

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
Факультет інфокомунікацій
(повна назва)
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження можливостей використання квантових ефектів для вимірювань на змінному струмі
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ЯСС_М-21-1
Костенко Ю. С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Якість, стандартизація та сертифікація
(повна назва освітньої програми)

Керівник д.т.н., проф. Павленко Ю. Ф
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Захаров І.П.
(прізвище, ініціали)

Харків, 2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інфокомунікацій
 Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)
 Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
 Освітня програма Якість, стандартизація та сертифікація
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____
 Костенко Юлії Сергіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження можливостей використання квантових ефектів для вимірювань на змінному струмі.

затверджена наказом університету від 30 листопада 2022 р. № 1538 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	30.11.2022 – 5.12.2022	
2	Розробка 1 та 2 розділів	05.12.2022 – 08.12.2022	
3	Розробка 3 та розділів	09.12.2022 – 10.12.2022	
4	Розробка 5 розділу	11.12.2022 – 14.11.2022	
5	Написання пояснювальної записки	15.12.2022 – 18.12.2022	
6	Представлення закінченої кваліфікаційної роботи на кафедру	19.12.2022	

Дата видачі завдання __ ____ 2022 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

д.т.н., проф. Павленко Ю. Ф.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи магістра:

КВАНТОВИЙ ЕФЕКТ, ЕТАЛОН, СТРУМ, МІРА.

Об'єкт дослідження – квантовий ефект.

Мета роботи – дослідити можливості використання квантових ефектів для вимірювань на змінному струмі.

На цей час квантові ефекти і засновані на них пристрої широко використовуються для відтворення фізичних одиниць. Квантовий ефект Джозефсона використовується при дослідженні шляхів створення «природного» еталона кілограма методом урівноваження механічної і електричної енергії («електричний» кілограм.

Все це свідчить про велику перспективу квантових методів і технологій та подальшого розширення їх використання в метрології. Підкреслимо, що наслідком використання квантових ефектів є зміна методології відтворення ряду одиниць, що, в свою чергу, веде до необхідності їх перевизначення в системі SI.

Результатом кваліфікаційної роботи є опис та аналіз еталонів з використанням квантових ефектів для вимірювань на змінному струмі.

ЗМІСТ

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	6
ВСТУП.....	7
1 «ДОКВАНТОВИЙ» СТАН. ЕТАЛОНИ ОДИНИЦІ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	8
1.1 Еталони одиниці напруги змінного струму	8
1.2 Еталон змінної напруги в діапазоні низьких і середніх частот	9
1.3 Перспектива прямого відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання.....	11
2 ЕФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА І РЕАЛІЗАЦІЯ ВОЛЬТА НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ.....	15
3 НАПРЯМКИ ПОБУДОВИ ВИМІРЮВАЧА ЗМІННОЇ НАПРУГИ	17
3.1 Метод синтезу відліків (метод програмованої матриці, PJVS-метод)	17
3.2 Кодоімпульсний метод (JAWS-метод)	19
3.3 Метод з використанням частотної модуляції НВЧ-опромінення.....	22
3.4 Комбінований (PJVS+JAWS) метод	25
4 ПРИКЛАДИ ПРИЛАДІВ, СТОРЕНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦЬОГО МЕТОДУ	28
4.1 Квантовий вольтметр постійного і змінного струму	28
4.2 Еталонна установка Supra VOLT control (Німеччина).....	28
4.3 Прецизійний міст змінного струму для вимірювання імпедансів з використанням джозефсонівських джерел змінної напруги, які використовують бінарні програмовані матриці (метод PJVS).....	29
4.4 Еталон електричної потужності на промисловій частоті	29
5 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІРИ.....	31
5.1 Загальні положення	31
5.2 Основні джерела похибок міри	32
5.3 Похибка визначення частоти опромінення	33
5.4 Похибка через наявність термо-ЕРС і ефекту Пельтьє.....	34
5.5 Похибка через наявність струмів витоку	35
5.7 Випадкова похибка еталона.....	36
5.8 Невизначеність відтворення одиниці	36
5.9 Нестабільність міри	37
ВИСНОВКИ.....	39
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	40
Додаток 1.....	42

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ТП - термоперетворювач

ЕРС - електрорушійна сила

НВЧ - надвисока частота

НЧ – низька частота

СКВ – середньоквадратичне відхилення

НСП – невилучена систематична похибка

СІ (SI) – міжнародна система одиниць

ВСТУП

У минулому ХХ сторіччі відбулась радикальна зміна уявлень щодо одиниць вимірювання та еталонів, які їх відтворюють. Система, що ґрунтується на механічних вимірюваннях і еталонах, подібних до платиноіридієвого еталона метра або еталона ампера у вигляді струмових ваг, фактично відійшла у минуле. Вона замінюється новою системою, що спирається на атомні і квантові явища, де за еталон приймаються досліджені стабільні фізичні явища і сталі (константи).

Нова система має суттєві теоретичні переваги, але особливо важливими є її практичні позитивні риси: нові еталони є більш доступними та дозволяють вченим і метрологам-практикам проводити вимірювання з більшою точністю, меншими технічними та експлуатаційними труднощами.

Відкриття квантових ефектів привели до справжньої революції в електричних вимірюваннях. Використання квантових ефектів Джозефсона, Холла і ядерного магнітного резонансу замість традиційних методів, що базуються на механічних вимірюваннях, дозволили підняти точність відтворення електричних одиниць приблизно на три порядки і значно спростити всю систему забезпечення єдності електричних вимірювань. Успіхи у використанні квантових ефектів і у технологіях виготовлення відповідних пристроїв для їх надійної реалізації привели до створення паралельної з SI практичної системи електричних одиниць, а також визначили умови для створення природного еталона одиниці маси замість існуючого сьогодні артефакту у вигляді платино-іридієвого циліндра.

Об'єкт дослідження – квантовий ефект.

Мета роботи – дослідити можливості використання квантових ефектів для вимірювань на змінному струмі.

1 «ДОКВАНТОВИЙ» СТАН. ЕТАЛОНИ ОДИНИЦІ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1 Еталони одиниці напруги змінного струму

Основним методом відтворення одиниць напруги, сили і потужності змінного струму є порівняння (компарування) їх з одноіменними величинами постійного струму за тепловою дією. [2]. Цей метод одержав назву метода теплового компарування.

Відповідно до закону збереження енергії при повному поглинанні енергії однакові кількості виділеного тепла відповідають однаковим енергіям незалежно від виду чи частоти випромінювання. На основі цього закону порівнюється енергія змінного струму з енергією постійного струму. Роль компаратора виконує термоперетворювач (ТП) відповідної конструкції. Метод забезпечує єдність одиниць напруги, струму, потужності при різних довжинах хвиль і їх прив'язку до тих же одиниць на постійному струмі. Параметри постійного струму, зокрема, напругу, визначають з необхідною точністю на базі ефекту Джозефсона, розглянутого вище.

Діапазон частот, у якому створюють еталони одиниці змінної напруги, становить від одиниць герц до 2-3 ГГц (вище цих частот вимірюють потужність). І хоча в усьому діапазоні цих частот використовується метод теплового компарування, його апаратурна реалізація в різних частотних піддіапазонах суттєво відрізняється (Рис. 1.1). Так, у більшості еталонів у діапазоні частот до ~ 100 кГц як термоперетворювачі використовуються багатоелементні термопари, на більш високих частотах і приблизно до 30 МГц найкращі результати одержано з використанням одноелементних вакуумних безконтактних термоперетворювачів. Вище 30 МГц застосовуються, як правило, терморезистори – болометри, термістори, які змінюють свій електричний опір при нагріванні. Одним з варіантів реалізації методу теплового компарування у ВЧ-діапазоні є використання як навантаження ТП

безреактивного резистора. Існує також варіант методу теплового компарування, який полягає у вимірюванні ВЧ-потужності на відомому імпедансі і обчисленні ВЧ-напруги.

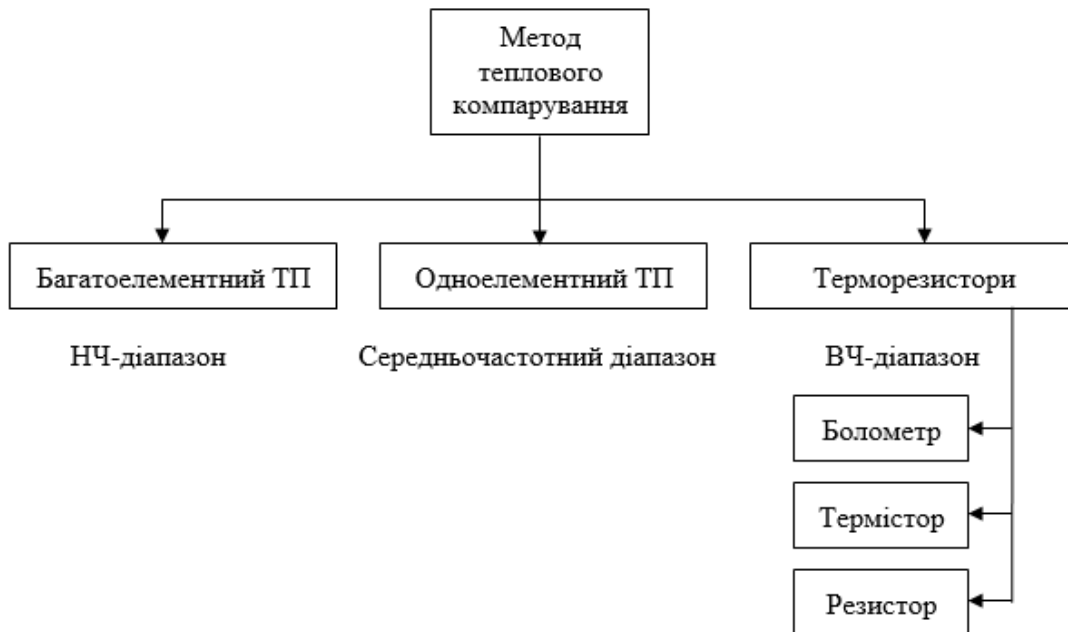


Рисунок – 1.1. Реалізації методу теплового компарування

Різні варіанти апаратних рішень методу теплового компарування призводять до необхідності створення кількох еталонів напруги змінного струму. Світова практика свідчить, що необхідний діапазон частот напруги змінного струму перекривається, як правило, двома - трьома еталонами,

1.2 Еталон змінної напруги в діапазоні низьких і середніх частот

У спрощеному вигляді структурну схему еталона в цьому діапазоні можна подати у вигляді, наведеному на рис. 1.2 [2].

