

ЕФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА В МЕТРОЛОГІЇ: СУЧАСНИЙ СТАН

Ю.Ф. Павленко, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків

П.І. Неєжмаков, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, генеральний директор ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків

Н.М. Маслова, старший науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків

В.В. Анікін, інженер I категорії ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків



Ю.Ф. Павленко



П.І. Неєжмаков



Н.М. Маслова



В.В. Анікін

Розглядається розвиток та сучасний стан застосування методів вимірювання електричної напруги постійного та змінного струмів, що базуються на ефекті Джозефсона. Для ілюстрації деяких положень використано матеріали досліджень Федерального фізико-технічного інституту Німеччини (PTB).

The modern state of development and application of methods for measuring DC/AC voltage, based on the Josephson effect, are considered. The research materials of Federal Physical and Technical Institute of Germany (PTB) were used to illustrate some of the provisions.

Вступ

Як відомо, в електричних вимірюваннях протягом ряду років після початку їх існування як окремого виду вимірювань (початок ХХ сторіччя) не було знайдено жодного природного явища або ефекту, який міг би стати фундаментом метрології в електриці, з яким можна було б зв'язати розміри електричних одиниць і побудувати “природні” еталони цих одиниць. У часових вимірюваннях першими такими природними еталонами були “час обертання Землі навколо своєї осі”, потім “час обертання Землі навколо Сонця”, у лінійних вимірюваннях – довжина Паризького меридіана тощо. Тому із самого початку метрологія в електриці розвивалася шляхом “механізації” – порівняння з ме-

ханічними явищами і одиницями. Звідси народилося діюче і сьогодні в Міжнародній системі SI визначення основної одиниці від електрики – ампера, яке являє собою фізико-математичну абстракцію і не може бути реалізоване на практиці.

Такий стан протягом багатьох років стримував розвиток електричних вимірювань. Відкриття у 1946 р. ефекту ядерного магнітного резонансу [1, 2], винахід у 1956 р. розрахункового конденсатора (Томсона – Лампарда) [3, 4] були значними кроками в метрології, але до “прориву” не привели. Дійсним проривом стало відкриття у 1962 р. англійським фізиком (тоді ще аспірантом) Б. Джозефсоном макроскопічного квантового ефекту тунелювання електронів через тонкий шар діелектрика між двома надпровідниками, а також можливості його використання для відтворення абсолютного значення електричної напруги [5]. Цей ефект одержав його ім'я і став одним із базових методів електричної метрології, а згодом – найважливішим елементом нової метрології, яка одержала назву “квантової” [6]. Стислий опис фізичних основ ефекту Джозефсона наведено в Додатку 1.

Слід зазначити, що фундаментальний характер співвідношення “напруга – частота” і рівняння Джозефсона протягом ряду років ставилися під сумнів, але й теоретичні аргументи, й експериментальні результати довели точність виконання співвідношення та його незалежність від зовнішніх умов експерименту (температури, типу контактів, матеріалів) [7].

У 1972 р. Консультативний комітет з електрики Міжнародного комітету мір та ваг запропонував використовувати ефект Джозефсона для контролю за стабільністю групових еталонів вольт, які в той час будувалися на насичених нормальних елементах (елементах Вестона). Поступове накопичення більш точних даних про значення фундаментальних констант, відкриття квантового ефекту Холла [8] та уточнення значення сталої тонкої структури дозволили в 1988 р. прийняти нову міжнародну угоду про відтворення вольт за допомогою ефекту Джозефсона. Подальший розвиток метрології в електриці підтвердив обґрунтованість цього рішення.

Опису ефекту Джозефсона, принципів побудови й апаратних рішень еталонів напруги постійного струму, що ґрунтуються на цьому ефекті, присвячено багато публікацій, у тому числі й авторів цієї статті [9–11]. Але можливості ефекту Джозефсона не вичерпалися відтворенням напруги постійного струму, з'явилися нові роботи щодо його застосування на змінному струмі, а також у суміжних галузях вимірювань.

Додамо також, що розвиток методів, сфер застосувань, засобів вимірювання, що ґрунтуються на ефекті Джозефсона, нерозривно пов'язаний із розвитком технологій виготовлення основних елементів відповідної апаратури – контактів (переходів) Джозефсона, а також багатоконтактних мікросхем (матриць). Це самостійний, дуже наукомісткий напрямок досліджень у квантовій метрології, відповідними технологіями володіють лише кілька країн, лідерами серед яких є Німеччина (PTB) і США (NIST). Докладніше про це написано в Додатку 2.

Саме огляду останніх досягнень у використанні ефекту Джозефсона в електриці і суміжних видах вимірювань, а також нових засобів вимірювань, що ґрунтуються на вищезгаданому ефекті, присвячено цю статтю.

Статтю написано за матеріалами наших досліджень, а також на основі огляду та узагальнення закордонних робіт, зокрема, РТВ.

1. Ефект Джозефсона та еталони напруги постійного струму

Як уже було сказано, класичним використанням ефекту Джозефсона в метрології є відтворення абсолютного значення напруги постійного струму і побудова еталонів вольт.

Принципи побудови цих еталонів докладно описано в літературі [7, 10, 11]. Кращі еталони відтворюють значення напруги постійного струму до 10 В із відносною невизначеністю близько 10^{-10} .

Іншими важливими сферами використання ефекту Джозефсона є:

- відтворення основної одиниці SI від електрики – ампера – за законом Ома (разом із квантовим ефектом Холла, на основі якого відтворюється одиниця електричного опору) [12, 13];

- участь у відтворенні ряду одиниць в електричних та інших галузях вимірювань (передача розміру вольт 12 первинним еталонам);

- участь у створенні природного еталона кілограма на принципі порівняння електричної і механічної енергії за допомогою “ват-вагів” [14, 15];

- вимірювання напруги так званого “шуму Джонсона” у шумовій термометрії [16];

- вимірювання частоти НВЧ і оптичного діапазонів (що є проблемою) на основі вирішення зворотної задачі: $f_0 = 2eU/h$ [17].

