото задаючі ланцюги цих автогенераторів. Так як індуктивності котушок 2, 3 і ємності конденсаторів 9, 10 однакові, то і частоти автогенераторів 11 і 12 також однакові.

В загальному випадку відносна зміна магнітної індукції є комплексною величиною

$$\delta_1 \varphi \approx \frac{\Delta B_1}{B_1}. \quad (11)$$

Резонансні частоти послідовних ланцюгів з індуктивності L_1 котушки 2 і ємності C_1 конденсатора 9 та індуктивності L_2 котушки 3 і ємності C_2 конденсатора 10 визначаються виразами:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 L_1 [1 + \delta_1 \varphi + \delta' \varphi]}}, \quad (12)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_2 L_2 [1 + \delta'' \varphi]}}, \quad (13)$$

де $\delta' \varphi$ – реакція провідності середовища 20; $\delta'' \varphi$ – реакція провідності середовища 20 в зоні дії магнітного потоку котушки 3.

При малих відносних змінах реактивних параметрів ($\delta_1 \varphi \rightarrow 0$) має місце явище захоплення частоти автогенераторів з близькими параметрами. Через це виникає зона нечутливості при використанні різницевої частоти в якості інформативного параметра. Однак, в режимі автозахоплення частот ($f_1=f_2=f$), різко змінюється фазовий зсув напруг розлагодженого та опорного автогенераторів.

Значення фазового зсуву визначається виразом

$$\Delta\varphi = \text{arctg} Q \frac{2\Delta f}{f} \approx Q \delta_1 \varphi, \quad (14)$$

де Q – добротність резонансного ланцюга; $\frac{\Delta f}{f} \approx 0,5 \delta_1 \varphi$ – відносне частотне розлагодження.

При періодичному перемиканні перемикачів 6 і 7 та виконанні комутаційно-модуляційних перетворень на індикатор 19 подається результуюча випрямлена напруга

$$U_8 = S_p \frac{2R_k F (u-1) R_{II}^3}{3\mu l^6}, \quad (15)$$

де S_p – результуюча крутизна перетворення автогенераторної схеми.

При переміщенні датчика 1 відносно досліджуваного середовища нульові покази індикатора 19 означають, що предмет пошуку знаходиться в площині, що розділяє зондуєчі магнітні поля Φ_1 і Φ_2 . При подальшому переміщенні датчика за знаком відхилення вказівника індикатора визначають вид матеріалу предмету пошуку, а за величиною відхилення – розміри і глибину його знаходження.

Перевагою запропонованого пристрою є його висока чутливість за рахунок усунення часового та температурного дрейфу нуля. Тільки за наявності металевого предмета в зоні дії індукційного датчика з'являється змінна складова фазового зсуву між напругами синхронізованих автогенераторів. Висока розрізняювальна здатність і усунення впливу провідного фону досліджуваного середовища досягнутого за рахунок зондування двома близько розміщеними магнітними полями, які формуються хоч і фізично різними, але практично однаковими синхронізованими за частотою змінними струмами з рівними амплітудами. Найменше порушення симетрії магнітних полів викликає появу інформаційного сигналу.

Розглянуті підходи структурно-алгоритмічного синтезу радіовимірювальних приладів з комутаційно-модуляційними перетвореннями для сенсорів з зосередженими параметрами забезпечують підвищення чутливості та точності вимірювань, сприяють розширенню функціональних можливостей радіовимірювальних приладів.

В третьому розділі досліджені принципи структурної побудови радіовимірювальних приладів, сенсори яких є елементами з розподіленими параметрами.

При частотах вищих за 30 МГц (у метровому діапазоні хвиль) починається перехідна область, де довжина хвилі все ще значно більша за розміри елементів схеми, і джерела випромінювання ще не мають значного впливу на похибки вимірювання хвильових властивостей.

В діапазоні НВЧ довжина хвилі має один порядок з розмірами елементів схеми або менша за них. Це приводить до того, що в рівняннях, якими описують електромагнітний стан системи, з'являються складові, що залежать від часу.

НВЧ-сенсори дозволяють вимірювати параметри багатьох речовин навіть в тих випадках, де високочастотні сенсори не можуть бути використані через їх низьку добротність. Із зростанням частоти все більший вплив на результат вимірювання має реактивна складова струму порівняно з активною, тому добротність системи зростає.

При використанні НВЧ сенсорів є можливість значно підсилити вибірковість до певної структури або хімічного компонента середовища вибором оптимальної частоти вимірювання. Це пов'язано з тим, що час релаксації деяких компонентів речовин лежить в області значень періоду НВЧ коливань (наприклад, час релаксації молекул води становить приблизно 10^{-10} с). На деяких частотах спостерігається резонансне поглинання НВЧ енергії середовищем, чутливість сенсора в цьому випадку збільшується, поглинання енергії має вигляд яскраво вираженого резонансного піка. За положенням на частотній характеристиці і за амплітудою резонансу можна судити про якісний та кількісний склад середовища.

Для типової вимірювальної хвилеводної комірки, що є відрізком прямокутного хвилеводу з плоскошаровим діелектриком слабопоглинаючим діелектриком, частотна залежність коефіцієнта відбиття періодична.

В роботі досліджена та проаналізована залежність фазового кута коефіцієнта передачі від зміни довжини зразка l , довжини хвилі λ та діелектричної проникності зразка, отримані відповідні частотні залежності $arg \dot{T}$ хвилеводної вимірювальної

комірки до довжини зразка l (S_l^{argT}), до дійсної ε' ($S_{\varepsilon'}^{argT}$) та уявної ε'' ($S_{\varepsilon''}^{argT}$) частин комплексної діелектричної проникності.

На рис. 5 наведені частотні залежності коефіцієнтів S_l^{argT} (а) та $S_{\varepsilon'}^{argT}$ (б).

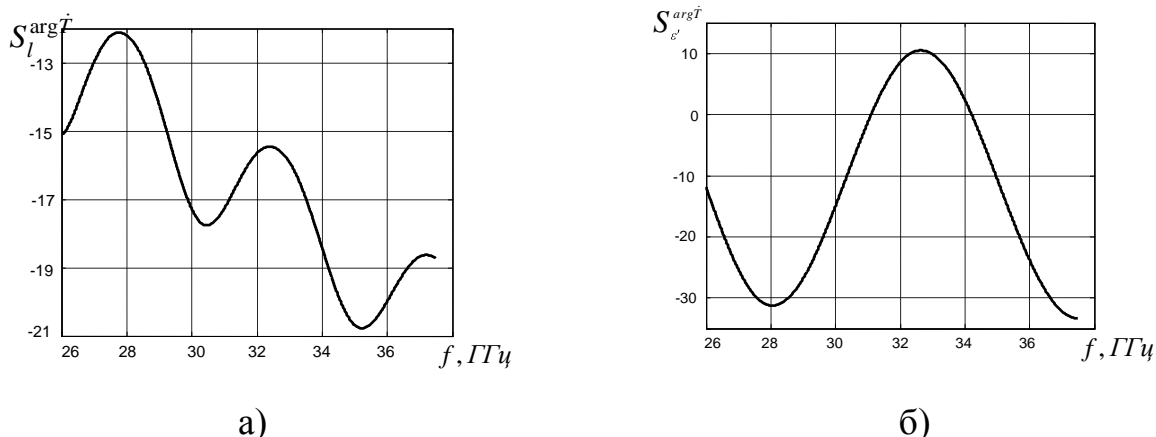


Рисунок 5 – Частотні залежності коефіцієнтів S_l^{argT} (а) та $S_{\varepsilon'}^{argT}$ (б) при $l = 20 \text{ мм}$, $\varepsilon = 2(-i0,0064)$

Проведений аналіз залежності фазового кута коефіцієнта передачі дозволяє зробити такі висновки: частотні залежності для коефіцієнтів S_i^{argT} ($i = l; \varepsilon'; \varepsilon''$) мають осцилюючий характер, без строгої прив'язки „екстремум – резонансна частота”, при збільшенні частоти відсутнє однозначне збільшення значень коефіцієнтів S_i^{argT} .

Доцільніше проводити вимірювання на резонансних частотах. При цьому вимірювання „на прохід” призведе до менших похибок порівняно з вимірюваннями характеристик відбитої хвилі. Крім цього, точність вимірювань буде більшою при довгих зразках, ніж при коротких, причому довжина зразків обмежуватиметься, в першу чергу, чутливістю вимірювальних приладів.

В діапазоні НВЧ радіохвиль у вологих матеріалах спостерігається поглинання електромагнітної енергії на частотах релаксації, в області дисперсії комплексної провідності. Коефіцієнт відбиття, який має мінімальне значення на частоті релаксації, збільшується в процесі сушіння матеріалів і виробів в НВЧ полі. Тому за значенням коефіцієнта відбиття визначають остаточну вологість матеріалу.

В роботі запропонована структурна реалізація пристрою для вимірювання коефіцієнта відбиття у смузі поглинання, в якому за рахунок автоматичного порівняння бічних частот шляхом вимірювання відношення мінімальної амплітуди відбитих НВЧ коливань до амплітуди падаючих НВЧ коливань підвищується точність вимірювання коефіцієнта відбиття в центрі смуги поглинання. Структурна схема пристрою наведена на рис. 6.

Робота вимірювача здійснюється таким чином. Початкові НВЧ коливання генератора 19 (рис. 6) розділяються по фазі на 90° квадратурним фазорозщеплювачем 20, створюючи на його виході два ортогональних коливання:

$$U_1(t) = a_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (16)$$

$$U_2(t) = a_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (17)$$

де a_1 , ω_1 і φ_1 – амплітуда, частота і фаза НВЧ коливань.

Коливання (16) і (17) модулюються по амплітуді в НВЧ модуляторах 21 і 22 низькочастотними коливаннями генератора 26, які також розділяються за фазою на 90° квадратурним фазорозщеплювачем 24.

Глибину модуляції НВЧ коливань вибирають невеликою у межах 5... 10% ($m=0,05...0,1$), щоб потужність НВЧ коливань була зосереджена в основному у несучих коливаннях частоти ω_i , які впливають на неоднорідне середовище.

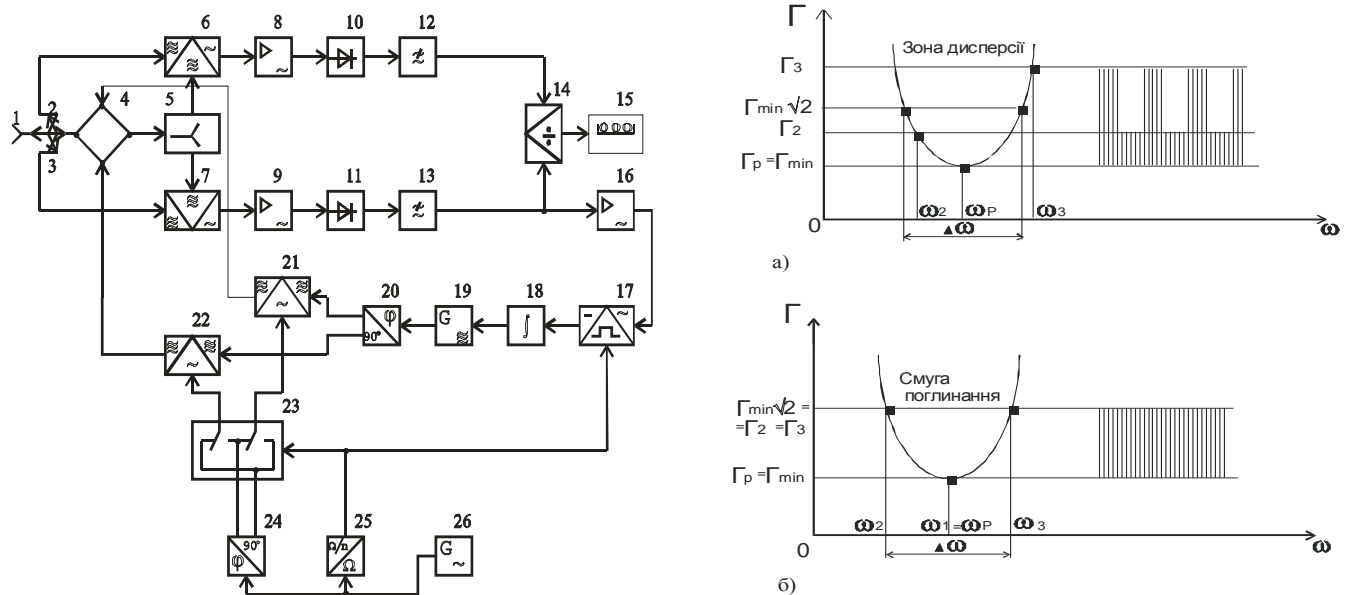


Рисунок 6 – Вимірювач коефіцієнта відбиття з налаштуванням на частоту поглинання за рівністю бічних частот

За допомогою направлених відгалужувачів 2 і 3 виділяються падаючі на неоднорідне середовище і відбиті від нього НВЧ коливання. Амплітуда відбитих коливань пропорційна коефіцієнту відбиття середовища, котрий в смузі поглинання істотно залежить від частоти опромінюючих коливань (рис. 6, а і б).