При подачі на вхід ТП змінної напруги U_{\sim} фіксується термо-ЕРС E на його виході, пропорційна $U_{\text{СК}}$. Потім на вхід ТП подається постійна напруга $U_{=}$ і регулюється її рівень до одержання термо-ЕРС на виході ТП, рівної E . Тоді $U_{\text{СК}} = U_{=}$. Термо-ЕРС E і напруга $U_{=}$ вимірюються, як правило,

а) невизначеність термоперетворення (типу В), яка має дві складові: через ефект Пельтьє, пов'язаний з полярністю постійного струму в нагрівачі; і частотну – через наявність реактивних складових опорів і поверхневого ефекту в схемі ТП.);

б) невизначеність вимірювання постійної напруги (типу В)

в) невизначеність компарування (типу А).

Типові значення метрологічних характеристик еталонів для діапазону частот 20 Гц – 30 МГц:

діапазон вимірювань, В	0,1 – 10;
діапазон передачі, В	до 1000;
невизначеність типу В	$1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-4}$;
невизначеність типу А	$5 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-5}$.

1.3 Перспектива прямого відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання

Ефект одноелектронного тунелювання, або «ефект Ліхарева» було теоретично передбачено і експериментально перевірено ще у 80-ті роки минулого століття. Даний ефект виявляється у виникненні сходинок на осі струму вольтамперних характеристик надпровідних джозефсонівських переходів малої ємності при їх опроміненні НВЧ-полем (на відміну від класичного джозефсонівського ефекту, де ці сходинокки мають місце на осі напруги). При цьому відстань між сходинокками (тобто значення сили струму I) залежить лише від частоти проходження електронів f і сталої – заряду електрона e : $I = ef$. Це відкриває шлях до побудови квантового еталона ампера на основі цього ефекту. Оскільки квантові еталони вольта й ома вже існують, створення квантового еталона ампера дозволить замкнути так званий «трикутник квантових еталонів» (рис. 1.3), тобто забезпечити незалежне відтворення трьох базових електричних одиниць на основі квантових ефектів. Це може стати серйозним імпульсом до подальшого розвитку метрології в електриці.

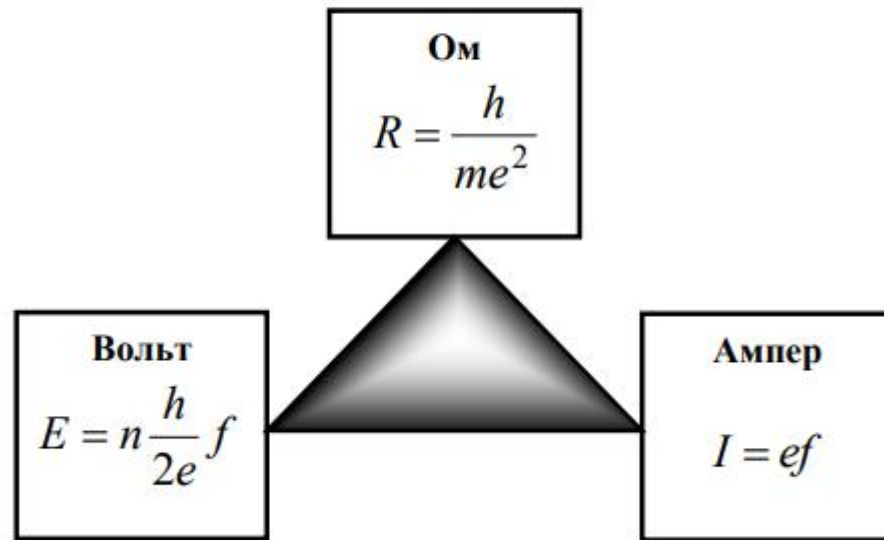


Рисунок 1.3 – «Трикутник» квантових еталонів

Роботи зі створення джерела струму на ефекті одноелектронного тунелювання, необхідного для замикання квантового трикутника, ведуться вже близько двадцяти років у багатьох країнах, і в цьому напрямку досягнуті певні успіхи. Сьогодні відомі кілька варіантів приладів на ефекті одноелектронного тунелювання (SET-Single Electron Tunneling): так званий одноелектронний транзистор (SET-транзистор), виготовлений з використанням нанотехнологій у NIST (США) сумісно з МДУ (Росія) і РТВ (Німеччина), а також більш складний пристрій, названий одноелектронним насосом (SET-pump). У США був створений електронний насос з сімома тунельними переходами і шістьма затворами. У результаті, за оцінками авторів, похибка рахування окремих електронів знизилася до $1,5 \cdot 10^{-8}$. Проте максимально досягнуте значення струму на плато $6 \cdot 10^{-12}$. А при частоті маніпулювання електронами значення $f = 20$ МГц є все ще малим для прецизійних вимірювань. У рамках проекту Євросоюзу в РТВ (Німеччина) був створений електронний насос з трьома тунельними переходами, в якому придушення ефектів паразитного додаткового тунелювання досягається наповненням додаткових високоомних (50 кОм) резисторів, послідовно підключених до виводів пристрою (R-pump). Вагомі

оригінальні роботи в цьому напрямку були також проведені в метрологічному центрі Франції BNM-LNE. У зв'язку з труднощами реалізації джерела струму, що базується на $\Omega = 2\pi \nu = h R = \text{Вольт} \cdot f \cdot e \cdot h \cdot E \cdot n \cdot 2 = \text{Ампер} \cdot I = e f 150$ SET-пристроїв, NIST (США) був запропонований інший шлях проведення експериментів щодо встановлення зв'язку квантових еталонів вольт, ома і ампера, який показано на рис.1.4. У NIST, а пізніше і в РТВ, були розгорнуті роботи зі створення еталона одиниці ємності – фаради, що базується на виготовленні криогенного конденсатора ємністю 1–10 пФ з надмалим рівнем витоків і малою залежністю ємності від частоти і напруги. Цей конденсатор спочатку заряджають за допомогою джерела одиночних електронів – електронного насоса, а електрони перераховуються електрометром на основі SET-транзистора.

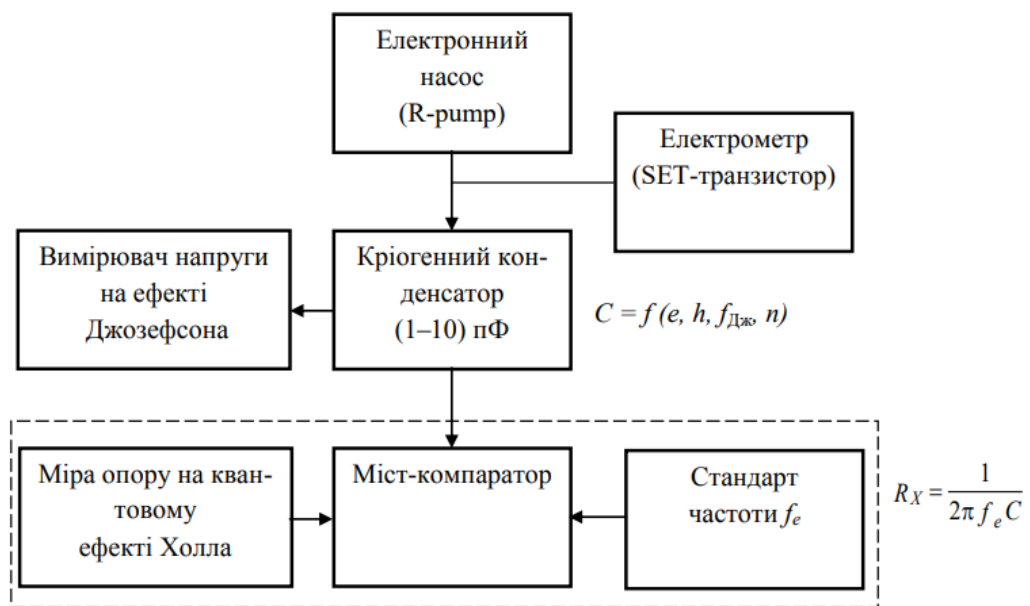


Рисунок 1.4 – Варіант реалізації трикутника квантової метрології

Напругу на конденсаторі передбачається вимірювати за допомогою еталона, що використовує ефект Джозефсона. У результаті ємність криогенного конденсатора буде виражена через фундаментальні константи e , h , НВЧ-частоту і цілі числа – номер сходинок на ВАХ джозефсонівської мікросхеми і число електронів, розміщених на конденсаторі. У наступному експерименті імпеданс