Принципова можливість вимірювань частоти полягає в такому. Квантування вольт-амперної характеристики контакту Джозефсона під впливом зовнішнього НВЧ-випромінювання можна інтерпретувати як прояв своєрідної частотної селективності. При цьому перестроювання частоти власної генерації контакту Джозефсона при зміні напруги зміщення еквівалентне перестроюванню такого “селективного” елемента. Перестроювання можливе у широкому інтервалі – від міліметрового до інфрачервоного діапазону. Зазначена властивість зміщеного контакту Джозефсона становить основу декількох способів вимірювання частоти монохроматичного випромінювання у сантиметровому, міліметровому та інфрачервоному діапазонах довжини хвилі.

Таким чином, ефект Джозефсона можна вважати метрологічною основою всіх вимірювань із використанням постійного струму.

2. Еталони напруги змінного струму на ефекті Джозефсона

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 виконано такими методами [18–20]:

- шляхом синтезу відліків постійної напруги U_i за допомогою програмованих матриць [18, 19];

- опроміненням матриці імпульсним сигналом зі змінною частотою повторення (кодоімпульсний метод) [21–23];

- шляхом частотної модуляції НВЧ-сигналу, що використовується для опромінювання матриці [20].

Розглянемо ці методи більш докладно.

2.1. Метод синтезу відліків (метод програмованої матриці, PJVS-метод)

Метод полягає в отриманні серії дискретних відліків постійної напруги з виводів джозефсонівської матриці та 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.

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 [18, 19], 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 свідчить 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 перемикання на встановлення певної комбінації джерел струму дозволяє швидко вибрати стабільні відліки напруги постійного струму і синтезувати довільні форми напруги змінного струму (рис. 1).

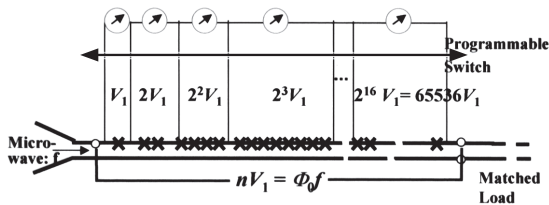


Рис. 1. Бінарна програмована матриця

Створення таких матриць і всієї системи формування змінної напруги є великим технологічним досягненням, короткі відомості про ці матриці наведено в Додатку 2.

Суттєвою особливістю цього методу є східчаста форма синтезованого сигналу (рис. 2).

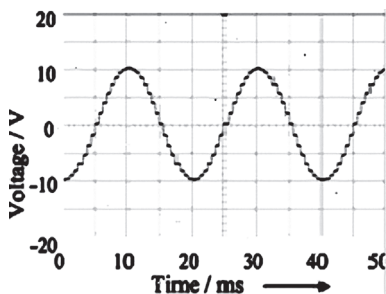


Рис. 2. Сформований східчастий сигнал змінного струму

Хоча невизначеність рівня кожної сходинки не перевищує $5 \cdot 10^{-9}$ на частотах до 1000 Гц, у спектрі такого сигналу міститься велика кількість гармонік, що робить цей метод непридатним для ряду завдань метрології.

2.2. Кодоімпульсний метод (JAWS-метод)

Названий вище недолік можна значною мірою подолати шляхом використання, як опромінюючого сигналу, не синусоїди, а послідовності імпульсів. При цьому частота імпульсу $f(t)$ змінюється в залежності від бажаної форми хвилі $V(t) = nf(t)\Phi_0$, $\Phi_0 = h/2e$. 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 $V(t) = n\Phi_0 f(t)$. 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 синтезу 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 “кодоімпульсний метод”, наведено на рис. 3.

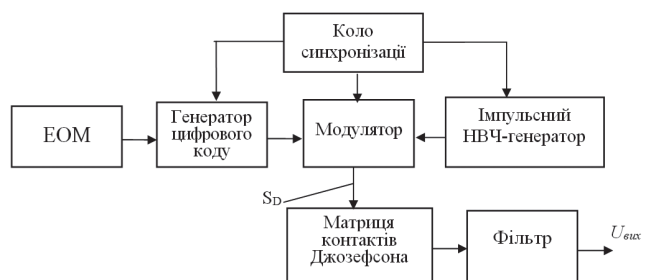


Рис. 3. Спрощена структурна схема реалізації кодоімпульсного методу

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 $U(t) = nf(t)\Phi_0$, $\Phi_0 = h/2e$ (рис. 4).

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

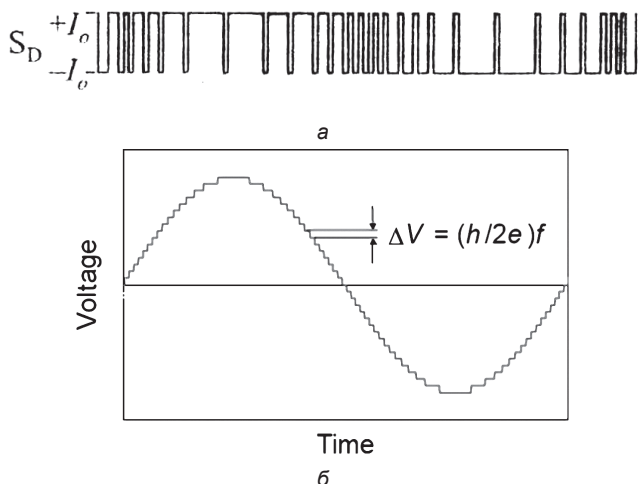


Рис. 4. Опромінюючий (а) і вихідний (б) сигнали в кодоімпульсному методі

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

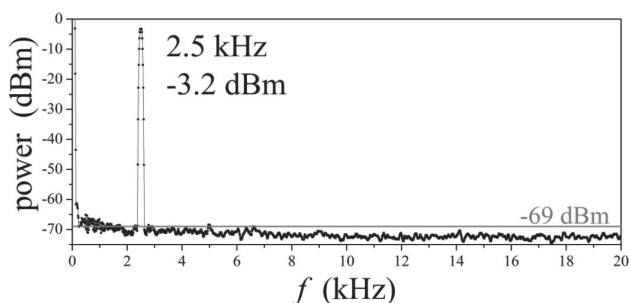


Рис. 5. Спектр сигналу в JAWS-методі

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 [19, 21, 22], метод із використанням програмованої джоузефсонівської матриці (PJVS-метод) забезпечує високу вихідну напругу (до 10 В), однак її спектр містить чималу кількість гармонік (значні спотворення). Кодоімпульсний метод (JAWS-метод) забезпечує чистий спектр, але рівень вихідного сигналу не перевищує 1 В (рис. 6).