Мінімальне значення коефіцієнта відбиття має місце при збігу частоти збуджуючих коливань ω_i з частотою ω_p релаксації молекул води вологого матеріалу ($\omega_p = \omega_i$). Модуль коефіцієнта відбиття в залежності від співвідношення частот ω_p і ω_i можна показати таким чином:

$$\Gamma_i = \sqrt{4\Gamma_p^2 + (1 - \Gamma_p)^2 \zeta_i^2} / \sqrt{4 + (1 + \Gamma_p)^2 \zeta_i^2}, \quad (18)$$

де $\Gamma_p = \Gamma_{min}$ – коефіцієнт відбиття при збігу частот $\omega_p = \omega_i$; $\zeta_i = 2Q\Delta\omega_i / \omega_p$ – узагальнене відхилення частоти НВЧ сигналу відносно частоти релаксації ω_p ; Q – еквівалентна добротність у смузі поглинання; $\Delta\omega = \omega_i - \omega_p$ – відхилення частоти НВЧ сигналу на частотах ω_i модульованих коливань.

При зміні положення контактів комутатора 23 відбувається взаємне заміщення низькочастотних модулюючих коливань. При цьому контрольоване середовище послідовно опромінюється сумарними та різницевиими НВЧ коливаннями.

При змішуванні виділених направленим відгалужувачем 3 відбитих НВЧ коливань з різницевиими НВЧ коливаннями у балансних змішувачах 6 і 7 формуються низькочастотні коливання з різницевиими частотами $\omega_3 - \omega_1 = \Omega_1$ і

$\omega_3 - \omega_2 = 2\Omega_1$. Зі спектру цих коливань вибірковими підсилювачами 8 і 9 виділяють низькочастотні коливання з подвоєною частотою модуляції:

$$U'_{10}(t) = S_1 \Gamma_2 K_1 m^2 a'_H a''_H \cos(2\Omega_1 t + \Phi'_2), \quad (19)$$

$$U'_{11}(t) = S_1 K_1 m^2 a'_H a''_H \cos(2\Omega t + \Phi'_3), \quad (20)$$

де Γ_2 – модуль коефіцієнта відбиття неоднорідного середовища на частоті ω_2 ; S_1 – крутизна балансного змішування; K_1 – коефіцієнт вибіркового підсилення; a'_H і a''_H – амплітуда несучих коливань модульованих сигналів; Φ'_2 – фаза низькочастотних коливань при опромінюванні середовища сумарними НВЧ коливаннями; Φ'_3 – фаза низькочастотних опорних коливань.

Після детектування та ділення на індикатор 15 надходить напруга

$$U'_{12} = S_2 \Gamma_2(\omega_2). \quad (21)$$

За періодичної роботи комутатора 23 на виході вибіркового підсилювача 9 по чергово виділяються пакети низькочастотних сигналів, амплітуди яких пропорційні коефіцієнтам відбиття Γ_2 і Γ_3 . При їх нерівності виникає обвідна амплітуди низькочастотних сигналів, період повторення якої рівний періоду перемикавання комутатора 23, вона випрямляється синхронним детектором 17 і змінює частоту НВЧ генератора 19. Процес регулювання здійснюється до отримання нульової напруги частоти комутації.

Таким чином, частота опромінюючих НВЧ коливань точно налагоджується на частоту релаксації ω_p , наприклад, на частоту релаксації диполів молекул води вологого матеріалу, що відповідає максимуму поглинання електромагнітної енергії вологим матеріалом.

Застосування апаратури, яка реєструє зміни відбитого від середовища чи матеріалу НВЧ сигналу, дозволяє безконтактно одержувати різноманітну інформацію про стан об'єкту, який досліджується. За значеннями коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) можна одержувати інформацію про вологість матеріалу, концентрацію технологічних розчинів та про інші параметри.

Суттєвим джерелом похибок при вимірюванні КСХ є неминуча нестабільність і неідентичність каналів падаючих та відбитих хвиль. Це зумовлено нерівністю коефіцієнтів передач направлених відгалужувачів падаючих та відбитих хвиль, відмінністю в чутливості НВЧ детекторів, згладжуючих фільтрів, підсилювачів і інших елементів двоканального вимірювача відношення порівнюваних напруг.

В роботі обґрунтовано використання функціональної схеми вимірювача КСХ (рис. 7), яка забезпечує підвищення точності вимірювань за рахунок мінімізації перелічених вище похибок, особливо в області великих значень КСХ.

Робота пристрою здійснюється таким чином. Сигнал НВЧ генератора 1 надходить на амплітудний модулятор 2, де модулюється напругою низькочастотного генератора 21. Амплітудно-модульований НВЧ сигнал з глибиною модуляції m через НВЧ атенуатор 3 і направлений відгалужувач 4 відбитої хвилі надходить на НВЧ ключ 5, що виконаний на *pin*-діодах. НВЧ ключ управляється низькочастотною прямокутною напругою, що формується дільником частоти 22 з напруги низькочастотного генератора 21.

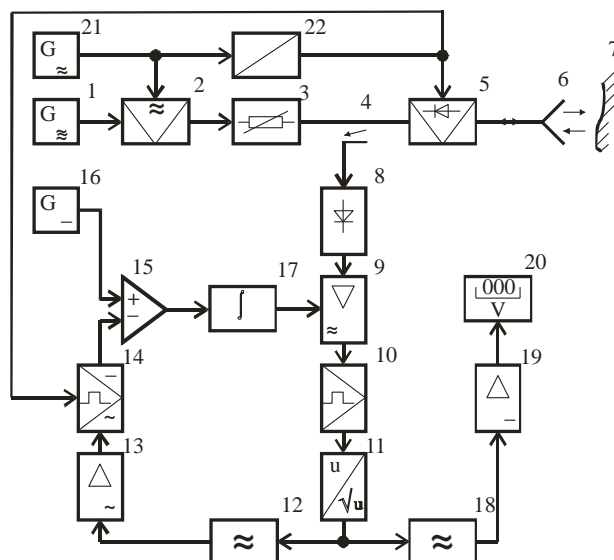


Рисунок 7 – Вимірювач КСХ з комутаційно-модуляційним перетворенням

В закритому стані НВЧ ключ 5 відбиває НВЧ сигнал. При відкритому ключі модульований НВЧ сигнал з атенюатора 3 надходить на антену 6 і випромінюється в напрямку досліджуваного об'єкту 7. Відбитий від об'єкту сигнал знов надходить на антену і через відкритий НВЧ ключ 5 та відгалужувач 4 надходить на НВЧ детектор 8, на виході якого виділяється напруга низькочастотної обвідної.

Амплітуда напруги обвідної U_1 за квадратичної характеристики НВЧ детектора визначається виразом:

$$U_1 = k_1 k_2 S_1 m^2 \Gamma^2 P_0, \quad (22)$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти передачі атенюатора 3 та направлено відгалужувача 4; S_1 – чутливість НВЧ детектора 8; m – глибина модуляції; Γ – коефіцієнт відбиття об'єкту 7; P_0 – потужність НВЧ генератора 1.

При закритому ключі 5 модульований НВЧ сигнал з виходу атенюатора 3 потрапляє на вхід направлено відгалужувача 4. Амплітуда напруги обвідної U_2 при цьому буде мати вигляд

$$U_2 = k_1 k_2 S_1 m^2 P_0. \quad (23)$$

Внаслідок того, що частота комутації ключа 5 менша частоти низькочастотного генератора завдяки дільнику частоти 22, напруги обвідних на виході НВЧ детектора 8 при безперервній роботі НВЧ ключа 5 будуть мати вигляд послідовності пакетів низькочастотних напруг з амплітудами U_1 і U_2 .

За періодичної роботи ключа 5 різницева напруга з виходу диференціального підсилювача заряджає інтегратор 17, вихідна напруга якого надходить на керуючий вхід регульованого вибіркового підсилювача 9. Напрямок регулювання його коефіцієнта підсилення k_3 вибраний таким, щоб різниця вхідних напруг диференціального підсилювача 15 прагнула до нуля.

Коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 9 приймає значення

$$k_3 = \left(\frac{2U_0}{k_4 k_5 k_6 S'_0 m \Gamma \sqrt{P_0}} \right)^2, \quad (24)$$

де $U_0 = const$ – опорна напруга; k_4 – коефіцієнт передачі фільтру 12; k_5 – коефіцієнт підсилення підсилювача 13; k_6 – коефіцієнт передачі синхронного детектора 14.

Фільтром 18 нижніх частот виділяється також постійна складова напруги, яка підсилюється підсилювачем 19 постійної напруги і вимірюється вольтметром 20. З урахуванням значення коефіцієнта підсилення k_3 вона набуває вигляду

$$U_{10} = \frac{k_7 k_8}{k_4 k_5 k_6} \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} U_0. \quad (25)$$

Коефіцієнти передачі фільтрів 12 і 18 вибирають рівними ($k_4 = k_7$), а коефіцієнт підсилення підсилювача 13 змінної напруги з урахуванням коефіцієнта передачі синхронного детектора 14 встановлюють рівним коефіцієнту підсилення підсилювача 19 ($k_5 k_6 = k_8$). За виконання цих умов напруга, що вимірюється вольтметром 20 стає рівною:

$$U_{10} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} U_0 = K_x U_0. \quad (26)$$

Завдяки автоматичному регулюванню коефіцієнта підсилення вибіркового підсилювача 9 на результат вимірювань не впливає нестабільність параметрів елементів, що входять в одноканальний тракт перетворення (k_2, S_1, k_3, S_2, S_3). Не впливає також на результат виміру і непостійність потужності P_0 НВЧ генератора 1. Оскільки коефіцієнт K_x в розглянутому пристрої вимірюється безпосередньо, то точність виміру зі зростанням його значення не знижується.

За попередньо відомого компонентного складу досліджуваного середовища доцільно використання резонаторних сенсорів, налаштованих на характерні частоти певних компонентів. Резонаторні перетворювачі часто будуються за двоканальною схемою з використанням двох резонансних сенсорів – опорного і вимірювального.

Результат вимірювання оцінюють за зсувом резонансної частоти вимірювального резонатора, що взаємодіє з досліджуваним матеріалом. Проблема забезпечення високої точності полягає в тому, що вимірювальний резонатор, має низьку добротність і відповідно пологому резонансному характеристику.

Запропоновані в роботі методи вимірювання зсуву резонансної частоти НВЧ сенсорів дозволяють зменшити похибки вимірювання, обумовлені низькою добротністю відкритого резонансного сенсора.

Функціональна схема перетворювача, яка реалізує один із запропонованих методів вимірювання, показана на рис. 8.

Мікроконтролер CPU з тактових імпульсів формує сигнал частотою F_p , який прямує на ЦАП U1. На виході ЦАП циклічно утворюється ступінчаста напруга, яка надходить на елемент задання частоти керованого НВЧ генератора G1. При цьому вихідна частота генератора лінійно змінюється від f_{min} до f_{max} . Через підсилювачі A1 і A2 НВЧ напруга прямує на опорний Z1 і вимірювальний Z2 резонатори.

При попаданні частоти коливань в смугу пропускання резонаторів, на виходах амплітудних детекторів U2 і U3 виділяються відеоімпульси U_1 і U_2 , які повторюють форму резонансних кривих резонаторів. Обвідні резонансних кривих поступають на блоки диференціювання U4 і U5. На їх виходах з напруг обвідних утворюються знакозмінні напруги с двома екстремумами. Екстремальні точки цих

напруг відповідають точкам найбільшої крутості резонансних кривих, а точки переходу через 0 – екстремумам обвідних.

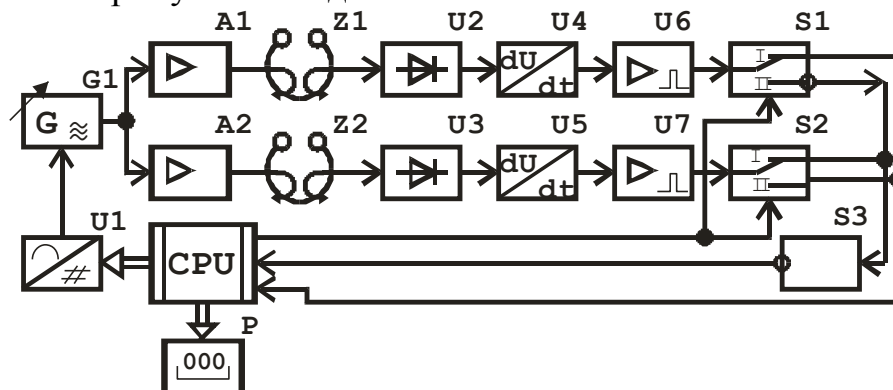


Рисунок 8 – Вимірювач зсуву частот резонансних датчиків

В підсилювачах-формуваачах U6 и U7 в моменти часу, що відповідають екстремальним точкам диференційованих напруг, утворюються позитивні і негативні короткі імпульси.