конденсатора порівнюється з опором, відтвореним за допомогою холлівської структури (рис. 1.4), на змінному струмі, з використанням моста-компаратора і еталонної частоти f_e . $f C R e X \pi = 2 1 C = f (e, h, f_{Дж}, n)$ Електронний насос (R-pump) Електрометр (SET-транзистор) Вимірювач напруги на ефекті Джозефсона Криогенний конденсатор (1–10) пФ Міра опору на квантовому ефекті Холла Міст-компаратор Стандарт частоти f_e 151 Згідно з описаними вище оцінками є надія реалізувати вимірювання з невизначеністю 10^{-8} , однак досягти такого результату буде дуже важко. Як видно з наведеного стислого огляду, до теперішнього часу на основі ефекту одноелектронного тунелювання вже створено ціле покоління принципово нових пристроїв. Однак завдання замикання трикутника квантової метрології ще далеке від розв'язання. Коли підручник вже був підготовлений до видання, з'явилась публікація в РТВ-NEWS (2016, №1) про нові результати, отримані у РТВ зі створення еталона струму на основі методів одноелектронного тунелювання. В ній сказано, що у розробленому в РТВ насосі на частоті 545 МГц досягнуто струм 100 пА і невизначеність його відтворення $2 \cdot 10^{-7}$, що на сьогодні є кращим результатом у світі.

2 ЕФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА І РЕАЛІЗАЦІЯ ВОЛЬТА НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ

Ефект Джозефсона ґрунтується на таких квантових явищах як надпровідність, тунелювання електронів і поєднання їх у «куперівські пари», квантовий перехід. Докладно ефект Джозефсона і апаратура для його реалізації викладені в [1,2,3].

Основним рівнянням, за яким відтворюється джозефсонівська напруга U_j , є:

$$U_j = (n h/2e) f$$

де h - стала Планка, e -елементарний заряд, f -частота опромінення, n - номер сходинки вольтамперної характеристики контакту Джозефсона (КД)

Відношення $\frac{2e}{h}$ одержало назву сталої Джозефсона K_J .

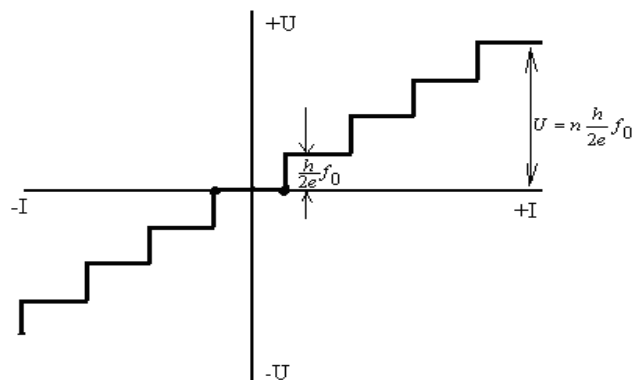


Рисунок – 2.1 Квантована вольтамперна характеристика КД

Еталони на ефекті Джозефсона створюються, в принциповому плані, в усіх країнах за єдиною схемою (рис.2.1), що включає до себе систему відтворення розміру вольта (джерело джозефсонівської напруги), яка відіграє роль калібратора еталона, і систему зберігання розміру одиниці (високостабільні міри напруги постійного струму), а також пристрій порівняння цих напруг (компаратор).

Спрощена схема джерела Джозефсонівської напруги наведена на рис.2

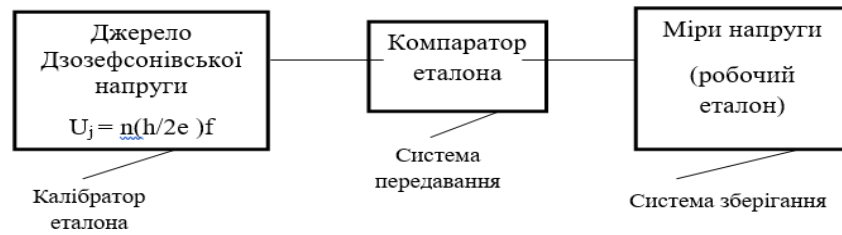


Рисунок – 2.2 Спрощена структурна схема еталона

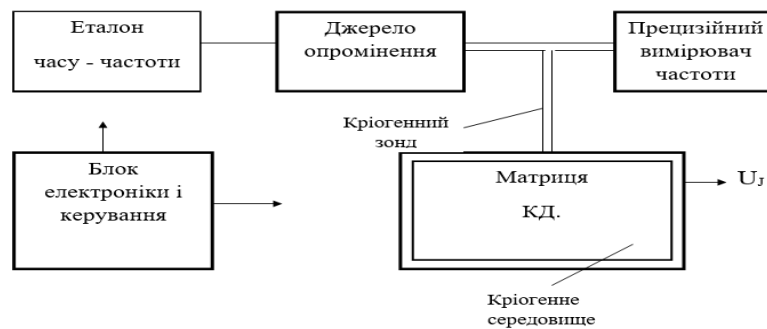


Рисунок – 2.3 Джерело Джозефсонівської напруги

Створені інтегральні схеми (матриці), що включали до себе кілька тисяч послідовно з'єднаних контактів Джозефсона. дозволяють відтворювати безпосередньо напругу в 1 В і більше при частоті опромінення $f \sim 70$ ГГц.

– Таким чином, напруга постійного струму відтворюється через частоту і ФФС. Оскільки частота опромінення може бути зроблена достатньо стабільною і вимірюватися з необхідною точністю, а значення ФФС зафіксовані, метод Джозефсона дозволяє забезпечити дуже високу точність відтворення напруги і калібрування мір (до 10^{-10} при вихідній напрузі постійного струму до 10 В).

Україна (ННЦ «Інститут метрології») створила свій первинний еталон постійної напруги на основі ефекта Джозефсона.

Еталон має сумарну стандартну відносну невизначеність (5-10) 10^{-10} при вихідній напрузі постійного струму до 10 В.

3 НАПРЯМКИ ПОБУДОВИ ВИМІРЮВАЧА ЗМІННОЇ НАПРУГИ

Успіхи у створенні еталонів постійної напруги і матриць стимулювали дослідження щодо можливості використання ефекту Джозефсона для відтворення напруги змінного струму. Наведемо досягнуті на цей час результати.

Формування напруги змінного струму з використанням ефекту Джозефсона може бути виконане такими методами [3,4]:

а) шляхом синтезу відліків постійної напруги U_i за допомогою програмованих матриць

б) опроміненням матриці імпульсами зі змінною частотою повторення (кодоімпульсний метод)

в) шляхом частотної модуляції НВЧ-сигналу, що використовується для опромінення матриці [5]. Це новий метод, який запропоновано в ННЦ «ІМ», знаходиться в стадії розробки. Розглянемо ці методи більш докладно.

3.1 Метод синтезу відліків (метод програмованої матриці, PJVS-метод)

Метод полягає в отриманні серії дискретних відліків постійної напруги з виводів джозефсонівської матриці і у формуванні східчастого сигналу змінного струму.

Після відповідного програмування система дозволяє синтезувати довільні форми напруги змінного струму.

Основною проблемою в реалізації цього методу є створення спеціальних програмованих матриць [3].

Для відтворення напруги змінного струму необхідна швидка і точна перекомутація опорних напруг Джозефсона. Як показано в дослідженнях РТВ, така перекомутація неможлива з переходами SIS. Таку можливість надають тільки лінійні матриці сильно загасаючих переходів – SINIS і SNS [3,4], однак при цьому збільшується необхідне число переходів.

Матриця із частотою 70 ГГц повинна мати близько 70000 переходів для одержання напруги 10 В, що в 5 разів більше, ніж у стандартної матриці для одержання постійної напруги. Це говорить про те, що технології виробництва матриць сильно загасаючих переходів мають бути на значно вищому рівні. Якщо з ряду причин потрібно використовувати більш низьку частоту опромінення (близько 20 ГГц), число переходів навіть збільшується пропорційно зменшенню частоти опромінення.

Є й інші проблеми при використанні вже існуючих конструкцій матриць. Тому у РТВ було розроблено більш складну матрицю [18], що складається з послідовності бінарних сегментів з $2^0, 2^1, \dots, 2^p$ переходами, кожний з яких запускається окремим джерелом струму.