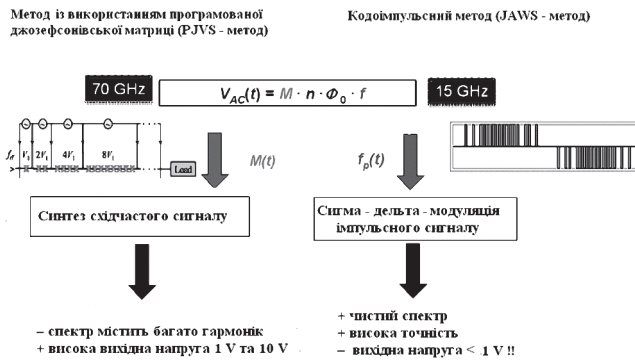


Рис. 6. Порівняння PJVS- і JAWS-методів

2.3. Метод із використанням частотної модуляції НВЧ-опроміювання

Перспективним методом відтворення напруги змінного струму є метод частотної модуляції, коли НВЧ-сигнал, який використовується для опромінювання матриці джоузефсонівських контактів, модулюється за частотою низькочастотним сигналом (рис. 7).

Цей метод базується на прямій залежності напруги на виході джоузефсонівської матриці від частоти опроміювання:

$$U_{\text{вих}} = f(t) n / K_J,$$

де $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга матриці контактів Джоузефсона; $f(t)$ – частота опромінювання матриці контактів Джоузефсона; n – кількість сходинок матриці контактів Джоузефсона; K_J – стала Джоузефсона.

Таким чином, якщо частота опромінювання 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 сходинок).

Цей метод розроблявся в ННЦ “Інститут метрології”, розглянемо його докладніше [20].

Частотно-модульований (ЧМ) сигнал, який подається на матрицю, має вигляд

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

де U_m – амплітуда сигналу; $\omega = 2\pi f$ – носійна частота; $\Omega = 2\pi f$ – модулююча частота; $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ – девіація частоти; φ – постійна фаза.

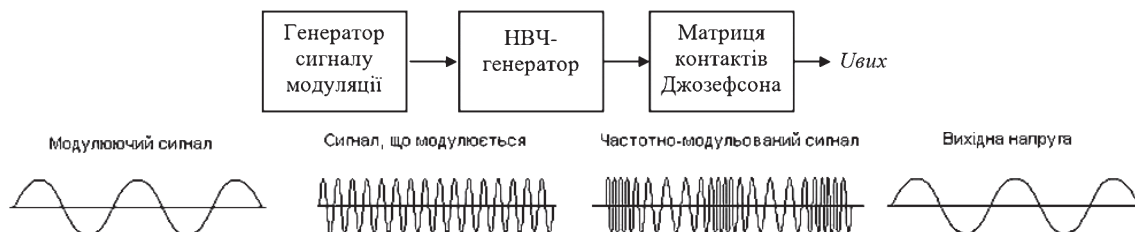


Рис. 7. Метод частотної модуляції НВЧ-опроміювання

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

$$u_{\text{вих}}(t) = f(t) \frac{n}{K_J} = \frac{f \cdot n}{K_J} + \frac{\Delta f \sin \Omega t \cdot n}{K_J},$$

яка містить постійну і змінну складові. Заблокувавши постійну складову, одержимо

$$u_{\text{вих}}(t) = \frac{\Delta f \sin \Omega t \cdot n}{K_J}.$$

Амплітуда цієї напруги (від піку до піку) буде

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

Таким чином, на виході одержуємо синусоїдальну напругу, частота якої є частотою 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} – f_{min} НВЧ-сигналу.

Оцінімо можливий рівень змінної напруги на виході матриці.

Девіація частоти ($2\Delta f$) без суттєвих спотворень може становити близько 5 % f , $U_{\text{н}} = 10$ В, тоді $U_{\text{н}} = 5 \% \cdot 10 \text{ В} = 0,5 \text{ В}$.

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

Важливою умовою для реалізації цього методу є необхідність мати досить широкую (за струмом) сходинокку Джозефсона. Таку сходинокку можна отримати за допомогою SINIS-матриці (рис. 8). Для мікроструктури Джозефсона типу SINIS n дорівнює одиниці.

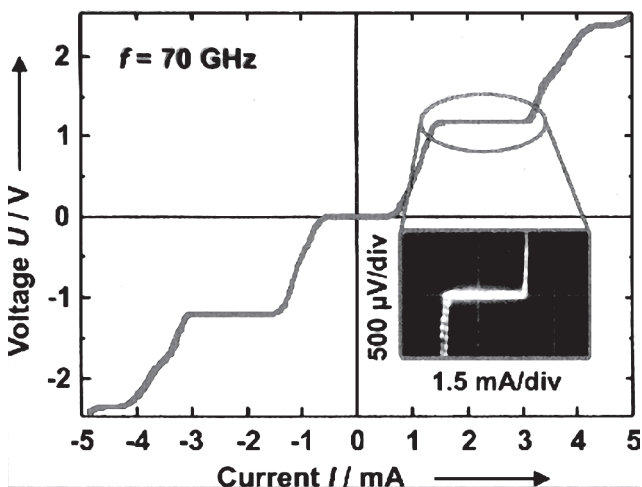


Рис. 8. Вольт-амперна характеристика SINIS-матриці

Експериментальні дослідження показали працездатність цього методу, але для уточнення його можливостей щодо рівня відтвореної змінної напруги і частотного діапазону, необхідні подальші поглиблені дослідження. Уже зараз можна сказати, що ці параметри пов'язані з параметрами матриці, зокрема, з рівнем відтворюваної постійної напруги і шириною сходинокки 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 із вимог до джерела НВЧ-опромінювання є лінійність його модуляційної характеристики, тобто отримання заданого закону зміни частоти з малими спотвореннями.

2.4. 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 [21, 23–25]. Схему його реалізації наведено на рис. 9.