Значення частот позитивного $f_{н+}$ і негативного $f_{н-}$ екстремумів диференційованої обвідної вимірювального резонатора визначаються як:

$$f_{н+} = f_{н} \left(1 - \frac{1}{2Q_{н}\sqrt{3}} \right) \quad \text{та} \quad f_{н-} = f_{н} \left(1 + \frac{1}{2Q_{н}\sqrt{3}} \right), \quad (27)$$

де $f_{н}$, $Q_{н}$ – резонансна частота та добротність вимірювального резонатора.

Відповідно для опорного резонатора

$$f_{о+} = f_{о} \left(1 - \frac{1}{2Q_{о}\sqrt{3}} \right) \quad \text{та} \quad f_{о-} = f_{о} \left(1 + \frac{1}{2Q_{о}\sqrt{3}} \right). \quad (28)$$

Короткі імпульси з підсилювачів-формуваачів поступають на входи керованих мікроконтролером перемикачів S1 и S2, сигнали яких керують запуском та зупинкою таймера мікроконтролера.

В першому такті вимірювання перемикачі S1 и S2 (рис. 8) знаходяться в положенні I. В цьому випадку таймером формується часовий інтервал між імпульсом, що відповідає позитивному екстремуму продиференційованої напруги резонатора Z1, та інвертованим імпульсом, що відповідає негативному екстремуму резонатора Z2.

З урахуванням часу розгортки частоти збуджуючого НВЧ коливання генератора G1 часовий інтервал, сформований в першому такті, визначиться:

$$\Delta t_1 = m \left(f_{н+} - f_{о-} \right) \approx m \Delta f_1, \quad (29)$$

де m – часовий масштаб, с/Гц.

Після завершення першого циклу розгортки частоти НВЧ генератора по сигналу мікроконтролера перемикачі S1 и S2 встановлюються в положення II.

Часовий інтервал, сформований в першому такті, визначиться співвідношенням:

$$\Delta t_2 = m \left(f_{о+} - f_{н-} \right) \approx m \Delta f_2. \quad (30)$$

Протягом першого і другого часових інтервалів у внутрішньому лічильнику мікроконтролера здійснюється підрахунок імпульсів.

При умові співвідношення частот заповнення лічильника F_3 , керування ЦАП F_p і тактової частоти F_T мікроконтролера

$$F_p = k_p F_3 = k_p k_3 F_T, \quad (31)$$

де k_p і k_3 – коефіцієнти ділення тактової частоти, часовий масштаб m становить:

$$m = \frac{T}{f_{\max} - f_{\min}} = \frac{k_p}{F_T (f_{\max} - f_{\min})}, \quad (32)$$

де T – період розгортки частоти НВЧ генератора.

З урахуванням цього, кількість імпульсів N_1 та N_2 , отриманих в першому та другому тактах вимірювань:

$$N_1 = \frac{K_p}{f_{\max} - f_{\min}} \left[f_H \left(1 + \frac{1}{2Q_B \sqrt{3}} \right) - f_o \left(1 - \frac{1}{2Q_o \sqrt{3}} \right) \right], \quad N_2 = \frac{K_p}{f_{\max} - f_{\min}} \left[f_o \left(1 + \frac{1}{2Q_o \sqrt{3}} \right) - f_H \left(1 - \frac{1}{2Q_H \sqrt{3}} \right) \right]. \quad (33)$$

Підрахунок різниці імпульсів, отриманих в першому і другому тактах вимірювання, дозволяє отримати результат, пропорційний різниці резонансних частот резонаторів:

$$N = N_1 - N_2 = \frac{2K_p (f_H - f_o)}{f_{\max} - f_{\min}}. \quad (34)$$

З отриманого результату (34) видно, що кількість імпульсів пропорційна різниці резонансних частот резонаторів і не залежить від нестабільності частоти тактового генератора, значень добротності опорного та вимірювального резонаторів. Завдяки цьому забезпечується можливість підвищення на 7...10% точності вимірювання малих зсувів частоти низькодобротних резонаторів.

В четвертому розділі досліджені принципи структурної побудови радіометричних вимірювальних приладів.

Вимірювання власного випромінювання діелектричних речовин та виробів дозволяє оцінювати їх склад, структуру, кількісні і якісні показники.

Власне електромагнітне випромінювання пов'язане з тепловими флуктуаціями носіїв електричного заряду і характеризується нерівномірним спектральним розподілом енергії.

Приймання ЕМВ із навколишнього (вільного) простору здійснюється за допомогою НВЧ приймача, чутливим елементом якого є антена. При цьому слід враховувати, що процес впливу на приймач випромінювання від досліджуваного об'єкту здійснюється на фоні попереднього стану термодинамічної рівноваги з навколишнім середовищем.

Приймач випромінювання, відповідно до закону Кірхгофа, не тільки поглинає зовнішнє випромінювання, але і сам є джерелом рівноважного випромінювання. За термодинамічної рівноваги потік енергії, що поглинається антенною приймача, дорівнює потоку енергії, що випромінюється самою антенною. Тому приймач реагує тільки на те випромінювання, що викликає в ньому порушення термодинамічної рівноваги. У зв'язку з цим інформативною частиною потоку електромагнітного випромінювання є різниця:

$$\Delta S(f, T) = S^{OD}(f, T_1) - S^{IP}(f, T_2), \quad (35)$$

де $S^{од}(\omega, T_1)$ – спектральна щільність потужності випромінювання досліджуваного об'єкту за температури T_1 , на частоті f ; $S^{пр}(\omega, T_2)$ – спектральна щільність потужності випромінювання приймача за температури T_2 ($T_1 > T_2$) на тій же частоті.

Таким чином, приймання власного ЕМВ об'єкту досліджень можливе тільки в тому випадку, якщо випромінюючий об'єкт виведений з термодинамічної рівноваги з середовищем, у якому знаходиться приймач.

Для забезпечення можливості приймання радіотеплового випромінювання і оцінки його параметрів необхідна апаратура, яка має флуктуаційний поріг чутливості на рівні $10^{-22} \text{ Вт/Гц} \cdot \text{см}^2$. Як правило, власні шуми виміральної апаратури перевищують це значення (відношення сигнал/шум менше одиниці). У зв'язку з цим пряме підсилення досліджуваного сигналу недоцільно внаслідок ще більшого зниження цього показника. Тому можна зробити висновок про неможливість виділення в таких умовах інформативної складової за допомогою класичних методів.

З точки зору забезпечення високої чутливості і точності вимірювань, розширення функціональних можливостей і гнучкості побудови структурної схеми, перспективним є модуляційний метод. Проте, похибки існуючих схем модуляційних радіометрів не дозволяють виявити тонку структуру власного електромагнітного поля досліджуваних об'єктів. Істотне підвищення точності досягається використанням нульового модуляційного методу, який передбачає періодичне підключення виміральної схеми до виходу приймальної антени та її еквіваленту. Але нестабільність і несиметрія НВЧ ключів, що входять до складу автоматичного перемикача, не дозволяють реалізувати потенційну точність нульового методу.

В роботі запропонована структурна схема нульового комутаційно-модуляційного радіометру (рис. 9) без переривання сигналу антени, що дозволяє уникнути виникнення комутаційних завад в приймальному каналі і паразитної модуляції власних шумів радіометра.

Схема працює в два комутаційні такти. У першому такті, як показано на рис. 10, ключ U_6 відкритий, а ключ U_5 – закритий. Атенюатор A_1 при цьому зашунтований і його коефіцієнт передачі дорівнює 1. Величина абсолютної адитивної похибки при цьому набуває значення ΔP_1 і визначається вихідним опором атенюатора A_1 . Відносна мультиплікативна похибка, яка визначається неузгодженням змішувача U_2 з атенюатором A_1 набуває значення γ_1 .

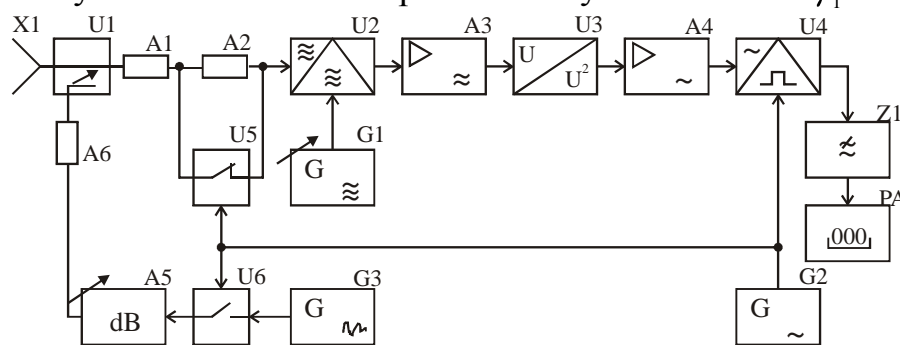


Рисунок 9 – Нульовий комутаційно-модуляційний радіометр без переривання сигналу антени

У другому такті ключ U5 закривається, а ключ U6 – відкривається. В цьому випадку сигнал від еталонного генератора шуму G3 надходить в приймальний канал радіометра через атенюатори A5, A6 і другий канал направлено відгалужувача U1. На виході направлено відгалужувача U1 при цьому підсумовуються потужності двох шумових сигналів. Напряга на виході квадратичного детектора набуває вигляду

$$U_2 = S_1^2 S_2^2 K_1^2 \left[\gamma_1 P_x + S_3^2 S_4^2 S_5^2 P_E \right] + \Delta P_2, \quad (36)$$

де S_3 , S_4 і S_5 – коефіцієнти передачі направлено відгалужувача U1, атенюаторів A5 і A6; P_E – потужність генератора еталонного шуму; ΔP_2 – рівень власних шумів, що визначається вихідним опором атенюатора A2; γ_2 – похибка неузгодження змішувача U2 з атенюатором A2.

За періодичного перемикання ключів U5 і U6, на виході квадратичного детектора U3 формується низькочастотна обвідна, яка підсилюється підсилювачем A4 і випрямляється синхронним детектором U4. Випрямлена напряга згладжується фільтром нижніх частот Z1 і фіксується індикатором PA.

При виборі атенюаторів A1 і A2 з однаковими параметрами ($S_1 = S_2 = S$) вони мають однакові вихідні опори. Тому рівень власних шумів при перемиканні ключа U5 не змінюватиметься ($\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P$). Так само не зміниться і міра неузгодження змішувача U2 з атенюаторами A1 і A2 ($\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$).

З урахуванням рівності адитивної і мультиплікативної складових похибки, напряга на індикаторі PA визначиться виразом:

$$U_3 = \frac{1}{2} K_1^2 K_2^2 \left[\gamma^2 P_x + S^4 P_x + S_3^2 S_4^2 S_5^2 P_E \right], \quad (37)$$

де K_2 – коефіцієнт перетворення низькочастотної частини схеми.

Зміною ослаблення, що вноситься змінним атенюатором A5, встановлюють нульові покази індикатора PA ($U_3 = 0$). Значення потужності прийнятого сигналу з урахуванням (37) набуває вигляду:

$$P_x = \frac{S_3^2 S_4^2}{1 - S^2} S_5^2 P_E. \quad (38)$$

Якщо коефіцієнти передачі атенюаторів A1, A2 і A6 відповідають умові $\frac{S_3^2 S_4^2}{1 - S^2} = 1$, остаточно отримаємо вираз для оцінки потужності прийнятого сигналу

$$P_x = S_5^2 P_E. \quad (39)$$

З виразу (39) видно, що потужність прийнятого сигналу однозначно визначається коефіцієнтом передачі атенюатора A6.

Основна проблема вимірювання інтенсивності надслабких ЕМВ полягає в тому, що власні шуми вимірювальної апаратури перевищують рівень корисного сигналу. Часова і температурна нестабільність НВЧ підсилювача роблять визначальний вплив на результат виміру. Для забезпечення проведення вимірювань і оцінки власних шумів підсилювача в роботі запропоновані структура і алгоритм роботи радіометра з позитивним зворотним зв'язком у високочастотному тракті (рис. 10).