Програмоване перемикавання на встановлення певної комбінації джерел струму дозволяє швидко вибрати стабільні відліки напруги постійного струму і синтезувати довільні форми напруги змінного струму (рисунок 3.1)

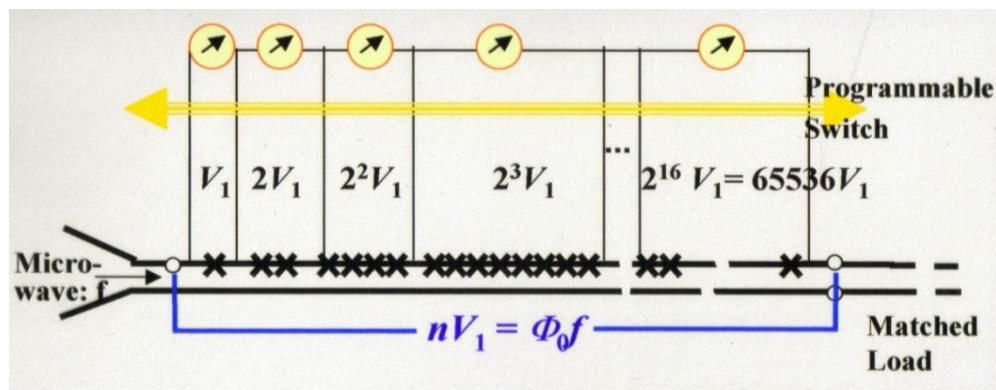


Рисунок 3.1 – Динамічна програмована матриця

Створення таких матриць і всієї системи формування змінної напруги є великим технологічним досягненням,

Суттєвою особливістю цього методу є східчаста форма синтезованого сигналу (рисунок 3.2).

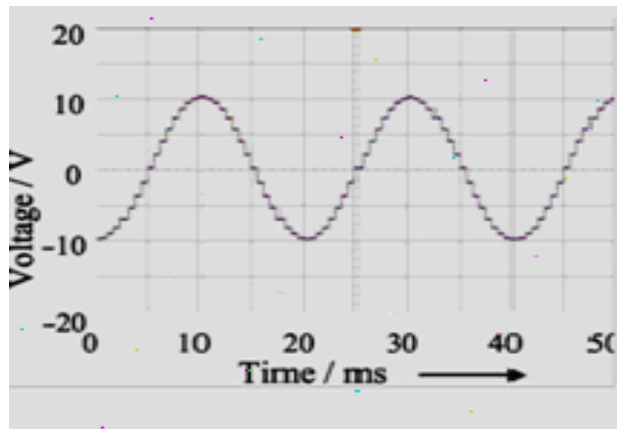


Рисунок 3.2– Сформований східчастий сигнал змінного струму

Хоча невизначеність рівня кожної сходинки не перевищує $5 \cdot 10^{-9}$ на частотах до 500 Гц, у спектрі такого сигналу міститься велика кількість гармонік, що робить цей метод непридатним для ряду задач метрології.

3.2 Кодоімпульсний метод (JAWS-метод)

Названий вище недолік можна в значній мірі подолати шляхом використання в якості опромінюючого сигналу не синусоїди, а послідовності імпульсів. При цьому частота імпульсу $f(t)$ змінюється в залежності від бажаної форми хвилі $V(t) = n f(t) \Phi_0$, $\Phi_0 = h/2e$. Так з'явився варіант відтворення змінної напруги шляхом опромінення матриці Джозефсона послідовністю імпульсів зі змінною частотою повторення $f(t)$, яка регулюється за допомогою двійкового цифрового коду (сігма-дельта модуляція). Залежно від тривалості окремих імпульсів по переходу буде проходити певне число квантів потоку на імпульс. Шляхом регулювання частоти імпульсу на матриці генерується точно визначена напруга постійного струму. Для цього в найпростішому випадку можна використовувати промисловий високошвидкісний генератор імпульсів. Матриця Джозефсона діє як перетворювач недосконалих імпульсів генератора $U(t)$ в ідеально квантовані імпульси $\int U(t) dt = \Phi_0$. Сьогодні існують промислові генератори біполярних імпульсних кодів для частоти імпульсів до 40 ГГц. Для

синтеза хвилі довільної форми добре підходять матриці SNS, тому що їхні оптимальні робочі частоти знаходяться у цьому діапазоні.

Спрощену структурну схему цього методу, який отримав назву "кодо-імпульсний метод", наведено на рис. 3.3.

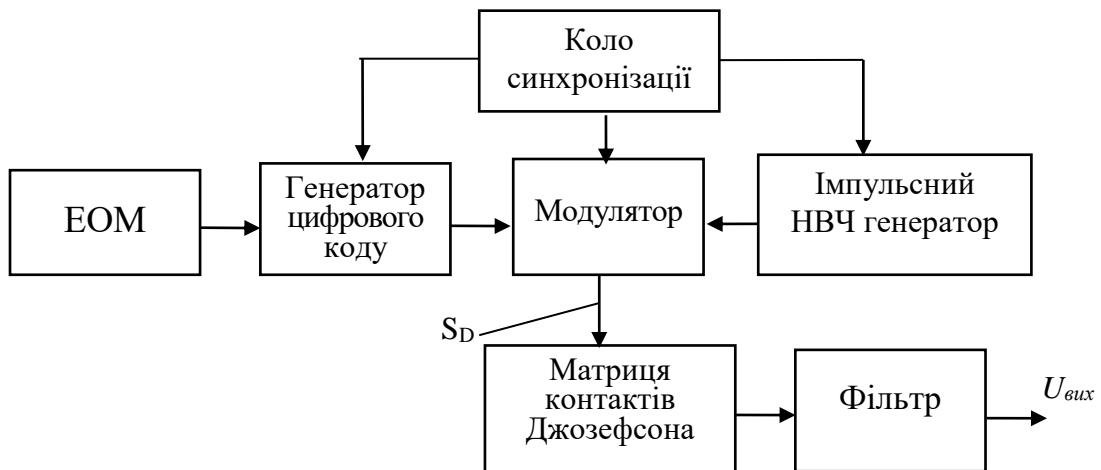
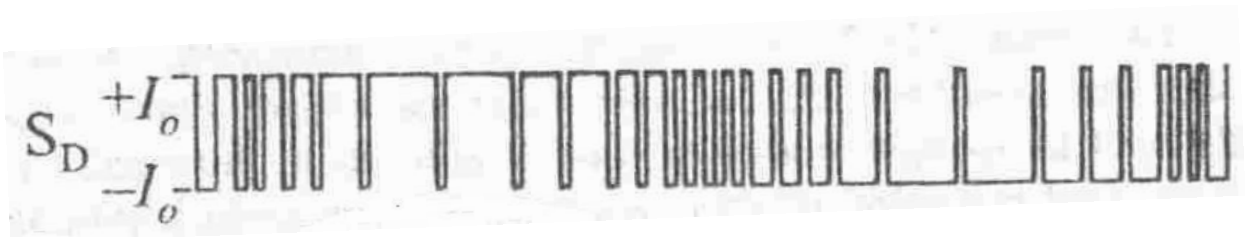


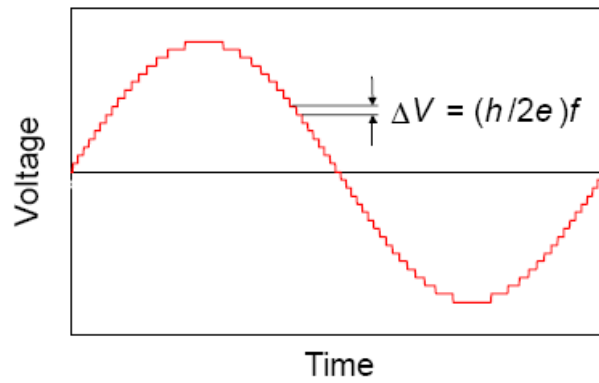
Рисунок 3.3 – Спрощена структурна схема реалізації кодоімпульсного методу

Імпульси подаються на лінійні матриці переходів Джозефсона, які перетворюють їх у точно квантовані імпульси із площею імпульсу $n\Phi_0$. Далі, за допомогою аналогової низькочастотної фільтрації одержують необхідні форми хвиль $U(t)=nf(t)\Phi_0$, $\Phi_0=h/2e$ (рисунок 3.4).

Важливим питанням при формуванні еталонної змінної напруги є рівень нелінійних спотворень відносно заданої форми (при синусоїдальній формі – рівень коефіцієнта гармонік).



a)



б)

Рисунок 3.4 – Опромінюючий (а) і вихідний (б) сигнали в кодоімпульсному методі

Одержаний в РТВ спектр синтезованої синусоїдної хвилі з частотою 2,5 кГц і напругою 214 мВ зображено на рис. 3.5. Більш високі гармоніки перебувають на рівні нижче мінус 70 дБм. Тому гармонійні спотворення становлять мінус 66 дБм (коефіцієнт гармонік нехтовно малий), що, безсумнівно, є високим результатом.

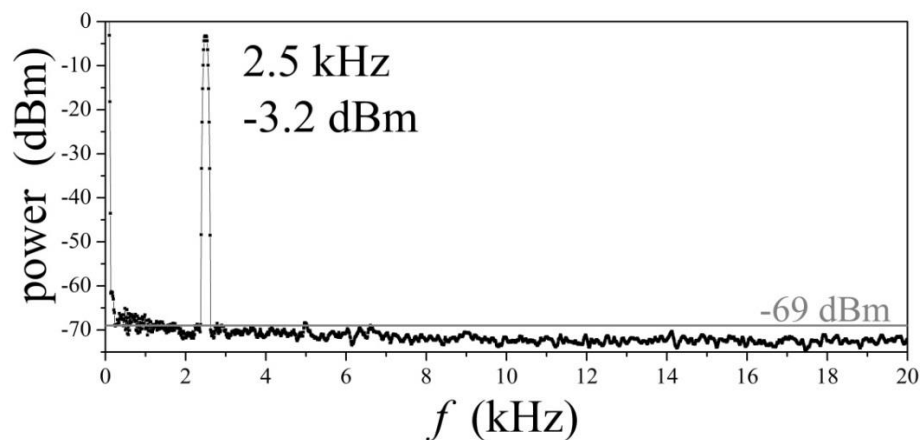


Рисунок 3.5 – Спектр сигналу у JAWS - методі

Основною проблемою для досягнення опорних напруг змінного струму високої амплітуди є конструкція необхідного мікрохвильового кола для однорідного розподілу імпульсів у достатньо великих матрицях.