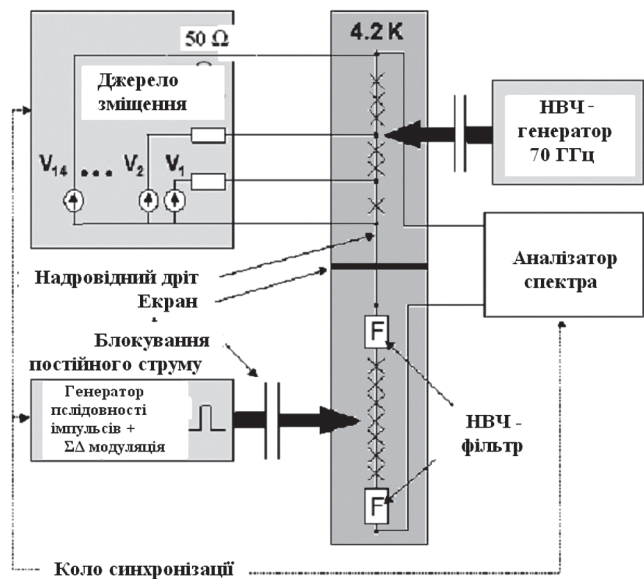
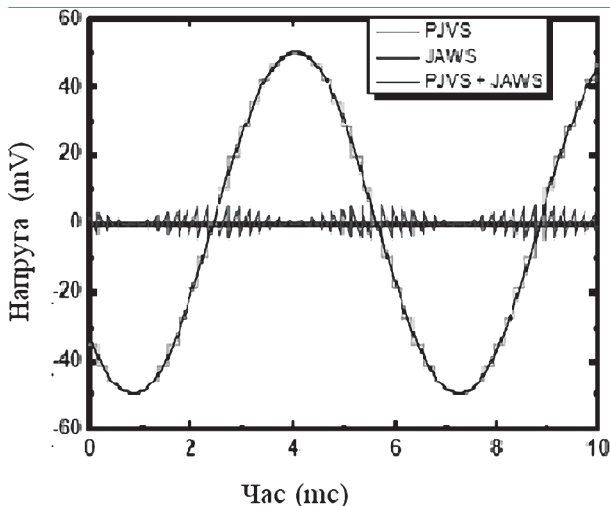
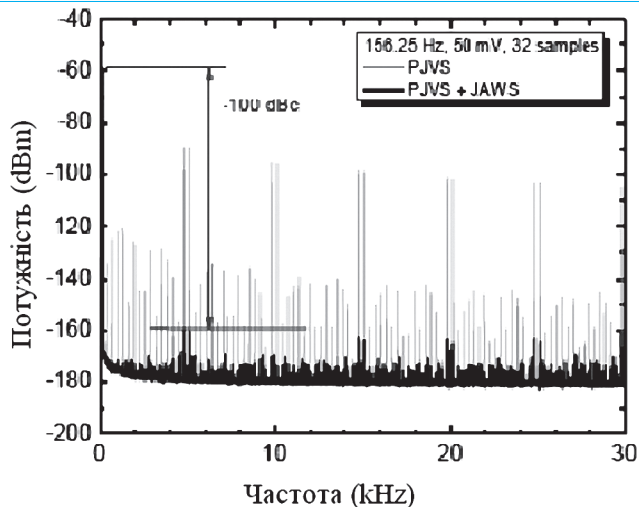


Рис. 9. Комбінований (PJVS+JAWS)-метод

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 рис. 10 наведено часове і спектральне відображення сигналів, з яких видно, що в сумарному сигналі всі вищі гармоніки зменшені до рівня близько -100 дБ.



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



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

Рис. 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.

3. Метрологічне застосування розроблених методів

Усі наведені вище методи вже використовуються для калібрування і повірки засобів вимірювання параметрів змінного струму: генераторів, вольтметрів, DC/AC-перетворювачів. Крім того, на базі розроблених методів створені і виробляються прецизійні засоби вимірювальної техніки. Ось деякі з них.

3.1. Квантовий вольтметр

У деяких країнах (Німеччина – РТВ, США – NIST) на базі розроблених методів створено квантовий DC/AC-вольтметр (постійної та змінної напруги). Основними пристроями в режимі змінного струму є джозефсонівське джерело напруги (на базі бінарної програмованої матриці PJVS), цифроаналоговий перетворювач і нуль-детектор, блоки керування і синхронізації (рис. 11).

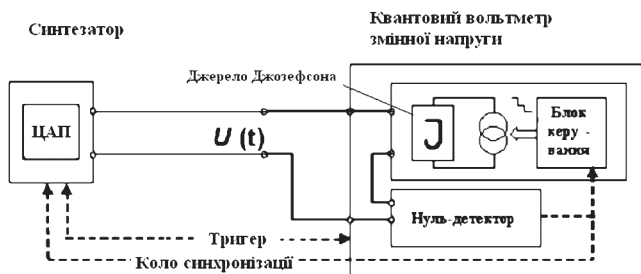


Рис. 11. Спрощена схема квантового вольтметра

ЦАП і нуль-детектор при відповідній часовій синхронізації забезпечують відсутність переходів (стрибків напруги) між сходінками. Вхідний і ви-

хідний тригери, які забезпечують синхронізацію, пов'язані оптично.

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

3.2. Міст для вимірювання імпедансів на змінному струмі з фундаментальною точністю

У РТВ розроблено прецизійні мости на двох джозефсонівських джерелах змінної напруги, які використовують бінарні програмовані матриці (метод PJVS). Структурну схему моста наведено на рис. 12 [26].

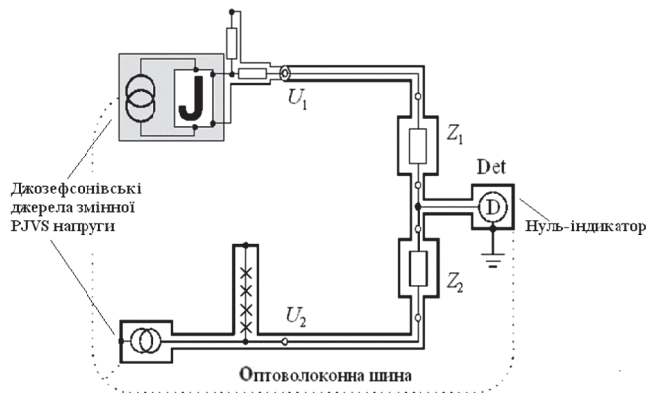


Рис. 12. Міст змінного струму на пристроях Джозефсона

Процедура вимірювання включає:

- попереднє регулювання струму моста кількістю переходів;
- точне врівноваження моста регулюванням частоти в одній матриці;
- регулювання фазового кута за допомогою електронної синхронізації (роздільна здатність 1 пс).