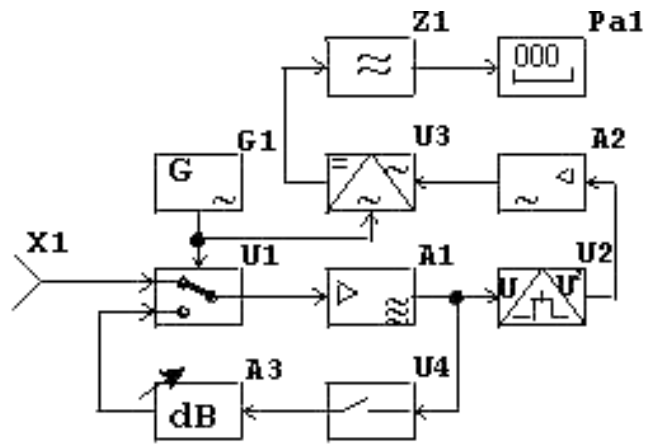


Рисунок 10 – Нульовий комутаційно-модуляційний радіометр із врівноваженням сигналу антени шумами мікрохвильового підсилювача

У початковому стані антена спрямована на об'єкт, випромінювальна здатність якого близька до 0. За розімкненого ключа U4 вихідний сигнал антени, що визначається рівнем її власних шумів, через комутатор U1 надходить на НВЧ підсилювач A1, а дисперсія вихідного сигналу підсилювача – сумою шумового сигналу антени X1 і власними шумами підсилювача A1.

Підсилений сумарний сигнал виділяється квадратичним детектором U2, на виході якого формується напруга U_3

$$U_3 = S_1 K_1 (\overline{U}_1^2 + \overline{U}_2^2), \quad (40)$$

де S_1 – крутизна перетворення квадратичного детектора U2; K_1 – коефіцієнт підсилення підсилювача A1; \overline{U}_1^2 і \overline{U}_2^2 – дисперсії відповідно вихідного шумового сигналу антени X1 і власних шумів підсилювача A1.

При зміні положення комутатора U1 вхід підсилювача A1 підключається до виходу атенюатора A3. Якщо вихідний опір атенюатора A3 співпадає з вихідним опором антени X1, рівень власних шумів підсилювача A1 не зміниться. Дисперсія вихідного сигналу підсилювача A1 визначається лише рівнем його власних шумів. Відповідно, вихідна напруга квадратичного детектора зміниться до значення U_4

$$U_4 = S_1 K_1 \overline{U}_2^2. \quad (41)$$

За періодичного перемикування комутатора U1 під керуванням генератора G1 на виході квадратичного детектора формується змінна напруга частоти комутації.

Змінюючи величину коефіцієнту передачі β атенюатора A3 від β_1 до β_2 згідно використовуваного алгоритму комутаційно-модуляційного перетворення, отримаємо значення відносної потужності $\Delta \overline{U}_1^2$ радіотеплового випромінювання досліджуваного об'єкту, приведеного до рівня власних шумів антени X1

$$\eta = \frac{\Delta \overline{U}_1^2}{U_1^2} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1} \frac{1}{1 - K_1 \beta_2}. \quad (42)$$

Беручи до уваги, що глибина позитивного зворотного зв'язку встановлюється невеликою ($K_1 \beta_2 \ll 1$), складовою $K_1 \beta_2$ можна нехтувати порівняно з 1. Тоді остаточно відносна потужність випромінювання досліджуваного об'єкту визначиться співвідношенням

$$\eta = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1}. \quad (43)$$

З отриманого виразу (43) видно, що значення відносної потужності не залежить від параметрів прямого каналу радіометра, а визначається лише коефіцієнтом передачі атенюатора А3, включеного в канал зворотного зв'язку.

Розглянута вище схема радіометра передбачає підсилення НВЧ сигналу перед його детектуванням. Це істотно звужує смугу частот випромінювання, що приймається, яка визначається смугою пропускання підсилувача.

На рис. 11 наведена структура радіометра з комутаційно-модуляційним перетворенням, що дозволяє проводити вимірювання в широкій смузі частот. Це досягається тим, що детектування прийнятого сигналу здійснюється без його попереднього підсилення.

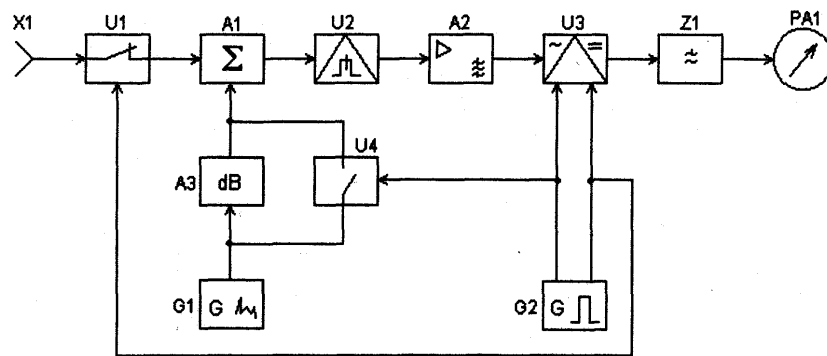


Рисунок 11 – Нульовий модуляційний радіометр з періодичним ослабленням еталонного шуму

В першому такті широкопasmового випромінювання від досліджуваного об'єкту приймається мікрохвильовою антеною X1 і через хвилеводний ключ U1 надходить на вхід хвилеводного суматора A1. На його другий вхід подається еталонний шум від генератора G1, який за розімкненого ключа U4 послаблюється градуйованим атенюатором A3. Сумарний сигнал детектується і усереднюється квадратичним детектором U2. Вихідна потужність P_E еталонного генератора шуму встановлюється на рівні, достатньому для її безпосереднього детектування квадратичним детектором U2 на лінійній ділянці його характеристики. Вихідна напруга квадратичного детектора визначиться виразом

$$U_1 = S \sqrt{P_x + \alpha P_E + \Delta P}, \quad (44)$$

де S – крутизна перетворення квадратичного детектора U2; P_x – потужність прийнятого випромінювання; α – коефіцієнт передачі атенюатора A3; ΔP та γ_1 – потужність власних шумів квадратичного детектора U2 та його відносна похибка, викликана впливом дестабілізуючих факторів.

У другому такті за сигналом з генератора G2 відбувається зміна положення ключів U1 і U4. На вхід квадратичного детектора U2 надходить лише сигнал P_E еталонного генератора шуму G1. Вихідна напруга квадратичного детектора при цьому визначається вихідною потужністю генератора G1 і рівнем власних шумів квадратичного детектора U2.

За періодичної роботи ключів U1 і U4 на виході квадратичного детектора

формується змінна складова напруги низької частоти з амплітудою

$$U_2 = \frac{S}{2} \left(+\gamma_1 \right) P_E \left(-\alpha \right) P_x \quad (45)$$

Низькочастотна напруга (45) підсилюється вузькосмуговим підсилювачем А2, налаштованим на частоту комутації генератора G2, і випрямляється синхронним детектором U3, який управляється низькочастотною напругою генератора G2. Після фільтрації випрямлена напруга реєструється вимірювальним приладом РА. Зміною коефіцієнта передачі атенюатора А3, досягають нульових показів індикатора РА. При цьому з урахуванням виразу (44) отримуємо:

$$P_x = \left(-\alpha \right) P_E \quad (46)$$

Таким чином, вимірювана потужність прийнятого мікрохвильового випромінювання за постійного рівня потужності генератора еталонного шуму ($P_x = const$) визначається лише коефіцієнтом передачі α атенюатора А3 і не залежить від рівня власних шумів радіометра і нестабільності параметрів елементів.

На рис. 12 наведена функціональна схема радіометра, що реалізує метод тритактової модуляції без електричної комутації елементів вимірювального тракту. Це підвищує точність вимірювання інтенсивності слабких радіовипромінювань, менших рівня власних шумів антени і радіометричного приймача.

Пристрій працює за програмою, яка записана в пам'яті мікро-ЕОМ 5. Програма забезпечує виконання основного і двох додаткових вимірювань відповідно до запропонованого способу й обробку отриманих надлишкових результатів

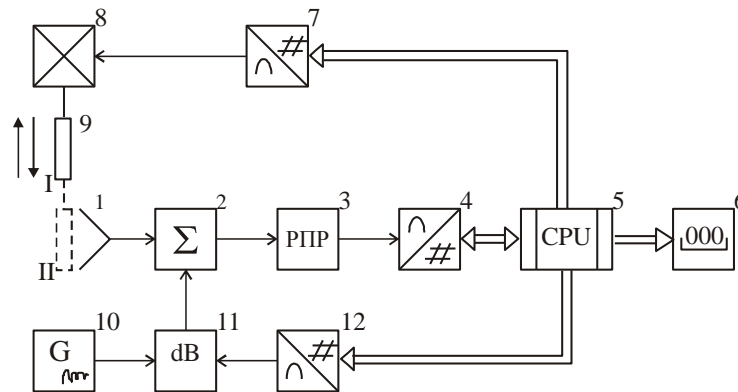


Рисунок 12 – Функціональна схема радіометра з тритактовою модуляцією.

Радіовипромінювання від досліджуваного об'єкта приймається антеною 1. Прийнятий широкосмуговий сигнал і власні шуми антени між собою некорельовані, тому дисперсія вихідного сигналу антени представляється у вигляді суми дисперсій:

$$\bar{U}_A^2 = \bar{U}_x^2 + \bar{U}_{ш1}^2, \quad (47)$$

де \bar{U}_A^2 – дисперсія вихідного сигналу антени; \bar{U}_x^2 – дисперсія прийнятого радіовипромінювання; $\bar{U}_{ш1}^2$ – дисперсія власних шумів антени.

Функція перетворення радіометричного приймача 3 лінійна щодо дисперсії (потужності) вхідного сигналу, вихідної постійної напруги і має заданий нахил. У процесі вимірювання через нестабільність параметрів перетворювальних ланок приймача і власних шумів реальна функція перетворення стає відмінною від номінальної за нахилом і положенням нуля. Непостійність коефіцієнта підсилення в

приймачі приводить до зміни чутливості, а варіація власних шумів викликає зсув нуля. Тому вихідну напругу U_1 приймача 3 можна представити у вигляді:

$$U_1 = S \left(1 + \gamma \left(\bar{U}_x^2 + \bar{U}_{ш1}^2 + \bar{U}_{ш2}^2 \right) \right) + \Delta U, \quad (48)$$

де S – номінальна крутизна перетворення приймача; $\gamma = \frac{\Delta S}{S}$ – відносна похибка від зміни чутливості (мультиплікативна похибка); $\bar{U}_{ш2}^2$ – дисперсія вхідних шумів приймача; ΔU – абсолютна похибка від зсуву нуля (адитивна похибка).

В другому такті модуляції вхід антени закривають радіопрозорою пластиною 9, переміщуючи її в положення II. Радіопрозора пластина 9 має коефіцієнт пропускання p , близький до одиниці ($p = 0,8 \dots 0,9$), що забезпечує послаблення досліджуваного радіовипромінювання на 10...20%. В третьому такті до прийнятого радіовипромінювання з дисперсією \bar{U}_x^2 додають у суматорі 2 шумове випромінювання \bar{U}_9^2 від генератора 10 еталонного шуму. Значення \bar{U}_9^2 вибирають рівним $(0,1 \dots 0,2) \bar{U}_x^2$. При цьому, забезпечується гранична межа його зміни на 10...20%, але в бік збільшення.

За результатами вимірювань у першому (U_1), другому (U_2) та третьому (U_3) тактах модуляції одержують остаточний результат вимірювання:

$$\bar{U}_x^2 = \frac{U_1 - U_2}{U_3 - U_1} \times \frac{\bar{U}_9^2}{1 - p}. \quad (49)$$

З отриманого виразу (49) видно, що результат обчислень не залежить від власних шумів антени і радіометричного приймача, від мультиплікативної і адитивної складових похибки цього приймача.

Використання основних принципів структурного синтезу радіометричної апаратури з комутаційно-модуляційним перетворенням дозволило вперше запропонувати схемні рішення радіометрів, які мають істотні перевагами в порівнянні з традиційними.

В п'ятому розділі розглянуті особливості метрологічного забезпечення та проектування радіометричної апаратури. Показано, що нормуючі параметри і характеристики НВЧ радіометрів, які в основному використовувались для приймання слабких сигналів з космосу, виявились недостатніми для оцінки метрологічних властивостей радіометрів ближньої дії, антени яких контактують або знаходяться в безпосередній близькості від досліджуваних об'єктів.

В той же час, в цій області ще досі не склалося однозначне розуміння характеристик радіометричних систем, в тому числі метрологічних. У зв'язку з цим в роботі розглянуті характеристики НВЧ-радіометрів, які впливають на результат і похибки вимірювання, та сформульовані визначення метрологічних характеристик, які властиві радіометрам ближньої дії.

Показано, що основними джерелами мультиплікативних та адитивних похибок у модуляційних радіометрах НВЧ діапазону є елементи високочастотного тракту. Наприклад, при основній похибці НВЧ радіометру 10...15%, похибка високочастотного тракту становить 9...14%, а низькочастотної частини перетворювача – лише 1%.

Розглянемо найпростішу структуру модуляційного радіометра з

перетворенням частоти, показано на рис. 13.