Як показано в [3,4], метод з використанням програмованої джоєфсонівської матриці (PJVS - метод) забезпечує високу вихідну напругу (до 10 В), однак її спектр містить чималу кількість гармонік (значні

спотворення). Кодо-імпульсний метод (JAWS - метод) забезпечує чистий спектр, але рівень вихідного сигналу не перевищує 1 В (рисунок 3.6).

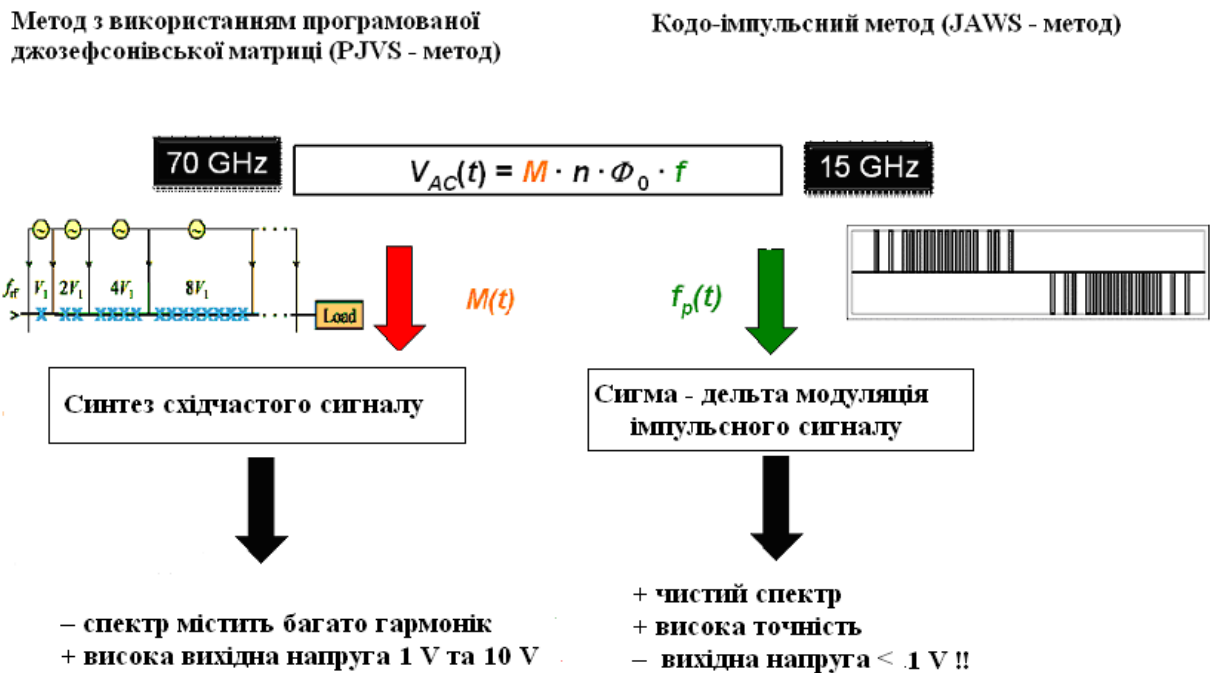


Рисунок 3.6 – Порівняння PJVS і JAWS - методів

3.3 Метод з використанням частотної модуляції НВЧ-опромінення

Перспективним методом відтворення напруги змінного струму є метод частотної модуляції, коли НВЧ-сигнал, який використовується для опромінювання матриці джозефсонівських контактів, модулюється за частотою низькочастотним сигналом (рис.3.7).

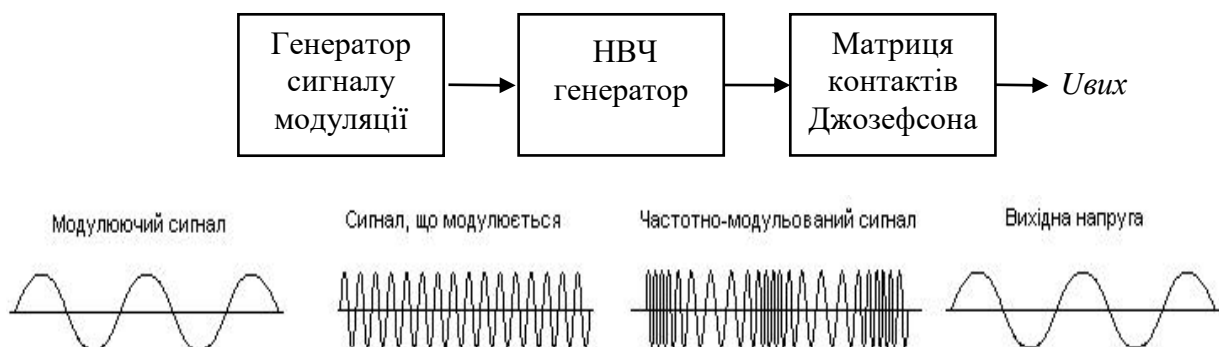


Рисунок 3.7– Метод частотної модуляції НВЧ-опромінювання

Цей метод базується на прямій залежності напруги на виході джозефсонівської матриці відтворення від частоти опромінення

$$U_{\text{вих}} = f(t) n / K_J,$$

де $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга матриці контактів Джозефсона;

$f(t)$ – частота опромінювання матриці контактів Джозефсона;

n – кількість сходинок матриці контактів Джозефсона;

K_J – стала Джозефсона.

Таким чином, якщо частота опромінення змінюється за визначеним законом, то й вихідна напруга буде змінюватися за тим самим законом (за умови, що робоча точка матриці під час модуляції залишається на сходитці).

Цей метод розроблявся в ННЦ «Інститут метрології», розглянемо його докладніше [5].

ЧМ сигнал, який подається на матрицю, має вигляд

$$u(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin(\Omega t + \varphi)\right),$$

де U_m – амплітуда сигналу;

$\omega = 2\pi f$ – несійна частота;

$\Omega = 2\pi F$ – модулююча частота;

$\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ – девіація частоти;

φ – постійна фаза.

Частота цього сигналу $\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \omega + \Delta\omega \sin\Omega t$, або $f(t) = f + \Delta f \sin\Omega t$.

На виході матриці маємо напругу, яка містить постійну і змінну складові.

Заблокувавши постійну складову одержимо

$$U_{\Omega} = \frac{2\Delta f \cdot n}{K_J}$$

Амплітуда цієї напруги (від піку до піку) буде

Таким чином, на виході одержуємо синусоїдальну напругу, частота якої є частота модулюючого сигналу, а амплітуда дорівнює

$$\frac{2\Delta f \cdot n}{K_J},$$

де $2\Delta f$ – подвійна девіація частоти або різниця між f_{\max} і f_{\min} НВЧ генератора.

Оцінимо можливий рівень змінної напруги на виході матриці.

ЧМ ($2\Delta f$) може без суттєвих спотворень скласти близько,

$$U_{\sim} = 10 \text{ В} , \text{ тоді } U_{\sim} = 5\% 10 \text{ В} = 0,5 \text{ В} .$$

Похибка визначається похибкою вимірювання частот f_{\max} і f_{\min} , яка при низьких F може бути на рівні $10^{-9} - 10^{-10}$.

Важливою умовою для реалізації цього методу є необхідність мати досить широку (за струмом) сходинку Джозефсона. Таку сходинку можна отримати за допомогою SINIS-матриці (рисунок 3.8). Для мікроструктури Джозефсона типу SINIS n дорівнює одиниці.

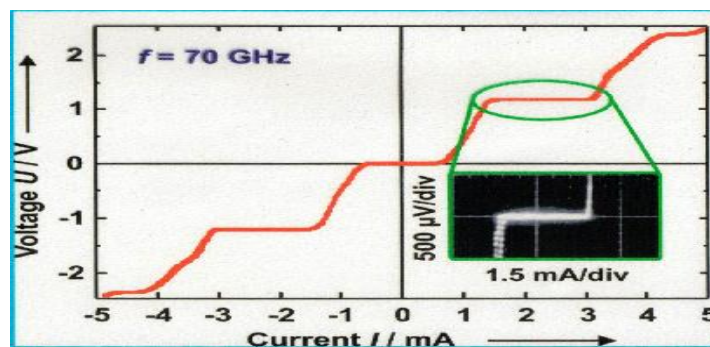


Рисунок 3.8– Вольт-амперна характеристика SINIS-матриці

Експериментальні дослідження показали працездатність цього методу, але для уточнення його можливостей щодо рівня відтвореної змінної напруги і частотного діапазону, необхідні подальші поглиблені дослідження. Вже зараз можна сказати, що ці параметри пов'язані з параметрами матриці, зокрема з рівнем відтворюваної постійної напруги і шириною сходинки її вольт-амперної характеристики.