Метод дозволив проводити порівняння опорів 10 кОм із невизначеністю $1 \cdot 10^{-8}$, ємностей 100 пФ

із невизначеністю $1 \cdot 10^{-7}$ у діапазоні частот від 25 Гц до 10 кГц, а також відношення імпедансів із фундаментальною точністю. Це є, безумовно, видатним досягненням.

3.3. Еталон потужності на промисловій частоті

Як відомо, саме на промисловій частоті (50 Гц, 60 Гц) є постійна потреба в підвищенні точності і достовірності вимірювання потужності електричного струму, оскільки вона є основою комерційних розрахунків між виробниками і споживачами електроенергії на всіх рівнях.

Усі національні еталони електричної потужності наразі будуються на основі простежуваності до первинних еталонів постійної напруги (через DC/AC-перетворення) і електричного опору, а основним методом DC/AC-перетворення є метод теплового компарування. Саме похибка DC/AC-перетворення є домінуючою похибкою відтворення потужності. Використання методів прямого відтворення змінної напруги на основі ефекту Джоузефсона, безумовно, приведе до зниження невизначеності еталона, орієнтовно, на порядок.

Як показано в [19], у РТВ такий еталон уже створено.

Також можна передбачати, що і в еталоні сили струму в діапазоні низьких частот, який сьогодні ґрунтується на методі теплового компарування, буде впроваджено один із наведених вище методів відтворення змінної напруги з використанням ефекту Джоузефсона.

3.4. Джоузефсонівська міра напруги без рідкого гелію

Одним із факторів, який суттєво ускладнює поширення сфери застосування приладів на ефекті Джоузефсона, є необхідність використання в ньому рідкого гелію. Ця обставина підвищує вартість приладів, ускладнює процедуру вимірювань, вимагає створення спеціальної інфраструктури. Тому одним із напрямків подальших досліджень у цій галузі є створення джоузефсонівських мір із використанням більш простих охолоджувачів (кулерів), що не потребують рідкого гелію. На цьому напрямку досягнуто певних успіхів, відомо, що ряд країн уже розробив прилади, в яких замість рідкого гелію використовуються імпульсні охолоджувачі. Вони мають свої позитивні якості, але не є суттєво простішими і дешевшими.

Відомо також, що окрім РТВ і NIST, Національний метрологічний інститут Японії (NMIJ) теж бере участь у розробленні програмованого джоузефсонівського еталона напруги без рідкого гелію, як еталона напруги наступного покоління, з використанням переходів Джоузефсона NbN–TiN–NbN. Ці переходи можуть активува-

тися за температури приблизно 10 К компактным охолоджувачем. У матеріалах NMIJ указується, що в цьому методі можна, крім усунення необхідності використання рідкого гелію, досягти зменшення часу встановлення напруги, збільшити стійкість до шуму та використовувати мікрохвилі з частотою близько 20 ГГц замість традиційних 70 ГГц. У результаті цих удосконалень обладнання буде простішим і зручним у використанні. На цей час NMIJ успішно розробив систему, що може генерувати квантову напругу 1 В, і близький до створення системи генерування 10 В.

Також з'явилася публікація [27] про розробку вченими Російської АН мікросхеми, яка працює в умовах високотемпературної надпровідності при T від 75 до 77 К, видає напругу 25 мВ при частоті опромінення 73...74 ГГц. Згідно із цією публікацією, на її основі НДІ "Кварц" (м. Нижній Новгород, Росія) розробив еталон напруги, який генерує постійну напругу від 0 до 10 В з кроком 0,1 В і невизначеністю $5 \cdot 10^{-8}$.

Висновки

Наведені приклади показують, що можливості використання ефекту Джоузефсона в метрології далеко не вичерпуються відтворенням еталонної напруги постійного струму. Досягнутий і подальший прогрес у використанні цього ефекту нерозривно пов'язаний із результатами робіт у створенні квантових технологій виробництва джоузефсонівських матриць.

Оцінімо 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...3 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 Джоузефсона (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 Джоузефсона 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.

Додаток 1. Фізичні основи ефекту Джозефсона

Ефект Джозефсона полягає в тунелюванні “куперівських пар” електронів через тонкий шар діелектрика між двома надпровідниками і пов’язаний із явищами надпровідності та тунелювання електронів.

Явище надпровідності полягає у стрибковому падінні електричного опору при зниженні температури. Явище надпровідності було відкрито в 1911 р. голландським фізиком Х. Камерлінг-Оннесом при вимірюванні електричного опору ртуті за дуже низьких температур. Він хотів з’ясувати, наскільки малим може стати опір речовини електричному струму, якщо максимально очистити її від домішок і вилучити тепловий шум, тобто знизити температуру. Результат виявився несподіваним: за температури нижче 4,15 К опір майже миттєво зник.

Температуру $T_{кр}$, при досягненні якої виникає стрибок опору, було названо критичною, вона своя для кожної речовини. Крім того, не кожна речовина може стати надпровідником. Наприклад, мідь – один із найкращих провідників, але надпровідником не стає. А ось алюміній, свинець, ртуть і низка інших металів у надпровідний стан переходять. Критичні температури для деяких надпровідників становлять: алюміній – 1,14 К; олово – 3,69 К; ртуть – 4,15 К; ванадій – 4,3 К; тантал – 4,38 К; свинець – 7,26 К; ніобій – 9,2 К.

Надпровідність властива і деяким сплавам, наприклад, ртуті із золотом і оловом.

Одним із ефектів, який має місце при $T < T_{кр}$, є об’єднання електронів у так звані “куперівські пари” (за ім’ям фізика, що відкрив це явище), пов’язані єдиною хвильовою функцією. Крім того, всі пари є узгодженими, когерентними між собою і характеризуються згаданою вище єдиною хвильовою функцією.

Саме тому куперівські пари рухаються в металі (кристалі) без опору, їхній рух є узгодженим, когерентним, їхня хвильова функція простягається на відстань, значно більшу від розміру (кроку) кристалічної ґратки, і розповсюджується на всю довжину надпровідника. Тому куперівські пари не “помічають” іонів у ґратці і не розсіюються на них. Так виникає струм надпровідності.