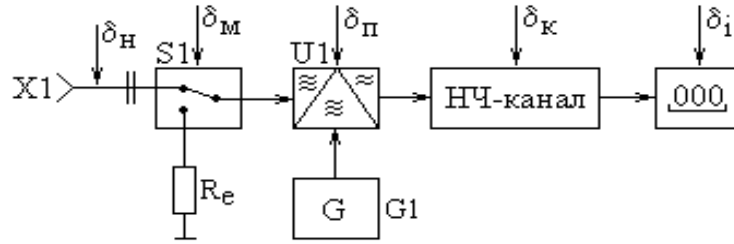


Рисунок 13 – Виникнення похибок в радіометричному перетворювачі

Основними джерелами похибок в модуляційному радіометричному перетворювачі, структура якого наведена на рис. 13, є неузгодження входу приладу з джерелом НВЧ випромінювання, вхідний модулятор та НВЧ-перетворювач.

Канал низькочастотного перетворення, який містить підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, підсилювач та фільтр частоти комутації, синхронний детектор, фільтр нижніх частот та індикатор, менше впливає на основну похибку вимірювання, оскільки операції підсилення, фільтрації та перетворення виконуються на низьких частотах, де є можливість проведення точної обробки інформативних параметрів сигналів.

Сумарну похибку радіометричного перетворювача (рис. 13) можна представити у вигляді суми

$$\delta_{PMB} = \delta_n + \delta_m + \delta_\pi + \delta_k + \delta_i, \tag{50}$$

де δ_n – похибка від неузгодження входу вимірювача із хвильовим опором джерела НВЧ-сигналу; $\delta_m, \delta_\pi, \delta_k, \delta_i$ – похибки відповідно модулятора, перетворювача частоти, низькочастотного каналу та індикатора.

Відносну середньоквадратичну похибку вимірювання вихідної потужності джерела НВЧ-сигналу радіометричного вимірювання можна визначити за формулою

$$\delta_\Sigma = \pm K \sqrt{\delta_n^2 + \delta_m^2 + \delta_\pi^2 + \delta_k^2 + \delta_i^2}, \tag{51}$$

де K – коефіцієнт, що характеризує закон розподілу та встановлену ймовірність.

Для отримання необхідних метрологічних характеристик радіометричних приладів і підвищення точності вимірювання проведена оцінка впливу параметрів перемикача комутаційно-модуляційного перетворювача на значення комплексних параметрів вхідної частини радіометричного приладу.

Показано, що на величину похибок, внесених перемикачем, можуть впливати перехідні процеси від впливу керуючого сигналу $F_0(t)$, розходження значень його коефіцієнтів відбиття (Γ) і передачі (S) різних каналів у стаціонарному стані, а також „паразитні” радіотеплові шуми сусідніх елементів (E). Для урахування впливу різних факторів на роботу перемикача представимо його як узагальнений шестиполіусник (рис. 14).

З використанням граничних умов в узагальненому шестиполіусникові вирішена система рівнянь для співвідношення між нормованими відбитими хвилями в плечах 2 і 3 комутаційного перемикача b_2, b_3 і електричними компонентами сигналів антен E_{A1}, E_{A2} і змішувача E_{3M} через комплексні параметри $(\chi, \nu, \varpi, \zeta, \xi, \eta, \tau, \rho, \psi)$, що характеризують параметричний шестиполіусник:

$$b_2 = \frac{\nu}{\eta\nu - \chi\tau} \left[E_{A1} \varpi\tau + E_{A2} (\zeta\tau - \eta) + E_{3M} (\xi\tau - \psi) \right], \quad (52)$$

$$b_3 = \frac{\chi}{\chi\tau - \eta\nu} \left[E_{A1} \varpi\eta + E_{A2} (\zeta\eta - \rho) + E_{3M} (\xi\eta - \psi) \right]. \quad (53)$$

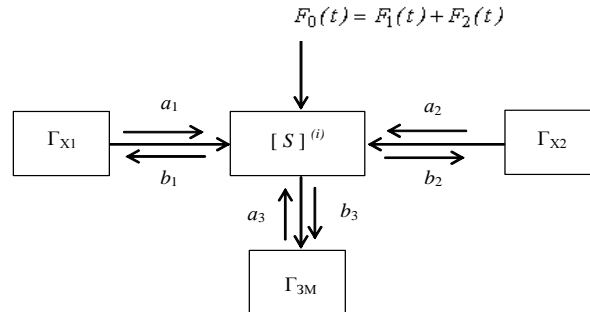


Рисунок 14 – Узагальнена модель комутаційного перемикача

З урахуванням отриманих рівнянь (52) і (53) з використанням пакету Mathcad отримані оптимальні параметри комутаційного перемикача при низькоінтенсивних сигналах (таблиця 1), які дозволили здійснити оцінку впливу його параметрів на значення комплексних параметрів, що характеризують у цілому перемикач, як параметричний шестиполіусник: $\chi = 2,754 + j2,584$, $\nu = 0,663 + j0,324$, $\varpi = -0,437 - j2,378$, $\zeta = -0,327 + j0,152$, $\xi = 0,117 - j2,475$, $\eta = 0,713 - j0,342$, $\tau = 3,45 + j1,724$, $\rho = 1,702 + j0,411$, $\psi = -2,869 + j0,317$.

Таблиця 1 – Оптимальні параметри комутаційного перемикача

Φ_{12}	S_{12}	S_{13}	Φ_{13}	S_{23}	Φ_{23}	Γ_{X1}	Φ_{X1}	Γ_{3M}	Φ_{3M}	Γ_{X2}	Φ_{X2}	λ
0,245	0,705	0,705	0,451	0,705	0,578	0,347	0,6	0,298	0,588	0,164	0,463	1,9

Оцінка залежності значень комплексних параметрів здійснюється при відхиленні параметрів перемикача від оптимальних величин у межах $\pm 10\%$: довжини хвилі сигналу (λ), всіх фаз (Φ) і модулів (Γ_{X1} , Γ_{X2} , Γ_{3M}) комплексного коефіцієнта відбиття, всіх фаз (Φ_S) і модулів елементів матриці розсіювання комутаційного перемикача (S_{12} , S_{13} , S_{23}).

Результати проведених розрахунків дозволяють, прогнозувати метрологічні характеристики НВЧ-пристроїв і забезпечувати підвищення їх точності.

В шостому розділі наведені результати практичного використання розроблених методів та засобів.

Одним з напрямків практичного використання розроблених приладів є оцінка електромагнітної сумісності матеріалів одягу з організмом людини. Матеріали одягу певною мірою впливають на потоки електромагнітної енергії, які виходять з організму людини, і на потоки електромагнітної енергії, що надходять із зовнішнього середовища. При цьому характер біофізичних ефектів від дії ЕМВ визначається не тільки структурою самих ЕМВ, але і фізичними властивостями матеріалів одягу. Тому при проектуванні та виготовленні одягу необхідно враховувати частотно-польові характеристики матеріалів, які створюють певний електромагнітний бар'єр між зовнішнім середовищем і тілом людини (рис. 15).

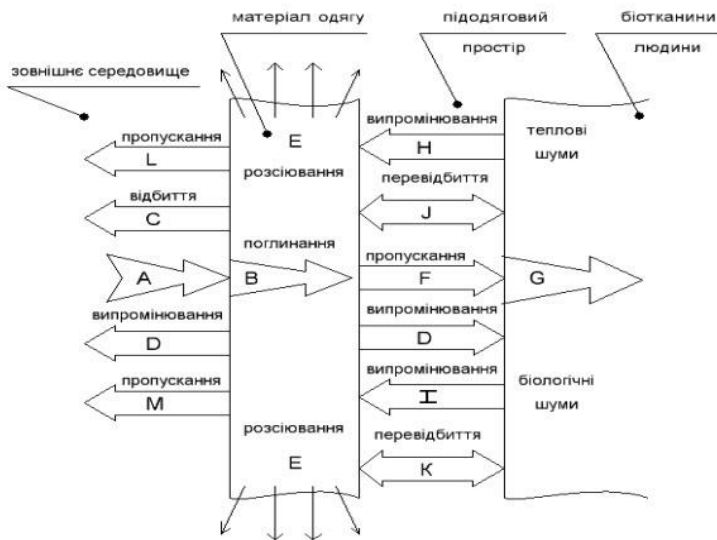


Рисунок 15 – Модель взаємодії ЕМВ з матеріалом одягу і тілом людини

На рисунку позначені: А – ЕМВ від зовнішніх джерел; В – переломлений потік ЕМВ; С – відбите від матеріалу ЕМВ; D – радіотеплове ЕМВ матеріалу; Е – потоки розсіювання ЕМВ; F – ЕМВ, що пройшло через матеріал; G – ЕМВ, що ввійшло у тіло людини; H, I – радіо теплове та біологічне ЕМВ людини; J, K – багаторазово відбите радіотеплове та біологічне ЕМВ; L, M – радіотеплове та біологічне ЕМВ людини, що пройшло крізь матеріал.

В роботі за допомогою розробленого радіометра проведені дослідження зразків шкіри. У процесі експериментальних досліджень перевірялись: власне мікрохвильове випромінювання шкіри при температурі 36°C та радіопрозорість шкіри за двома показниками – затримкою та проходженням зондуючого сигналу.

На рис. 16 наведені результати вимірювання власного випромінювання зразків шкіри.

За інтенсивністю власного випромінювання необхідно розглядати декілька груп зразків шкіри – з малою інтенсивністю на рівні $0,5 \times 10^{-13}$ Вт/см² (зразки 1 до 4), з інтенсивністю близько 1×10^{-13} Вт/см² (зразки 5-16) зразки з інтенсивністю в межах $1,5-2,5$ Вт/см² (17-23) та зразки з еластичною вичинкою, які мають інтенсивність випромінювання більше 3×10^{-13} Вт/см² (зразки 24-25).

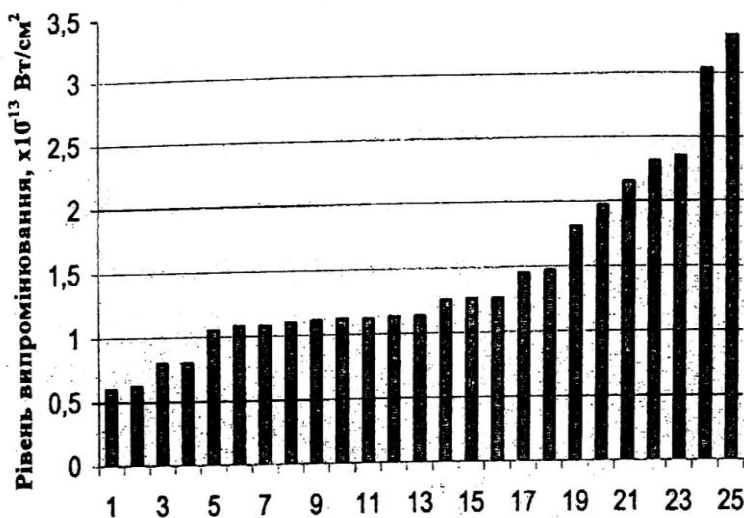


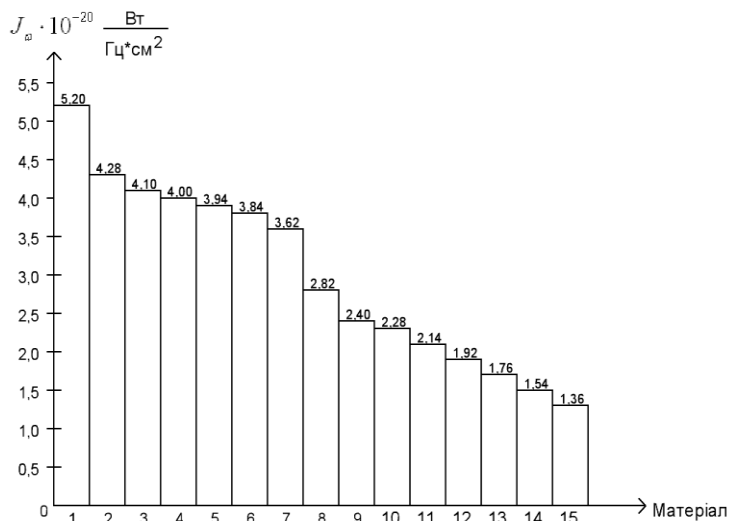
Рисунок 16 – Розподіл власного випромінювання зразків шкіри

1 – бичок; 2 – як; 3 – акула; 4 – крокодил; 5 – козлиня шевро; 6 – овчина; 7, 8 – шкіра свині; 9 – козлиня; 10 – овчина шевро; 11 – овчина біла; 12 – напівкожник; 13 – овчина чорна; 14 – акула голуба; 15 – козлиня шевро; 16 – овчина сіра; 17 – бугай; 18 – «рибка» свиняча; 19 – бичина; 20 – опойок еластичний; 21 – яловка; 22 – кінська шкіра; 23 – вимітка; 24 – виросток еластичний; 25 – жеребок еластичний.

З огляду на сумісність зразків шкіри з тілом людини, яке має рівень випромінювання близько $3,5 \times 10^{-13}$ Вт/см², переваги мають матеріали з більшим рівнем випромінювання.