Реалізація цього методу потребує наявності генератора НВЧ з керованою зміною частоти вихідного сигналу. Модульований сигнал може бути отриманий або від генератора з частотною модуляцією, або за допомогою швидкодіючого синтезатора частоти з малим кроком перестроювання частоти.

Однією з вимог до джерела НВЧ-опромінювання є лінійність його модуляційної характеристики, тобто отримання заданого закону зміни частоти з малими спотвореннями.

3.4 Комбінований (PJVS+JAWS) метод

В останні роки в РТВ розроблено комбінований (PJVS+JAWS) метод, який поєднує позитивні якості обох методів, тобто дозволяє одержати рівень напруги до 10 В з високою спектральною чистотою [3.4]. Схему його реалізації наведено на рисунку 3.9.

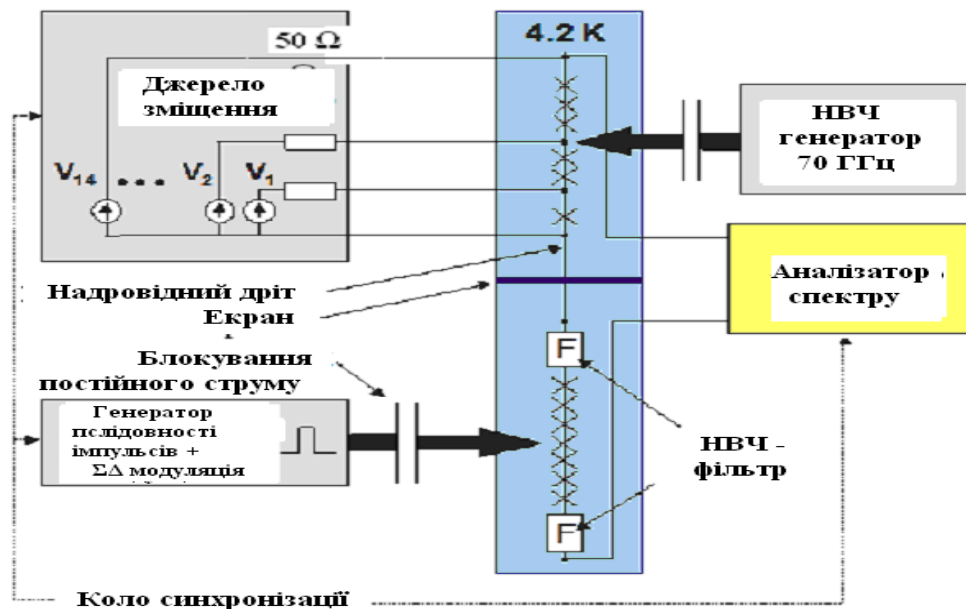
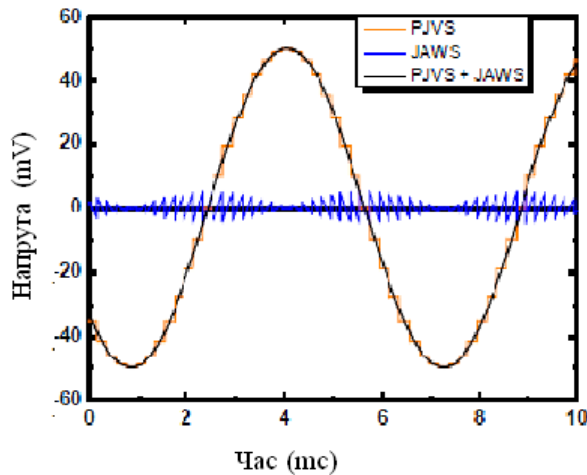
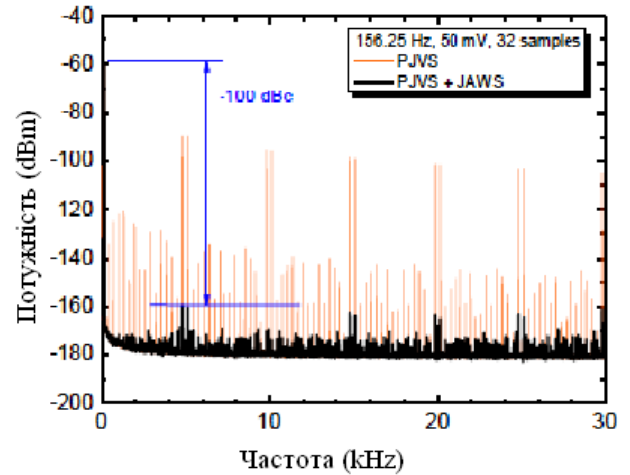


Рисунок 3.9– Комбінований (PJVS+JAWS) метод

Поетапно синтезують сигнал методом PJVS і на нього накладають сигнал JAWS (метод суперпозиції). Експеримент показує, що при коректній реалізації і синхронізації сигнал JAWS здатний суттєво згладити стрибки напруги, які виникають у сигналі PJVS. На рисунку 4.21 наведено часове і спектральне відображення сигналів, з яких видно, що в сумарному сигналі всі вищі гармоніки зменшені до рівня близько мінус 100 дБ.



Східчастий синтезований сигнал (PJVS), сигнал JAWS та їх суперпозиція



Спектри східчастого генерованого сигналу (червона крива) та накладеного сигналу (чорна крива)

Рисунок 3.10 – Часове і спектральне відображення сигналів в (PJVS+JAWS) методі

Невизначеність відтворення синусоїдальної напруги оцінюється значенням $(3-5) \cdot 10^{-8}$ на частотах до 200 кГц.

Оцінимо значення одержаних результатів для метрології змінної напруги. В існуючій сьогодні системі еталонів змінна напруга відтворюється в діапазоні частот від 10 Гц до 1...2 ГГц і в діапазоні напруг від 1000 В (в НЧ-діапазоні, на частотах 20 Гц...1 кГц) до 1 В у ВЧ-діапазоні (1...2 ГГц), а основним методом вимірювання є метод теплового компарування. При цьому невизначеність відтворення становить:

$0,5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-4}$ – в діапазоні частот 10 Гц...30 МГц;

$5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-2}$ – в діапазоні частот 30 МГц...2 ГГц.

Порівняння з результатами, одержаними за допомогою ефекту Джозефсона (U до 10 В при $f < 200$ кГц, невизначеність $10^{-8} \dots 10^{-9}$), показує, що останній не здатний замінити метод теплового компарування в існуючій системі еталонів змінної напруги (перш за все, за частотними і динамічними діапазонами), але дозволяє досягти набагато вищої точності в НЧ-діапазоні. Тому еталони змінної напруги на ефекті Джозефсона мають своє особливе значення для метрології, яке полягає в можливості атестації і калібрування

існуючих еталонів змінної напруги, а також у проведенні особливо точних вимірювань у найбільш уживаному діапазоні частот до 1 МГц.

4 ПРИКЛАДИ ПРИЛАДІВ, СТВОРЕНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦЬОГО МЕТОДУ

4.1 Квантовий вольтметр постійного і змінного струму

Невизначеність вимірювання становить $1 \cdot 10^{-9}$ у діапазоні частот до 10 кГц.

4.2 Еталонна установка Supra VOLT control (Німеччина)

Supra VOLT control є повністю автоматичною еталонною системою на основі ефекта Джозефсона, має режими постійного і змінного струму.

Supra VOLT control доступна у двох версіях. Перша використовує рідкий гелій в якості холодоагенту .У другому варіанті використовується охолоджувач імпульсного типу.



Рис.4.1 Апаратура SupraVOLTcontrol

Метрологічні характеристики системи:

- напруга постійного струму до ± 10 V; типова похибка калібрування (пряме порівняння з іншою напругою Джозефсона) $\Delta V/V_{10V} = 4 \times 10^{-10}$.

- напруга змінного струму до 1 В, частота до 1 кГц. Типова похибка калібрування $\Delta V/V = 2 \times 10^{-8}$

4.3 Прецизійний міст змінного струму для вимірювання імпедансів з використанням джозефсонівських джерел змінної напруги, які використовують бінарні програмовані матриці (метод PJVS)

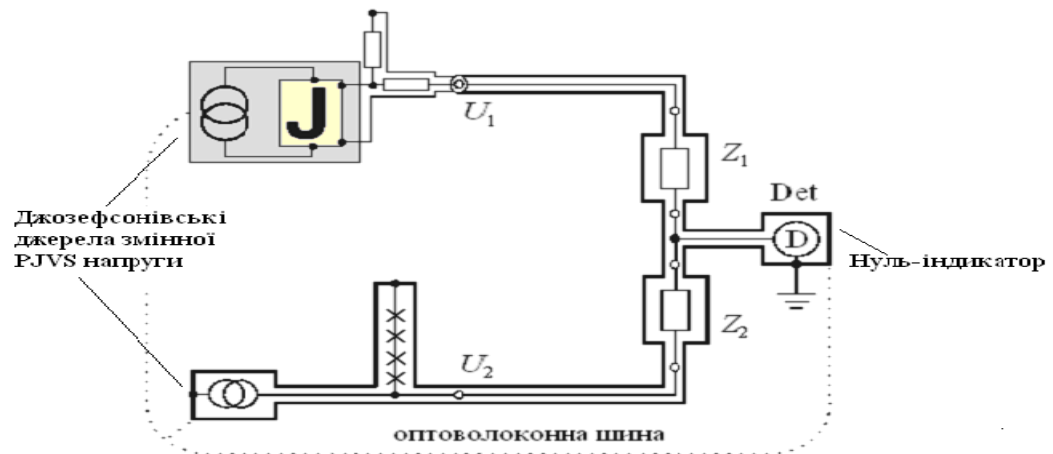


Рис. 4.2. Міст змінного струму на пристроях Джозефсона

Метод дозволив проводити порівняння опорів до 10 кОм із невизначеністю $1 \cdot 10^{-8}$, ємностей 100 пФ із невизначеністю $1 \cdot 10^{-7}$ у діапазоні частот від 25 Гц до 20 кГц, а також вимірювати відношення імпедансів із фундаментальною точністю. Це є, безумовно, значним досягненням (рис. 4.2) [26].