Наведемо деякі відомості з квантової фізики. Унікальною особливістю квантових частинок, у тому числі електронів, є їхня особливість проникати через перешкоду (енергетичний бар’єр) навіть у тих випадках, коли їхня енергія нижча за потенційний бар’єр, властивий цій перешкоді. Таке явище носить назву тунелювання. Схематично воно показано на рис. 13. Якби електрон був класичною частинкою з енергією E , він, зустрівши на своєму шляху перешкоду, для подолання якої необхідна енергія $U > E$, повинен би був відбитися від цієї перешкоди. Однак як хвиля, що має від-

повідну хвильову функцію, він проходить через цю перешкоду, хоча і з витратою енергії. Ймовірність подолання перешкоди тим вища, чим геометрично тонший бар’єр і чим менша різниця між енергією електрона і енергетичною висотою бар’єра.

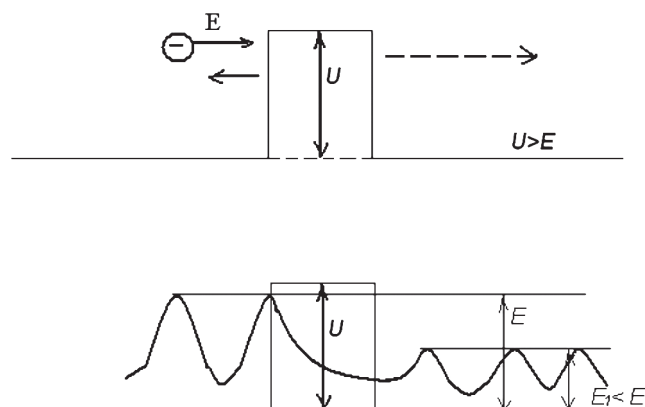


Рис. 13. Тунелювання електрона через бар’єр

Як сказано вище, стан електронних пар у надпровіднику характеризується єдиною хвильовою функцією. Якщо два надпровідники S_1 і S_2 , кожний із яких має свою хвильову функцію ψ_1 і ψ_2 , починають наблизитися один до одного, на якійсь відстані (а саме, коли вона стає менша за розмір куперівської пари) хвильові функції починають “відчувати” одна одну, і коли вони перекриваються, відбувається тунелювання куперівських пар, а між надпровідниками S_1 і S_2 виникає струм надпровідності (рис. 14). Це явище, відкрите Б.Джозефсоном у 1962 р., одержало назву “стаціонарного ефекту Джозефсона”, а контакт двох надпровідників, через який тунелюють куперівські пари, – “тунельного контакту”, або “контакту Джозефсона”.

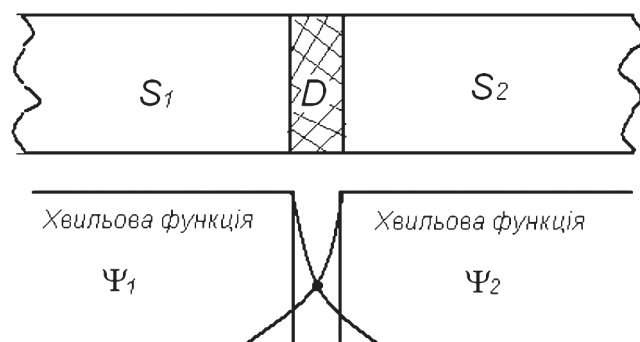


Рис. 14. Тунелювання електронів у контакті “надпровідник-діелектрик-надпровідник”

Одночасно зі стаціонарним ефектом Джозефсон передбачив також нестаціонарний ефект, а саме, виникнення електромагнітного випромінювання на контакті при підвищенні струму через контакт більше деякого критичного.

При цьому надлишок енергії випромінюється у вигляді кванта з енергією $2eU$, тобто контакт по-

чинає генерувати ВЧ-напругу (рис. 15), це явище одержало назву нестационарного ефекту Джозефсона.

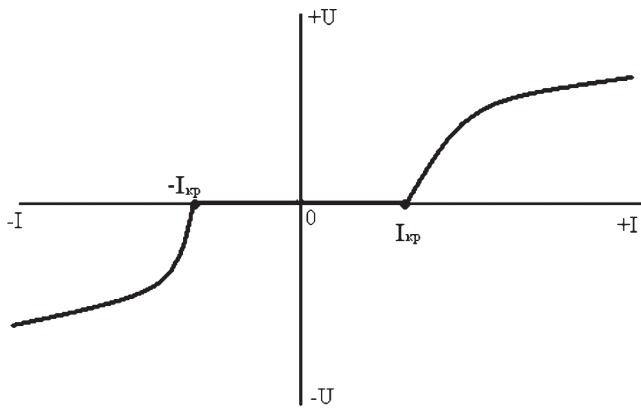


Рис. 15. ВАХ тунельного контакту при стаціонарному ефекті Джозефсона

Тут доцільно провести аналогію з електроном в атомі, який, переходячи з більш високого на більш низький вільний рівень енергії, випромінює при цьому квант електромагнітної енергії. Частоту цих квантів можна підрахувати таким чином. Квантомеханічна формула Планка має вигляд

$$\Delta E = hf_0,$$

де ΔE – квант енергії; h – стала Планка; f_0 – частота кванта.

Оскільки куперівська пара при напрузі U на тунельному контакті придбала енергію $2eU$, то частота квантів за формулою Планка дорівнює $f_0 = 2eU/h$, де e – фізична стала (заряд електрона).

На мові високочастотної техніки можна говорити про аналогію з електромагнітним ВЧ-резонатором.

Першу перевірку достовірності цього ефекту виконав американський фізик С. Шапіро у 1963 р. методом, запропонованим самим Джозефсоном. Якщо тунельний контакт дійсно працює як високочастотний резонатор, то діючи на нього зовнішнім ВЧ-коливанням, можна модулювати випромінювання контакту за частотою (як це робиться в радіопередавачах).

Якщо частота власного випромінювання контакту дорівнює ω_0 , а частота зовнішнього (модулюючого) опромінення ω , то при взаємодії обох випромінювань виникає частотно-модульований сигнал, який має цілий спектр частот: $\omega_0 \pm \omega$; $\omega_0 \pm 2\omega$; $\omega_0 \pm 3\omega$ і т. п.

Якщо для якоїсь частоти у спектрі виконується умова, що $\omega_0 = n\omega$, то це буде відповідати $\omega_0 - n\omega = 0$, тобто нульовій частоті.

Іншими словами, якщо на контакт направити випромінювання з постійною частотою ω і плавно регулювати частоту ω_0 (змінюючи напругу на кон-

такті), то при певних значеннях напруги на контактах повинен з'явитися постійний струм.