В рамках розвитку теоретичних основ взаємодії ЕМВ людини з матеріалами одягу проведена також оцінка випромінюючих властивостей текстильних матеріалів.

Результати експериментальних досліджень приведені на рис. 17.



1 – шкіра людини; 2 – вовна (100%); 3 – льон (100%); 4 – вовна (70%) + шовк (30%); 5 – вовна (45%) + шовк (55%); 6 – бавовна (100%); 7 – шовк (100%); 8 – віскоза (100%); 9 – бавовна (65%) + поліефір (35%); 10 – бавовна (60%) + поліефір (40%); 11 – бавовна (55%) + поліефір (45%); 12 – бавовна (47%) + поліефір (53%); 13 – віскоза (55%) + поліефір (45%); 14 – поліефір (100%); 15 – поліамід (100%).

Рисунок 17 – Розподіл інтенсивності ЕМВ деяких текстильних матеріалів

З наведеного рисунку видно, що тканини з натуральних волокон (вовна, льон, бавовна та ін.) мають рівень ЕМВ, близький до рівня ЕМВ шкіри людини. Тому ці матеріали найбільш сумісні з організмом людини.

За допомогою розробленої радіометричної апаратури досліджена інтенсивність ЕМВ деяких матеріалів промислового призначення, зокрема, кварцевого скла, кварцевої кераміки і ситалу, які використовуються при виробництві продукції спеціального призначення. Дослідження проведені з метою оцінки рівнів ЕМВ, відповідних необхідним хімічним і гранулометричним складам матеріалів, а також контролю щільності кварцевої кераміки.

Отримані результати досліджень створюють передумови для організації системи неруйнівного контролю по параметрах (хімічний склад і щільність) виробленої продукції, які у свою чергу пов'язані з механічною і температурною стійкістю готових виробів спеціального призначення з діелектричних матеріалів.

У формуванні фізичних полів, у тому числі і ЕМВ, а також відповідних ним випромінювань важливу роль виконує вода. Вона кількісно домінує в біосфері: 3/4 поверхні Землі покриті водою, а живі організми – від медузи і амеби до людини – містять по масі в середньому від 65 до 98% води. Тому велика увага в експериментальних дослідженнях приділялася вивченню електромагнітних властивостей води і її розчинів.

Для оцінки їх випромінювальної здатності узяті чотири рідини, серед яких водопровідна вода, пиво нефільтроване «Біле», пиво пастеризоване «Оболонь», натуральне червоне вино, виготовлене в домашніх умовах.

З результатів експерименту (рис. 18) видно, що для всіх рідин спостерігається підвищення рівня власного випромінювання.

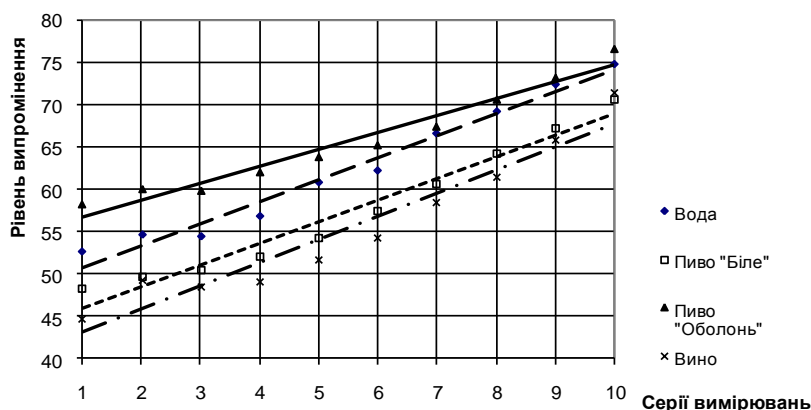


Рисунок 18 – Динаміка зміни електромагнітного випромінювання деяких рідин

З метою підтвердження результатів і визначення причин зростання інтенсивності випромінювання рідин експеримент був повторений в ускладнених умовах. Його результати в графічному вигляді показані на рис. 19.

При повторному експерименті готувалися два комплекти рідин. Зразки першого комплекту зберігалися безпосередньо в скляному посуді. Зразки другого комплекту були розташовані у окремих металевих банках з метою екранування від впливу зовнішніх електромагнітних полів. Крім того, при виконанні кожної серії вимірів до восьми постійних зразків (чотири екранованих і чотири неекранованих) додавався дев'ятий – свіжа водопровідна вода, підігріта до 37°C.

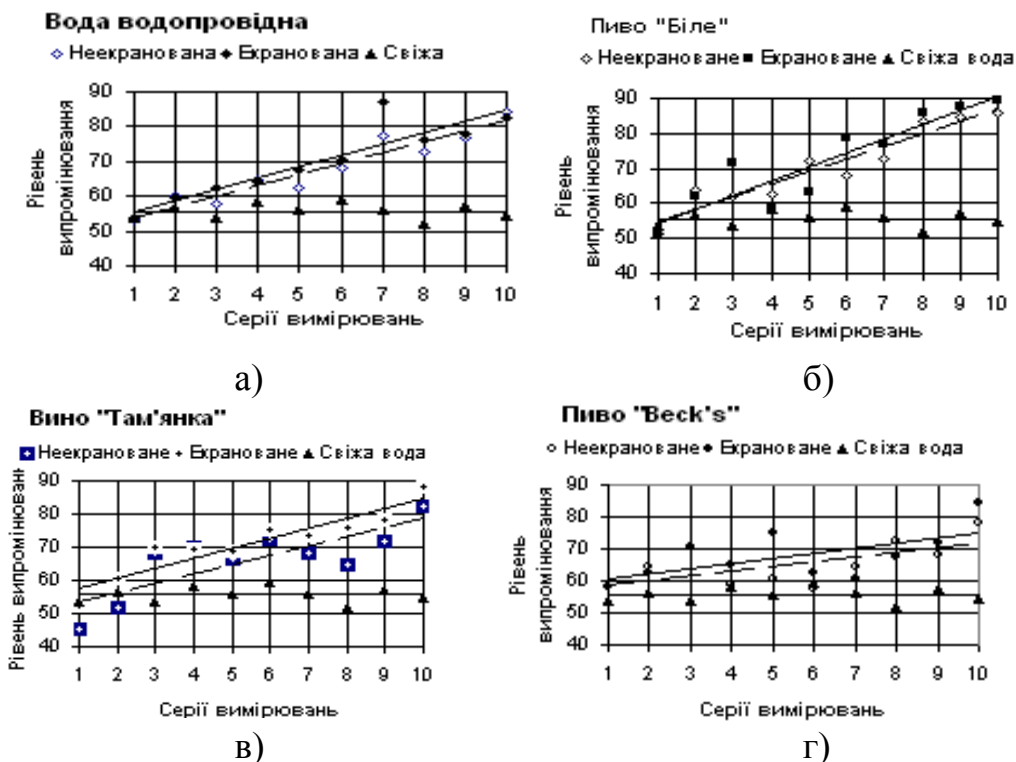


Рисунок 19 – Порівняльні характеристики зміни електромагнітного випромінювання екранованих і неекранованих рідин.

Отримані результати свідчать, що зразки рідин в обох комплектах з часом збільшили свою випромінювальну здатність. Характер змін як для екранованих, так і для неекранованих зразків рідин дуже схожий.

У той же час рівень випромінювання свіжої водопровідної води (рис. 19), не дивлячись на деякі коливання в окремих вимірах, які можуть бути обумовлені похибкою вимірювального приладу, залишається в постійному коридорі.

Базуючись на результатах проведених експериментів, можна зробити висновок, що збільшення інтенсивності випромінювання рідин в міліметровому діапазоні довжин хвиль в екранованих і неекранованих зразках обумовлене активним розвитком мікроорганізмів і бактерій у всіх рідинах при періодичній зміні температури від кімнатної до 37°C. Це підтверджує гіпотезу про нерівноважну (біоінформаційну) складову електромагнітного випромінювання біологічних об'єктів на фоні радіотеплового.

Висновки. У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової проблеми підвищення чутливості і точності радіовимірювальних приладів, розширення робочих частот та функціональних можливостей високочутливих модуляційних структур вимірювальної апаратури високочастотного діапазону за рахунок використання нових методів і засобів перетворення, виділення та вимірювання інформативних параметрів сигналів від досліджуваних об'єктів на фоні шумових завад, за інтенсивністю зіставлених з інтенсивністю вимірюваних сигналів.

1. Проаналізовано існуючі методи та теоретичні підходи до проектування радіовимірювальних приладів, визначені пріоритетні напрямки досліджень, які полягають у подальшому розвитку приладів, які базуються на вимірюванні нерівномірності частотних характеристик досліджуваних речовин, вимірюванні параметрів електромагнітних хвиль надвисокочастотного діапазону, що взаємодіють з досліджуваним матеріалом, та вимірюванні параметрів власного радіотеплового електромагнітного випромінювання досліджуваних об'єктів.

2. Подальшого розвитку набула теорія побудови радіовимірювальних приладів з комутаційно-модуляційними перетвореннями, яка заснована на виділенні вузькосмугових і широкосмугових інформаційних сигналів на фоні шумових завад за рахунок придушення флуктуаційних складових поблизу частоти модуляції та використання алгоритму первинного заміщення.

3. Досліджені структурно-алгоритмічні моделі модуляційних засобів радіотехнічних вимірювань з використанням власного випромінювання досліджуваних об'єктів, основні параметри перетворення надвисокочастотного каналу і причини, які впливають на чутливість та точність вимірювання інформативних параметрів слабких та надслабких сигналів.

4. Запропоновані нові методи зниження флуктуаційного порогу чутливості, а, відповідно, і підвищення чутливості та точності вимірювання, розширення діапазону робочих частот та функціональних можливостей високочастотних радіовимірювальних приладів за рахунок придушення флуктуаційних складових з використанням алгоритмів заміщення, інвертування та протиставлення сигналів у вимірювальних каналах.

5. Подальшого розвитку набули методи структурно-функціонального моделювання та теорія побудови високочутливих одноканальних модуляційних структур радіометричної апаратури НВЧ-діапазону з використанням декількох частот комутації, роздільним синхронним детектуванням низькочастотних сигналів, що забезпечує розширення функціональних можливостей за рахунок вимірювання декількох параметрів і двоканальної радіометричної апаратури з придушенням корельованих шумів перетворюваних сигналів та забезпечує покращення метрологічних характеристик радіометрів.

6. Розроблено нові структури модуляційних радіометрів для вимірювання параметрів власних електромагнітних полів і випромінювань об'єктів дослідження, в тому числі: пристрої вимірювання потужності і оцінки кореляційних характеристик сигналів, вузькосмугові та широкосмугові радіометри і спектроаналізатори, радіометричні вимірювачі селективного випромінювання, що забезпечує розширення функціональних можливостей радіометрів.

7. Подальшого розвитку отримало дослідження похибок комутаційно-модуляційних перетворювачів на *p-i-n*-діодах в режимі вимикача і перемикача та радіометричного модуляційного вимірювача в цілому, дослідження впливу на похибки неузгодження та неідентичності коефіцієнтів передачі *p-i-n*-ключів. Розрахунковим та експериментальним шляхом показано, що похибка вимірювання потужності в діапазоні частот 37,5-78,3 ГГц має значення не більше $\pm 10\%$. Розроблено рекомендації по зниженню похибок вимірювання з використанням радіометричної апаратури. Показано, що впровадження рекомендацій дозволяє зменшити похибку вимірювання до рівня $\pm 5\%$.

8. Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні нових підходів до проектування високочутливої радіовимірювальної апаратури високочастотного діапазону для вимірювання інформативних параметрів надзвичайно слабких сигналів, рівень яких зіставлений або менший за рівень власних шумів апаратури та вирішення наукових і прикладних задач.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою дисертаційної роботи опубліковано 118 наукових праць, основними з яких є:

1. Головка Д.Б. Частотно-дисперсійні аналізатори складу та властивостей матеріалів та речовин / [Д.Б. Головка, Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко]. – К. : МП „Леся”, 2002. – 184 с.

2. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / [Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф.]. – Донецьк : ІПШ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.

3. Радіометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів / [Куценко В. П., Скрипник Ю. О., Трегубов М. Ф., Шевченко К. Л., Яненко О. П.]. – Донецьк : ІПШ «Наука і освіта», 2012. – 348 с.

4. Скрипник Ю.О. Підвищення ефективності роботи резонансних підсилювачів потужності / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 1. – С. 105-110.

5. Шевченко К.Л. Підвищення ефективності мікрохвильового обладнання для волого-теплової обробки / К.Л. Шевченко // Вісник Державної академії легкої промисловості України. – 1999. – № 2. – С. 141-146.

6. Скрипник Ю.О. Підвищення вірогідності результатів вимірювань радіометричних систем медико-біологічного призначення / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко, С.М. Перегудов, В.П. Куценко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 2. – С. 61-64.