4.4 Еталон електричної потужності на промисловій частоті

Усі національні еталони електричної потужності наразі будуються на основі простежуваності до первинних еталонів постійної напруги (через DC/AC-перетворення) і електричного опору, Саме похибка DC/AC-перетворення є домінуючою похибкою відтворення потужності. Використання методів прямого відтворення змінної напруги на основі ефекту Джозефсона,

безумовно, приведе до зниження невизначеності еталона, орієнтовно, на порядок.

Як показано в [4], у РТВ такий еталон уже створено.

5 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІРИ

5.1 Загальні положення

При дослідженні міри, окрім перевірки працездатності усіх систем еталона, визначають:

- максимальну вихідну напругу на матрицях контактів Джозефсона 1 В та 10 В;
- похибку вимірювання частоти НВЧ-опромінення і нестабільності цієї частоти; вплив цих параметрів на похибку (невизначеність) відтворення еталонної ЕРС;
- невилучений залишок термо-ЕРС, його нестабільність, вплив цих параметрів на похибку (невизначеність) міри;
- нестабільність міри напруги на стабілітроні і її вплив на похибку передачі розміру одиниці;
- максимальну потужність генератора НВЧ 70 ГГц;
- значення струму спливу і його вплив на похибку (невизначеність) міри;
- невилучену систематичну похибку (НСП) міри;
- випадкову похибку (середньоквадратичне відхилення);
- невизначеність результату вимірювань;
- похибку передачі розміру одиниці;
- невизначеність передачі розміру одиниці;
- нестабільність системи зберігання міри.

На основі цих результатів визначаються метрологічні характеристики міри ЕРС (еталона).

У відповідності до ДСТУ3231-95 та ГОСТ 8.381-80 у еталоні одиниці електрорушійної сили (ЕРС) та сталої напруги нормуються:

- невилучена систематична похибка відтворення розміру одиниці у вигляді границі Θ ;

- випадкова похибка, яка характеризується середнім квадратичним відхиленням (СКВ) результату вимірювань S при відтворенні одиниці;
- похибка передавання розміру одиниці у вигляді СКВ результату вимірювань S_{Σ} , обумовленого впливом випадкових та невилучених систематичних похибок методу та засобів вимірювань, що використовуються при передаванні розміру одиниці;

Крім того, у відповідності з міжнародними рекомендаціями для еталона розраховуються параметри невизначеності відтворення та передачі розміру одиниці.

5.2 Основні джерела похибок міри

Еталонне значення ЕРС відтворюється у відповідності до виразу (1.2), тобто через частоту опромінення і фундаментальні сталі h (стала Планка) і e (заряд електрона). Таким чином, першим джерелом похибки відтворення еталонного значення ЕРС є похибка визначення частоти опромінення;

Другим джерелом похибки є той факт, що еталонне значення ЕРС необхідно передати з криогенного середовища (4,2 К) до (293 К). Таким чином, виникає термо-ЕРС і залежність її значення (асиметрія) від полярності струму через ефект Пельтьє. Наявність цих ефектів призводить до того, що значення ЕРС на виході еталона відрізняється від розрахованого за (1.2);

Значення ЕРС на виході Джозефсонівського джерела буде точно дорівнювати розрахованому за (1.2) при безкінечному опорі між потенційними виводами цього джерела і заземленням. В реальності цей опір має кінцеве значення, тобто має місце струм витоку, який також є джерелом похибки відтворення ЕРС;

Інші можливі складові похибки відтворення при коректній реалізації ефекту Джозефсона дуже малі. Це показано у ряді робіт по дослідженню еталонів на базі ефекту Джозефсона [13 – 16].

Поведемо аналіз похибки міри ЕРС, яка розроблена в ННЦ „Інститут Метрологія” і використовується у складі первинного еталона вольтів.

5.3 Похибка визначення частоти опромінення

Похибка має дві складові: систематичну, пов’язану з неточністю вимірювання частоти опромінення, і випадкову, пов’язану з нестабільністю цієї частоти.

Вимірювання частоти НВЧ-генератора здійснюється за допомогою електронно-лічильного частотоміра ЧЗ-66, який синхронізовано від державного еталона часу та частоти, та переносника частоти Ч5-13. Режим роботи частотоміра – вимірювання частоти з часом рахування 1 с.

Таким чином, похибка вимірювання частоти утворюється в системі «переносник частоти – частотомір», яка, згідно з технічними описами цих приладів, оцінюється значенням $(2 - 3) \cdot 10^{-10}$. Враховуючи, що частотомір ЧЗ-66 синхронізовано сигналом державного еталона часу та частоти, ця похибка є значно меншою, і може бути прийнята на рівні $\Theta_f \approx 1 \cdot 10^{-10}$. В термінах невизначеності вона відноситься до типу В і складає

$$u_{B1} \approx \Theta_f / \sqrt{3} = 0,6 \cdot 10^{-10}. \quad (5.1)$$

Для визначення СКВ, пов’язаного з нестабільністю частоти, проводять n вимірювань частоти НВЧ-генератора f_i , яку встановлюють близькою до 70 ГГц.

За n спостереженнями визначають середнє арифметичне значення (f_{cp}) та відносне СКВ від середнього значення частоти S_f .

Як показав експеримент, при $n = (30 - 50)$ S_f не перевищує $1 \cdot 10^{-9}$.

Стандартна невизначеність від нестабільності частоти (u_f) відноситься до типу А та визначається як $u_{A1} = S_f$.

5.4 Похибка через наявність термо-ЕРС і ефекту Пельтьє

Наявність термо-ЕРС і ефекту Пельтьє визначають вимірюванням напруги за допомогою нановольтметра Keithley 2182 на виході блока комутації при вимкнених опроміненні та зміщенні КД (тобто при відсутності джозефсонівської напруги на виході нановольтметра) при прямому та зворотному ввімкненні виводів з КД (U_+ , U_-).

В еталоні України, як показав експеримент з багаторазовими спостереженнями [22], значення U_+ знаходиться в межах (120 – 135) нВ, U_- - в межах від -180 до -205 нВ, тобто напруга асиметрії ($U_+ - U_-$), що виникає через ефект Пельтьє, лежить в межах від -50 до 78 нВ. При цьому покази нановольтметра при його закороченому вході, тобто власний шум нановольтметра, складає ~ 3 нВ. Таким чином, ефекти термо-ЕРС і Пельтьє очевидні.

Для вилучення впливу термо-ЕРС використовується метод обчислення результату як середнього арифметичного результатів вимірювання при двох полярностях, а також урахування поправки на ефект Пельтьє, яка знаходиться з експерименту і складає $(U_- - U_+)/2$ з протилежним знаком. Але при цьому має місце випадкова похибка, пов'язана з нестабільністю термо-ЕРС і поправки на ефект Пельтьє, що визначається через статистичні характеристики масиву спостережень $U_- - U_+$.

Знаходять

$$U_{T_{cp}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{T_i}, \quad (5.2)$$

де m – кількість спостережень,

$$U_{T_i} = (U_{-i} - U_{+i})/2. \quad (5.3)$$

Абсолютна СКВ випадкової похибки становить

$$(S_T)_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (U_{Tcc} - U_{T_i})^2}{m(m-1)}}. \quad (5.4)$$

Згідно проведеного експерименту при $m = 30$ її значення $(S_T)_a = 5$ нВ.

Стандартна абсолютна невизначеність від нестабільності термо-ЕРС відноситься до типу А, тобто $u_{A2} = (S_T)_a = 5$ нВ.

5.5 Похибка через наявність струмів витоку

При визначенні цієї похибки вимірювальне коло системи відтворення відокремлюється від заземлення і вимикаються усі прилади системи відтворення. Тераомметром Е6-13А вимірюється опір витоку R_i між потенційним виводом від матриці КД та заземленням. Кількість спостережень –

5. Опір витоку $R_{\text{вит}}$ визначається за формулою

$$R_{\text{вит}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_i. \quad (5.5)$$

Похибка від наявності струмів витоку є НСП, її відносне значення визначається за формулою

$$\Theta_{\text{вит}} = R/R_{\text{вит}}, \quad (5.6)$$

де R – внутрішній опір ЗВТ, якому передається розмір одиниці ЕРС. Для міри напруги на стабілітронах та нормальних елементів $R \approx 10^3$ Ом.

За даними експериментальних досліджень $R_{\text{вит}} \approx 1,6 \cdot 10^{11}$ Ом, тоді $\Theta_{\text{вит}} = 6 \cdot 10^{-9}$.