Наслідком цього є поява на вольт-амперній характеристиці джозефсонівського контакту особливостей у вигляді сходинок, які одержали назву “сходинок Шапіро”. Це явище називають також квантуванням вольт-амперної характеристики (ВАХ) (рис. 16). Із формули Планка випливає, що висота (за напругою) кожної сходинок дорівнює

$$U_J = \frac{h}{2e} f_0,$$

а напруга на n -й сходинок дорівнює

$$U_{nJ} = n \frac{h}{2e} f_0.$$

Величина $h/2e$ називається квантом магнітного потоку, обернена $2e/h$ – сталою Джозефсона K_J .

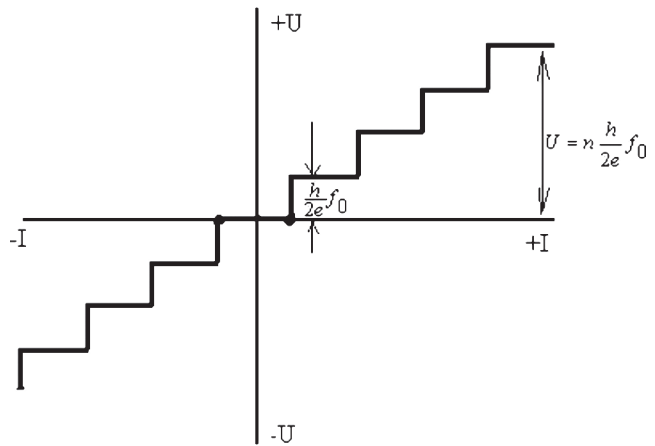


Рис. 16. ВАХ тунельного контакту при нестационарному ефекті Джозефсона

Таким чином, метрологія одержала потужний метод для відтворення напруги через частоту і фундаментальні фізичні сталі.

Додаток 2. Матриці контактів Джозефсона (огляд)

Огляд наведено на основі публікацій РТВ, зокрема, провідного вченого в цій галузі Й. Німайера [18, 19, 28].

Реальний контакт Джозефсона (КД) являє собою паралельне поєднання зовнішнього джерела струму $I(t) = I_0 + I_1 \sin \omega_c t$, нормального (не надпровідного) опору R_n , ємності контакту C і джозефсонівської індуктивності L (рис. 17). КД є LC-резонатором із загасанням і нелінійною джозефсонівською індуктивністю. Загасання контакту характеризується параметром гістерезису. Ще одним важливим параметром є критична напруга $V_c = I_c R_n$, яка визначає максимальну робочу частоту та можливий рівень сигналу на КД.

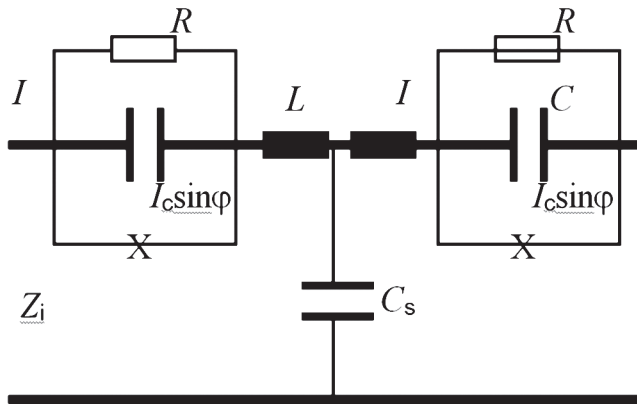


Рис. 17. Еквівалентна схема джозефсонівського контакту

На сьогодні створено 3 види КД: “надпровідник – ізолятор – надпровідник” (позначимо SIS), “надпровідник – нормальний метал – надпровідник” (SNS) і “надпровідник – ізолятор – нормальний метал – ізолятор – надпровідник” (SINIS).

Серед цих видів КД саме тунельний КД “надпровідник – ізолятор – надпровідник” (SIS) має дуже мале загасання і значний гістерезис ВАХ (рис. 18 а). Крім того, для цього типу КД область квантування ВАХ близько збігається із віссю напруги при майже нульовому струмі, тобто еталонна напруга утворюється без протікання струму через контакти (рис. 18 б). Сходинок ВАХ, як правило, багатозначні: до 6–7 на один контакт при $f \sim 70$ ГГц.

Інші види контактів, а саме SNS або SINIS, мають значно більше затухання і, таким чином, не мають гістерезису ВАХ (рис. 18 в). При заданому струмі зміщення має місце лише одна зразкова сходинок напруги (рис. 18 г), що робить еталонну напругу однозначною. Однак його значення на одному контакті при заданій частоті буде меншим.

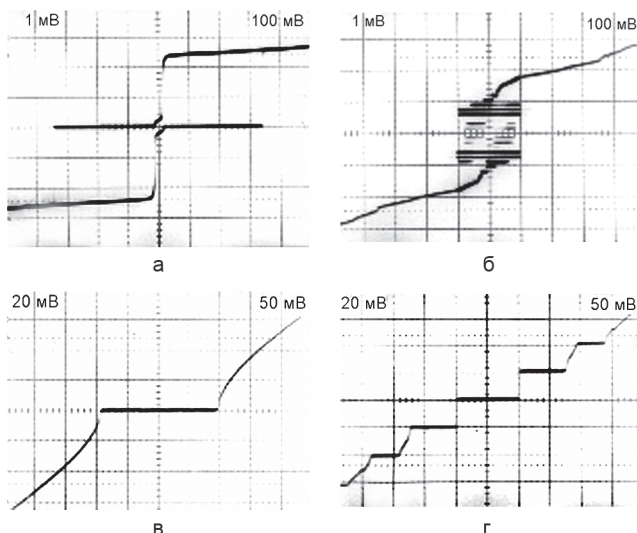


Рис. 18. Вольт-амперна характеристика тунельного контакту типу SIS у стаціонарному режимі (а); ВАХ того ж контакту при НВЧ-опромінуванні 70 ГГц у нестационарному режимі (б); вольт-амперна характеристика тунельного контакту типу SNS (в); ВАХ того ж контакту при НВЧ-опромінуванні 10 ГГц (г)

Оскільки вихідна потужність і імпеданс одичного осцилятора Джозефсона дуже малі, то і еталонна постійна напруга одного КД дуже мала для практичного використання. Тому для одержання необхідних значень напруги створено матриці з послідовно поєднаними КД і спеціально сконструйованими трактами зв'язку з джерелом НВЧ-опромінування.