7. Шевченко К.Л. Вимірювання частотної дисперсії електропровідності високочастотних кондуктометричних клітинок / К.Л. Шевченко // Вісник КНУТД. – 2004. – № 2(16). – С. 126-131.

8. Шевченко К.Л. Підвищення точності вимірювання частотної дисперсії електропровідності широкосмугових кондуктометричних клітинок / К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2004. – № 3(17). – С. 13-19.

9. Шевченко К.Л. Зменшення впливу товщини матеріалу при вимірюванні діелектричної проникності / К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2004. – № 5(19). – С. 21-23.

10. Скрипник Ю.О. Метрологічні характеристики надвисокочастотних радіометрів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2004. – Вип. 1(28). – С. 93-96.

11. Шевченко К.Л. Підвищення точності вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі НВЧ сигналів / К.Л. Шевченко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2004. – Вип. 3(30). – С. 88-92.

12. Скрипник Ю.О. Автоматизований вимірювач коефіцієнта відбиття у смузі поглинання / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко, В.О. Іващенко // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Приладобудування”. – 2004. – Вип. 27. – С. 137-144.

13. Скрипник Ю.О. Радіометричний контроль складу та стану об'єктів живої та неживої природи / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.П. Куценко, М.Ф. Трегубов, О.П. Яненко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2005. – № 2(22). – С. 13-18.

14. Островецкая Ю.И. Микроволновая оценка радиопрозрачности и гигиенических свойств материалов для одежды / Ю.И. Островецкая, Н.П. Супрун, Ю.А. Скрипник, К.Л. Шевченко, А.Ф. Яненко // Український журнал медичної техніки і технології. – 2005. – № 1-2. – С. 12 – 15.

15. Скрипник Ю.О. Дослідження випромінювальної здатності деяких водних розчинів у міліметровому діапазоні довжин хвиль / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2005. – № 3(23). – С. 41-49.

16. Скрипник Ю.О. Мікрохвильвий вимірювач жирності молока / Ю. О. Скрипник, К. Л. Шевченко, О. П. Яненко, С. М. Перегудов, В. П. Осадчий // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С. 32-35.

17. Скрипник Ю.О. Радіотепловий метод неруйнівного контролю діелектричних матеріалів та виробів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник

Київського національного університету технологій та дизайну. – 2005. – № 5(25). – С. 30-36.

18. Скрипник Ю.О. Радіометр з автоматичною компенсацією похибки від впливу кореляційних шумів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2005. – № 534. – С. 106-110.

19. Скрипник Ю.О. Радіотепловий контроль матеріалів та виробів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2005. – № 5(25), т. 2. – С. 33-34.

20. Скрипник Ю.О. Приймання і вимірювання випромінювань у системах радіотеплового контролю / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2006. – № 1(27). – С. 11-20.

21. Скрипник Ю.О. Діагностика стану циліндропоршневої групи двигунів радіохвильовим методом / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.М. Павленко, В.М. Горкун // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2006. № 2(28). – С. 19-23.

22. Скрипник Ю.О. Кореляційний метод експериментальної оцінки комфортності одягу / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2006. – № 6(32). – С. 57-61.

23. Скрипник Ю.О. Розширення функціональних можливостей мостових схем з комутаційно-модуляційним перетворенням / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.А. Іпатов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2007. – № 2(34). – С. 41-44.

24. Скрипник Ю.О. Оцінка метрологічних характеристик радіометричних приладів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2007. – № 3(35). – С. 59-63.

25. Почекайлова Л.П. Дослідження електромагнітних властивостей води та кислотно-лужних розчинів / Л.П. Почекайлова, О.П. Яненко, К.Л. Шевченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 3, т. 1. – С. 188 – 191.

26. Скрипник Ю.О. Мостовой метод измерения параметров активных двухполюсников / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.А. Іпатов // Вісник Черкаського державного технологічного університету, спецвипуск. – 2007. – С. 242-244.

27. Скрипник Ю.О. Апаратурне забезпечення радіохвильової діагностики циліндропоршневої групи двигунів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.М. Павленко, В.М. Горкун // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2008. – № 1(38), т. 2. – С. 236-240.

28. Скрипник Ю.О. Перспективи використання і шляхи вдосконалення радіометричних приладів контролю / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.П. Куценко, О.П. Яненко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2008. – № 1(38). – С. 311-315.

29. Супрун Н.П. Оцінка комфортності одягу з використанням електрофізичних методів / Н.П. Супрун, Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник

Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2008. – №2 (120). – С. 233-236.

30. Скрипник Ю.О. Оцінка впливу матеріалів одягу на електричні характеристики біологічних тканин / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, В.П. Осадчий // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. С. 144-147.

31. Красюк О.Д. Дослідження похибки неідентичності коефіцієнтів передачі р-і-п ключів модуляційного радіометричного вимірювача мм-діапазону / О.Д. Красюк, С.М. Перегудов, О.П. Яненко, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2008. – №2 (40), т. 1. – С. 76-80.

32. Куценко В.П. Пасивна дефектоскопія діелектричних виробів/ В.П. Куценко, М.Ф. Трегубов, Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко// Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2008. – №2 (40), т. 1. – С. 81-84.

33. Куценко В.П. Спектральний аналіз радіотеплових випромінювань біологічних та фізичних об'єктів / В.П. Куценко, М.Ф. Трегубов, Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2008. – №2 (40), т. 1. – С. 125-128.

34. Скрипник Ю.О. Частотно-польова оцінка комфортності одягу / Ю.О. Скрипник, Н.П. Супрун, К.Л. Шевченко, О.А. Ваганов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2009. – №2 (46). – С. 131-136.

35. Скрипник Ю.О. Дослідження електромагнітних властивостей текстильних матеріалів, оброблених натуральними фарбниками / Ю.О. Скрипник, Н.П. Супрун, О.А.Ваганов, О.П.Яненко, К.Л. Шевченко // Вісник Національного технічного університету України „КПІ”. Серія: Приладобудування. – 2009. – Вип. 37, С. 134-139.

36. Скрипник Ю.О. Інтегральна оцінка комфортності текстильних матеріалів за електромагнітними показниками / Ю.О. Скрипник, Н.П. Супрун, О.А.Ваганов, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2009. – №4 (48). – С. 46-50.

37. Скрипник Ю.О. Дослідження впливу фарбування рослинними фарбниками на електромагнітні властивості текстильних матеріалів / Ю.О. Скрипник, Н.П. Супрун, О.А.Ваганов, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2009. – №5 (49). – С. 124-129.

38. Skrypnyk Yu. Development of equipment for search of the latent metal subjects / Yu. Skrypnyk, K. Shevchenko A. Aleksashin // Вісник Черкаського державного технологічного університету, спецвипуск. – 2009. – С. 104-106.

39. Скрипник Ю.О. Дифференциальный модуляционный радиометр / Ю.О. Скрипник, В.П. Куценко, К.Л. Шевченко, О.А. Ваганов// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Обчислювальна техніка та автоматизація”. – 2009. – Випуск 17 (148). – С. 183-187.

40. Скрипник Ю.О. Радіохвильовий аналіз структурних властивостей текстильних матеріалів / Ю.О. Скрипник, В.П. Куценко, К.Л. Шевченко, О.П.

Яненко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Обчислювальна техніка та автоматизація”. – 2010. – Випуск 19 (171). – С. 180-184.

41. Скрипник Ю.О. Вдосконалення засобів радіотеплового контролю матеріалів одягу / Ю.О. Скрипник, О.А.Ваганов, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2010. – №1 (52). – С. 151-155.

42. Скрипник Ю.О. Підвищення достовірності технологічного контролю методом періодичного порівняння / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2010. – №5 (55). – С. 148-155.

43. Скрипник Ю.О. Підвищення точності вимірювання випромінювальної здатності текстильних матеріалів / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.А.Ваганов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2010. – №6 (56). – С. 46-54.

44. Скрипник Ю.О. Измерение коэффициента отражения в шумовых электромагнитных полях / Ю.О. Скрипник, О.П. Яненко, К.Л. Шевченко, О.А.Ваганов // Вісник Національного технічного університету України „КПІ”. – 2011. – Вип. 44. – С. 105-110.

45. Петросян Р.В. Аналіз чутливості фазового кута коефіцієнта передачі хвилеводної вимірювальної комірки у випадку слабо поглинаючого діелектрика / Р.В. Петросян, В.В. Чухов, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2011. – №2 (58). – С. 89-95.

46. Скрипник Ю.О. Методи вимірювання електромагнітних випромінювань нетеплової інтенсивності / Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.А. Ваганов, В.П. Куценко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія „Обчислювальна техніка та автоматизація”. – 2011. – Вип. 20 (182). – С.199–205.

47. Скрипник Ю.О. Вимірювання спектральної щільності потужності низькоінтенсивних електромагнітних випромінювань / Ю.О. Скрипник, О.А. Ваганов, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко // Вісник ЖДТУ. – 2011. – №2 (53). – С. 175-183.

48. Горкун В. Надвисокочастотний метод оцінки спрацювання циліндрів автомобільних і тракторних двигунів / В. Горкун, К.Шевченко, С. Бондарев, С. Козупиця // Наука і технології в АПК. Науково-виробничий журнал. – 2012. – № 11 (38). – С. 22-23.

49. Скрипник Ю.О. Компенсаційно-тестовий метод корекції дрейфових похибок вимірювання / Ю.О. Скрипник, В.В. Горкун, К.Л. Шевченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2012. – №2(64). – С. 28-33.

50. Шевченко К.Л. Шумова оцінка опору діелектричних матеріалів / К.Л. Шевченко, В.В. Горкун, М.П. Василенко // Метрологія та прилади. – 2014. – №1 (45). – С. 247-249.

51. Куценко В.П. Оцінка впливу параметрів перемикача в комутаційно-модуляційних перетворювачах / В.П. Куценко, О.П. Яненко, К.Л. Шевченко //

Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014. – № 57. – С. 83-91.

52. Прудникова Н.Д. Исследование материалов природного происхождения и возможности их использования в профилактических изделиях / Н.Д. Прудникова, Н.В. Первая, К.Л. Шевченко // Технология легкой промышленности. Журнал Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна. – 2014. – №2. – С. 31-36.

53. Скрипник Ю.А. Повышение точности измерения слабых электромагнитных излучений/ Ю.О. Скрипник, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко// XIV scientific symposium “Metrology and metrology assurance 2004”, September 14 – 18, 2004, Sozopol, Bulgaria. С. 49 – 54.

54. Skripnik Yu. The development of methods of the superweak intensity radiation measurement from physical and biological objects/ Yu. Skripnik, S. Sitko, O. Yanenko, K. Shevchenko// 10th IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science, June 30 – July 2, 2004, Saint-Peterburg, Russia. P. 311 – 315.

55. Skripnik Yu. Radiometric measuring instrument of the secondary microwave radiations/ Yu. Skripnik, O. Yanenko, K. Shevchenko// Frolich Centenary International Symposium “Coherence and Electromagnetic Fields in Biological System”, Prague, July 1-4, 2005.

56. Патент 23276А Україна, МПК⁶ G01N27/04. Спосіб вимірювання частотної дисперсії електропровідності широкополосних кондуктометричних клітинок та пристрій для його здійснення / Скрипник Ю.О., Стретович А.М., Шевченко К.Л., Іванченко О.В. ; Державна академія легкої промисловості України. – №96020426 ; заявл. 05.02.96 ; опубл. 31.08.98, Бюл. №4.

57. Патент 23298А Україна, МПК⁶ G01N27/04. Пристрій для вимірювання частотної дисперсії електропровідності широкополосних кондуктометричних клітинок / Скрипник Ю.О., Стретович А.М., Шевченко К.Л., Іванченко О.В. ; Державна академія легкої промисловості України. - №96041248 ; заявл. 02.04.96 ; опубл. 31.08.98, Бюл. №4.

58. Патент 33222А Україна, МПК⁷ G01N22/00. Мікрохвильовий пристрій для аналізу емісійних властивостей живого білка / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Цимбалюк В.І. ; Державна академія легкої промисловості України. – №99010337 ; заявл. 21.01.99 ; опубл. 15.02.2001, Бюл. №1.

59. Патент 39444А Україна, МПК⁷ G01R29/08. Кореляційний вимірювач інтенсивності електромагнітного випромінювання / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Санніков В.Ю., Лісовський О.А. ; Київський державний університет технологій та дизайну. – №2000084740 ; заявл. 08.08.2000 ; опубл. 15.06.2001, Бюл. №5.

60. Патент 44328 Україна, МПК⁷ G01R29/06. Спосіб вимірювання коефіцієнта відбиття в смузї поглинання і пристрій для його здійснення / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л. ; Київський державний університет технологій та дизайну. – №98020695 ; заявл. 10.02.98 ; опубл. 15.02.2002, Бюл. №2.

61. Патент 44866 Україна. МПК⁷ F26B9/08. Пристрій для автоматичного керування процесом висушування діелектричних матеріалів / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Іванченко В.О. ; Київський державний університет технологій та дизайну. – №99042280 ; заявл. 22.04.99 ; опубл. 15.03.2002, Бюл. №3.