Стандартна відносна невизначеність від наявності струмів витоку $u_{\text{вит}}$ відновиться до типу В та обчислюється за формулою

$$u_{\text{вит}} \approx \Theta_{\text{вит}} / \sqrt{3} = 3,5 \cdot 10^{-9}. \quad (5.7)$$

5.6 Невилучена систематична похибка міри

НСП еталона визначається розрахунковим шляхом і має такі складові:

Θ_{f_1} - похибка вимірювання частоти генератора НВЧ коливань,

$\Theta_{\text{вим}}$ - похибка від наявності струмів витoku.

Кореляції між ними не існує.

Оцінка НСП (Θ) здійснюється розрахунковим шляхом при довірчій ймовірності 0,99 за формулою

$$\Theta = 1,4 \sqrt{\Theta_{f_1}^2 + \Theta_{\text{вим}}^2} = 1,4 \sqrt{(1 \cdot 10^{-10} \cdot U_H)^2 + (6 \cdot 10^{-9} \cdot U_H)^2} = 8,0 \cdot 10^{-9} \quad (5.8)$$

5.7 Випадкова похибка еталона

Випадкова похибка еталона (СКВ результату вимірювань) при відтворенні одиниці ЕРС дорівнює СКВ середнього значення невилученого залишку термо-ЕРС (S_T), оскільки $S_f \ll S_T$. Таким чином, абсолютне СКВ становить $5 \cdot 10^{-9}$ В, відносно S_T дорівнює $5 \cdot 10^{-9}$ при $U=1$ В і $5 \cdot 10^{-10}$ при $U=10$ В.

5.8 Невизначеність відтворення одиниці

Сумарна стандартна невизначеність еталона обчислюється за формулою

$$u_{\Sigma} = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + u_{B2}^2}, \quad (5.9)$$

і становить $6 \cdot 10^{-9}$ при $U=1$ В та $3,5 \cdot 10^{-9}$ при $U=10$ В.

Абсолютна похибка передачі розміру одиниці ЕРС від державного до робочого еталона $(S_{\varepsilon\Sigma})_a$ визначається за формулою

$$(S_{\varepsilon\Sigma})_a = \sqrt{(S_B)_a^2 + (S_K)_a^2} \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ В}, \quad (5.10)$$

де $(S_B)_a$ – СКВ результату вимірювань компаратором різниці напруг еталона (1,85 нВ);

$(S_k)_a$ – СКВ похибки нуль-індикатора (1,9 нВ).

Значення $(S_v)_a$ і $(S_k)_a$ визначені експериментально шляхом багаторазових вимірювань.

Розширена невизначеність $u_p = t_{\text{эф}} \cdot u_{\Sigma}$ [2] і становить:

при $t_{\text{эф}}=2$ $u_p=12 \cdot 10^{-9}$ (при $U=1$ В) та $u_p=7 \cdot 10^{-9}$ (при $U=10$ В);

при $t_{\text{эф}}=3$ $u_p=18 \cdot 10^{-9}$ (при $U=1$ В) та $u_p=10 \cdot 10^{-9}$ (при $U=10$ В).

Сумарна стандартна невизначеність передачі дорівнює $S_{\varepsilon\Sigma}$.

Типова невизначеність калібрування насичених нормальних елементів за допомогою джозефсонівського еталону може складати менше 1 нВ. Для міри напруги на стабілітроні невизначеність набагато вище – біля 100 нВ на 10 В та визначається власним шумом стабілітронів, який має спектральну щільність виду $1/f$.

Багаторазові звірення національних еталонів одиниці напруги, заснованих на ефекті Джозефсона, проведені за останні роки, показали, що відтвореність розміру вольта складає $1 \cdot 10^{-9}$ - $5 \cdot 10^{-10}$. Таким чином, з введенням у метрологічну практику еталонів на основі джозефсонівських мікросхем точність збереження розміру одиниці напруги стала вищою за останні 20 років більш ніж в 100 разів.

5.9 Нестабільність міри

Нестабільність еталона визначається довготривалими спостереженнями за мірою напруги з групи насичених НЕ. За експериментальними дослідженнями групової міри встановлено, що її нестабільність за рік не перевищує $3 \cdot 10^{-7}$. Значення похибок та невизначеності відтворення одиниці ЕРС наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Значення похибок та невизначеності міри ЕРС (еталона)

Джерело похибки	Значення похибки		Стандартна невизначеність	
	S_i	Θ_i	Тип	Значення

Похибка вимірювання частоти НВЧ-опромінення	-	$1 \cdot 10^{-10} U_H$	B	$1 \cdot 10^{-10} \cdot U_H$
Нестабільність частоти	10^{-11}		A	$10^{-12} \cdot U_H$
Нестабільність термо-ЕРС	$5 \cdot 10^{-10}$		A	$5 \cdot 10^{-10}$
Наявність струмів витoku	-	$6 \cdot 10^{-9} U_H$	B	$4 \cdot 10^{-9} \cdot U_H$
Сумарна оцінка	$5 \cdot 10^{-10}$	$8,0 \cdot 10^{-9}$		$4 \cdot 10^{-9}$

ВИСНОВКИ

На базі «квантових вольтів і Ома» може бути відтворений «квантовий ампер» (з використанням закону Ома) з невизначеністю близько (1–2). У перспективі можливе також пряме відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання. Одним з актуальних завдань у метрології є «замикання» квантового трикутника, що забезпечить незалежне відтворення за допомогою квантових методів базових електричних одиниць і обіцяє нові метрологічні можливості.

На базі квантових ефектів створено практичну систему еталонів електричних одиниць, яка забезпечує високу точність, стабільність і взаємоузгодженість одиниць, але не відповідає діючим сьогодні визначенням цих одиниць у SI. Таким чином, в електричних вимірюваннях виник дуалізм, тобто паралельне існування двох систем одиниць: SI і практичної. Визначення ампера через елементарний заряд і введення New SI ліквідує дуалізм, що дуже важливо для метрології і науки в цілому.

Апаратура, що ґрунтується на квантових ефектах, не потребує постійного підстроювання, частішої атестації тощо для реалізації найвищої точності, що необхідно для еталонів системи SI. Така апаратура менш чутлива до умов реалізації, має більш високі експлуатаційні характеристики.

Квантові ефекти і еталони використовують високотехнологічні процеси і структури (надпровідність, кріогенну техніку, квантові мікроструктури). І хоча вони більш складні у виготовленні, але забезпечують більш високу точність, стабільність, відтворюваність і надійність, що піднімає систему забезпечення єдності вимірювань на якісно новий рівень.

Названі вище властивості нової системи свідчать про її безумовну перевагу над системою, яка ґрунтується на механічних вимірюваннях, що вже призвело до її практичного застосування.

Подальшими кроками мають стати офіційне введення в дію нових визначень і New SI.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Josephson B. // Phys. Lett. – 1962. – V. 1. – P. 251.
2. Забезпечення єдності електрорадіовимірювань : підручник; Павленко Ю.Ф., Захаров І.П., Кондрашов С.І. – Х. : Вид-во „Підручник НТУ ХПІ”.-2014 – 235 с.
3. Ю. Нимаєр и др. Современное состояние метрологии в области джозефсоновского напряжения переменного тока. Труды международной конференции «Метрология 2012». – Х. : ННЦ «Институт метрологии», 2012.
4. Гебель Е., Зигнер У. (E. Gebel, U. Siegner) . Квантовая метрология (англ.), Брауншвейг, Wiley-vch, 2014
5. Вступ до квантової метрології. Підручник. Ю.Ф. Павленко, С.І. Кондрашов, П.І. Неєжмаков та ін.; за ред. Ю.Ф. Павленка. – Харків : ФОП Мезіна В.В., 2017.
6. Нимаєр Ю. Матрицы Джозефсона для прецизионных измерений напряжений постоянного и переменного тока // Труды международной конференции «Метрология 2008». – Х.:ННЦ «Институт метрологии», 2008. – С. 16 – 21.
7. Popel R. The Josephson Effect and Voltage Standards // Metrologia. – 1992. – V. 29. – P. 153 –174.
8. Квантовая метрология и фундаментальные константы. Сборник статей; пер. с англ. – М. : Изд-во «Мир», 1981. – 368 с
9. Аппаратура для частотных и временных измерений; под ред. А. П. Горшкова. – М. : Изд-во «Советское радио», 1971. – 336 с.
10. Державний первинний еталон одиниці часу і частоти / О. С. Клейман, В.П. Оголюк, Г.С. Сидоренко та ін. // Український метрологічний журнал. – 1997. – Вип. 3. – С. 18–23.
11. Тейлор Б. Фундаментальные константы и квантовая электродинамика/ Б. Тейлор, В. Паркер, Д. Лангенберг. – М. : Атомиздат, 1972.

12. Нимайер Ю. Матрицы Джозефсона для динамических измерений напряжения / Ю. Нимайер // Український метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 1. – С. 5–11.

13. Новий державний еталон одиниці ЕРС і сталої напруги / В. В. Анікін, Ю. Ф. Павленко, О. І. Колбасін та ін. // Український метрологічний журнал. – 2007. – Вип. 2. – С. 21–26.

14. Нимайер Ю. Матрицы Джозефсона для прецизионных измерений напряжений постоянного и переменного тока / Ю. Нимайер // Труды международной конференции «Метрология 2008». – Харьков: ННЦ «Институт метрологии», 2008.– С. 16–21.