62. Патент 47431 Україна, МПК⁷ G01R27/32. Спосіб налагодження резонансного НВЧ підсилювача на задану частоту та пристрій для його здійснення / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Іванченко В.О. ; Державна академія легкої промисловості України. – №98010146 ; заявл. 13.01.98 ; опубл. 15.07.2002, Бюл. №7.

63. Патент 52668 Україна, МПК⁷ G01R27/06. Пристрій для вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Іванченко В.О. ; Державна академія легкої промисловості України. – №99010338 ; заявл. 21.01.99 ; опубл. 15.01.2003, Бюл. №1.

64. Патент 53677 Україна, МПК⁷ G01N22/00. Пристрій для визначення поглинальної здатності біологічних тканин / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Цимбалюк В.І. ; Державна академія легкої промисловості України. – №99073862 ; заявл. 07.07.99 ; опубл. 17.02.2003, Бюл. №2.

65. Патент 65764А Україна, МПК⁷ G01R29/08. Кореляційний вимірювач інтенсивності електромагнітного випромінювання / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Яненко О.П., Куценко В.П. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – №2003054104 ; заявл. 06.05.2003 ; опубл. 15.04.2004, Бюл. №4.

66. Патент 68120А Україна, МПК⁷ G01R29/08. Модуляційний гетеродинний радіометр / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Куценко В.П. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – №2003109235 ; заявл. 13.10.2003 ; опубл. 15.07.2004, Бюл. №7.

67. Патент 68948А Україна, МПК⁷ G01R29/26. Модуляційний радіометр / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Скрипник І.Ю., Куценко В.П. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – №20031110497 ; заявл. 21.11.2003 ; опубл. 16.08.2004, Бюл. №8.

68. Патент 70229А Україна, МПК⁷ G01S13/00. Спосіб вимірювання слабких радіовипромінювань / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Скрипник І.Ю., Куценко В.П. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – №20031213093 ; заявл. 30.12.2003 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. №9.

69. Патент 70232А Україна, МПК⁷ G01N27/90. Вихрострумний металошукач / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Величко С.М. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – №20031213096 ; заявл. 30.12.2003 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. №9.

70. Патент 9235 Україна, МПК⁷ G01R19/00. Спосіб вимірювання слабких радіовипромінювань / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № u200501856 ; заявл. 28.02.2005 ; опубл. 15.09.2005, Бюл. №9.

71. Патент 9354 Україна, МПК⁷ G01R29/08. Кореляційний радіометр / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № u200502760 ; заявл. 25.03.2005 ; опубл. 15.09.2005, Бюл. №9.

72. Патент 18320 Украина, МПК⁷ G01S13/00. Спосіб вимірювання енергетичного спектра слабких радіовипромінювань / Куценко В. П., Скрипник Ю. О., Трегубов М. Ф., Шевченко К. Л., Яненко О. П. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200603339; заявл. 28.03.06; опубл. 15.11.06, Бюл. № 11.

73. Патент 27328 Україна, МПК (2006) G01R17/08. Вимірювальний комутаційний міст / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Іпатов В.А. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200706876; заявл. 19.06.2007; опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17.

74. Патент 31390 Україна, МПК (2006) G01N22/02; G01R29/08. Радіометричний дефектоскоп / Скрипник Ю. О., Шевченко К. Л., Куценко В. П., Трегубов М. Ф. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200712106; заявл. 01.11.2007; опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.

75. Патент 34896 Україна, МПК (2006) G01N33/493. Пристрій для оцінки впливу матеріалів одягу на організм людини / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Дяченко В.В. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200804140 ; заявл. 02.04.2008 ; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.

76. Патент 38471 Україна, МПК (2006) G01N22/02. Пристрій для дослідження електромагнітних полів біологічних об'єктів / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Ваганов О.А. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200810215 ; заявл. 08.08.2008 ; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1.

77. Патент 43418 Україна, МПК (2006) G01R29/08. Модуляційний гетеродинний радіометр / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Ваганов О.А. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200903989 ; заявл. 22.04.2009 ; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

78. Патент 46615 Україна, МПК (2006) G01N27/90. Пристрій для пошуку електропровідних предметів / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Ахонченко Д.М., Горкун В.В. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200907982 ; заявл. 29.07.2009 ; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.

79. Патент 48646 Україна, МПК (2009) G01V3/08. Пристрій для дистанційного виявлення металевих предметів / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Каламеєць Т.П., Іванченко О.В. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200910673 ; заявл. 22.10.2009 ; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6.

80. Патент 49281 Україна, МПК (2009) G01N33/36, G01N22/00. Пристрій для визначення структурних властивостей текстильних матеріалів / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Горкун В.В. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 200911097 ; заявл. 02.11.2009 ; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.

81. Патент 52117 Україна, МПК (2009) G01R29/08. Диференціальний модуляційний радіометр / Скрипник Ю. О., Шевченко К. Л., Ваганов О. А., Куценко В. П. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 201002718 ; заявл. 11.03.10 ; опубл. 10.08.10, Бюл. № 15.

82. Патент 52861 Україна, МПК (2009) G01R29/00. Спосіб вимірювання електромагнітних випромінювань нетеплової інтенсивності / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Ваганов О.А. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 201003657 ; заявл. 30.03.10 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17.

83. Патент 62191 Україна, МПК (2009) G01N33/44. Пристрій для оцінки електропровідних властивостей полімерних матеріалів / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Каламеєць Т.П. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 201105483 ; заявл. 29.04.11 ; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.

84. Патент 70526 Україна, МПК⁷ G01R29/08. Вузькосмуговий модуляційний радіометр / Скрипник Ю. О., Яненко О. П., Шевченко К. Л., Гаєвський В. С., Муськін Ю. М., Куценко В. П., Ваганов О. А.; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 201115625 ; заявл. 30.12.11; опубл. 11.06.12, Бюл. № 11.

85. Патент 79532 Україна, МПК⁷ G01N22/00. Радіометричний пристрій для визначення спектральних характеристик матеріалів в низькоінтенсивних електромагнітних полях / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Слізков А.М. ; Київський національний університет технологій та дизайну. – № 201212192 ; заявл. 24.10.12; опубл. 25.04.13, Бюл. № 8.

АНОТАЦІЯ

Шевченко К.Л. Розвиток теоретичних основ побудови радіовимірювальних приладів з комутаційно-модуляційним перетворенням. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.08 - радіовимірювальні прилади. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2015.

Дисертація присвячена питанням підвищення чутливості і точності, розширення діапазону робочих частот та функціональних можливостей радіовимірювальних приладів за рахунок використання нових методів та засобів перетворення, виділення та вимірювання інформативних параметрів низькоінтенсивних високочастотних монохроматичних та шумових сигналів на фоні власних шумів перетворювальних елементів тракту вимірювальної апаратури з використанням комутаційно-модуляційних перетворень.

Проаналізована системи перетворень властивостей досліджуваних об'єктів при радіовимірюваннях, промодельований та досліджений зв'язок електрофізичних параметрів речовини з її фізико-механічними властивостями, показана принципова можливість використання радіовимірювальних приладів для вимірювання параметрів речовин.

Обґрунтовано можливість використання власного радіотеплового випромінювання для оцінки якісних та кількісних характеристик досліджуваних об'єктів, проаналізований механізм його виникнення та енергетичні характеристики для різних частотних діапазонів.

Досліджені принципи структурної побудови радіовимірювальних приладів з сенсорами, які можна вважати елементами з зосередженими параметрами та сенсорами з розподіленими параметрами. Запропоновано нові структури радіовимірювальних приладів з такими сенсорами, показано можливість підвищення їх точності та чутливості.

Розглянуто характеристики НВЧ-радіометрів, які впливають на результат і похибки вимірювання та сформульовані визначення метрологічних характеристик, які властиві радіометрам ближньої дії.

Показано, що основними джерелами мультиплікативних та адитивних похибок у модуляційних радіометрах НВЧ діапазону є елементи високочастотного тракту.

Проведена оцінка впливу параметрів перемикача комутаційно-модуляційного перетворювача на значення введених комплексних параметрів вхідної частини радіометричного приладу.

З використанням запропонованих в роботі нових технічних рішень створені радіовимірювальні прилади, які дозволили здійснити вимірювання параметрів ряду матеріалів природного та штучного походження.

Розроблені технічні рішення захищені патентами України, впроваджені в експлуатацію та використовуються у Головній організації з метрологічного забезпечення електричних та радіотехнічних вимірювань МОЗ України — НДЦ квантової медицини “Відгук”, м. Київ, Казенному науково-дослідному підприємстві "Кварсит", м. Костянтинівка, використовуються у Київському національному університеті технологій та дизайну, в Національному технічному університеті України «КПІ»

Ключові слова: радіовимірювальний прилад, комутаційно-модуляційні перетворення, високочастотний діапазон, низькоінтенсивні сигнали, електрофізичні властивості, точність, чутливість, інформативні параметри.

АННОТАЦІЯ

Шевченко К.Л. Развитие теоретических основ построения радиоизмерительных приборов с коммутационно-модуляционным преобразованием. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.08 - радиоизмерительные приборы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2015.

Диссертация посвящена вопросам повышения чувствительности и точности, расширению диапазона рабочих частот и функциональных возможностей радиоизмерительных приборов за счет использования новых методов и средств преобразования, выделения и измерения информативных параметров низкоинтенсивных высокочастотных монохроматических и шумовых сигналов на фоне собственных шумов преобразовательных элементов трактов измерительной аппаратуры с использованием коммутационно-модуляционных преобразований.

Проанализирована система преобразований свойств исследуемых объектов при радиоизмерениях, промоделирована и исследована связь электрофизических параметров веществ с их физико-химическими свойствами, показана принципиальная возможность использования радиоизмерительных приборов для измерения параметров веществ.

Исследованы принципы структурного построения радиоизмерительных приборов с сенсорами, которые имеют сосредоточенные и распределенные параметры. Предложены новые структуры радиоизмерительных приборов с такими сенсорами, показана возможность повышения их точности и чувствительности.

Рассмотрены характеристики СВЧ-радиометров, которые оказывают определяющее влияние на точность измерения.

С использованием предложенных в работе новых технических решений созданы радиоизмерительные приборы, позволившие измерить параметры ряда материалов естественного и искусственного происхождения

Разработанные технические решения защищены патентами Украины, внедрены в эксплуатацию и используются в Головной организации по метрологическому обеспечению электрических и радиотехнических измерений МОЗ Украины — НДЦ

квантовой медицины “Відгук”, г. Киев, Казенном научно-исследовательском предприятии "Кварсит", г. Константиновка, Киевском национальном университете технологий и дизайна, Национальном техническом университете Украины «КПИ»

Ключевые слова: радиоизмерительный прибор, коммутационно-модуляционные преобразования, высокочастотный диапазон, низкоинтенсивный сигнал, электрофизические свойства, точность, чувствительность, информативные параметры.

ABSTRACT

Shevchenko K.L. Development of theoretical bases of radio equipment constructions with switching-modulation conversion. - Manuscript Copyright. Dissertation for the receipt of scientific degree of doctor of technical sciences, specialty 05.11.08 – Radio Equipment. - Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, 2015.

Dissertation is devoted to increase the sensitivity and accuracy, expanding bandwidth and functionality of radio devices. Use new methods and means of transformation, separation and measurement of informative parameters of low-intensity signals against the intrinsic noise of the transducer elements paths instrumentation using switching and modulation changes.

We analyzed the system changes the properties of the objects in the radio measurements. Received model and investigated the electrical connection settings substances with their physical and chemical properties. Principal possibility of use of radio devices for measuring substances. We studied the principles of structural construction of radio devices with a variety of sensors. Proposed new structure of radio equipment the opportunity of enhancing their accuracy and sensitivity.

The characteristics of microwave radiometers that have a decisive influence on the measurement accuracy.

With the use of the proposed new technical solutions created radio devices, will measure parameters of materials natural and artificial origin.

Developed technical solutions protected by patents of Ukraine, introduced in operation and are used in the Head Office of metrological ensure electrical and electronic measurements of Ministry of Health of Ukraine - NDC quantum medicine "Vidguk" (Kiev), state scientific research enterprise "Kvarsit" (Konstantinovka), Kiev National University of Technology and Design, the National Technical University of Ukraine "KPI".

Keywords: radio devices, switching-modulation conversion, high-frequency range, low intensity signal, the electrical properties, accuracy, sensitivity, informative parameters.

Підписано до друку 09.10.2015 р. Формат 60x90¹/₁₆. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 1,8. Наклад 100 прим. Зам. № 1337

Друк. «Карат Лтд», 03194, м. Київ, вул. Літвиненко-Вольгемут, 2-а.
Тел.: +3802291140, (50) 355-72-92, e-mail: karat@karat.in.ua
Свідоцтво ДК № 163 від 01.09.2000 р.