Основними якісними характеристиками матриці, які необхідно знати для проектування джозефсонівської апаратури, є рівень вихідної постійної напруги, частота опромінування, рівень необхідної потужності опромінування, стійкість сходинок ВАХ, технологічна складність.

Якщо КД інтегровано з НВЧ-трактом, то ступінь узгодження R_n та імпедансу зовнішнього кола, наприклад, мікросмугової лінії, визначає рівень НВЧ-потужності, що має бути підведена до контакту. Разом із затуханням тракту зв'язку це визначає режим роботи матриці. Матеріалом КД типу SIS, як правило, є $Nb-Al_2O_3-Nb$. Значна невідповідність R_n та імпедансу смугової лінії є причиною того, що невелика частина НВЧ-потужності передається зі смугової лінії до окремого контакту. З одного боку, це гарантує достатньо рівномірне опромінення всіх контактів, з іншого – це потребує відносно великої потужності НВЧ для збудження матриці (більше 10 мВт на антені тракту). Позитивними рисами SIS-матриць для метрології напруг є досить висока напруга на одному контакті (до 1 мВ), стійкість матриць, а також допустимість відносно значного розкиду параметрів контактів.

Поміж сусідніми сходинокми немає станів з невизначеною напругою, крім того, перемикання поміж сходинокми може відбуватися досить швидко. Але, оскільки сходинок сталої напруги при нульовому струмі повністю перекриваються, вихідна напруга є багатозначною. Цей факт, а також відносно мала ширина (за струмом) сходинок призводять до серйозної проблеми стабільності при відтворенні напруги. Якщо, наприклад, під впливом зовнішнього шумового сигналу фазова синхронізація порушується на короткий час, то система автоматично не повертається до встановленої сходинок напруги. Оскільки число сходинок, яке вносить кожний окремий контакт у бажане значення еталонної напруги, невідоме, то сумарна кількість сходинок напруги не може бути визначена за рахунок вибору кількості контактів. На практиці частина цих проблем вирішується за рахунок подання на матрицю зміщення від джерела напруги, навантажувальна лінія якого перетинає лише невелике число сходинок напруги, завдяки чому матриця не може самостійно “перестрибнути” на іншу сходинок. Але труднощі залишаються. Особливо цей недолік SIS-матриць є суттєвим при створенні еталонів напруги, що програмуються для синтезу змінного струму. Але постійний прогрес у технологіях дозволив

створити еталони постійної напруги 10 В на 13920 SIS-контактах (ПТВ, Німеччина), які успішно використовуються більш ніж у 50 лабораторіях світу (рис. 19).

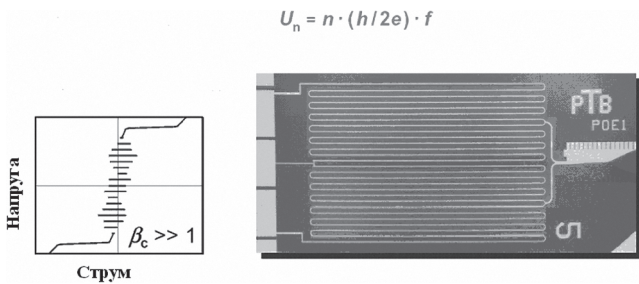


Рис. 19. SIS-матриця 10 В, яка містить 13920 контактів

SNS-матриця використовує контакти типу “надпровідник – нормальний метал – надпровідник” (Nb–PdAu–Nb). Значне неузгодження імпедансів контактів і смужкової лінії дозволяє одержати однорідне НВЧ-опромінування всіх контактів. На цих матрицях значення вихідної напруги одного КД становить до 40 мкВ, тобто значно нижче, ніж на контакті типу SIS.

Більші значення цієї напруги одержано в матрицях із SINIS-контактами (Nb–Al₂O₃–Al–Al₂O₃–Nb), що дозволяє працювати із SINIS-матрицями в широкому частотному діапазоні: від 10 до 100 ГГц. Матриця з 8192 контактами дозволяє досягти $U \geq 1$ В. Для досягнення однакових значень еталонної напруги для SINIS-матриці потрібна НВЧ-потужність, значно менша, ніж для SIS-матриці (майже в 10 разів).

Когерентна робота SINIS-матриці робить можливим одержання еталонних напруг до 10 В від матриці з 69120 контактами при опроміненні НВЧ-сигналом частотою 70 ГГц та потужністю 1 мВт у тракці антени (рис. 20). На рис. 21 наведено загальний вигляд матриці.

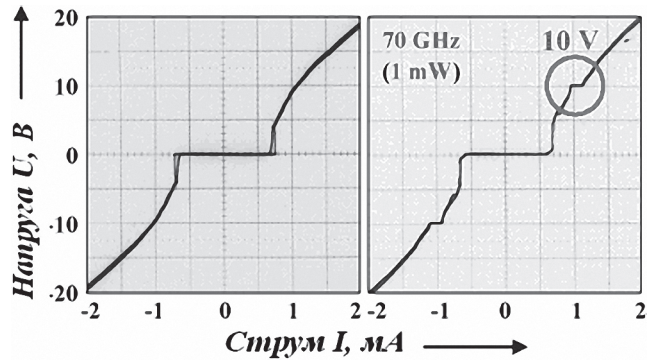


Рис. 20. Вольт-амперна характеристика SINIS-матриці 10 В, яка вміщує 69120 КД і має сходінку на 10 В

Орієнтовні порівняльні характеристики різних видів матриць наведено в таблиці.

	SIS	SNS	SINIS
Габарити А	(20×50) мкм ²	(2×2) мкм ²	(20×50) мкм ²
Напруга на КД ($I_c R_n$)	1 мВ	40 мкВ	100 мкВ
Частота опромінення $\omega_c/2\pi$	70 ГГц	10 ГГц	70 ГГц
Потужність опромінення	10 мВт	10 мВт	1 мВт

Розглянемо матриці для програмованих еталонів напруги змінного струму.

Еталони напруги змінного струму вимагають швидкої і точної перекомутації опорних напруг Джозефсона. Як уже було описано вище, така перекомутація неможлива з переходами SIS. Таку можливість надають тільки лінійні матриці сильно загасаючих переходів, такі, як SINIS і SNS, що дають можливість установлювати задану опорну напругу при певному струмі зсуву. Однак при цьому збільшується необхідне число переходів.

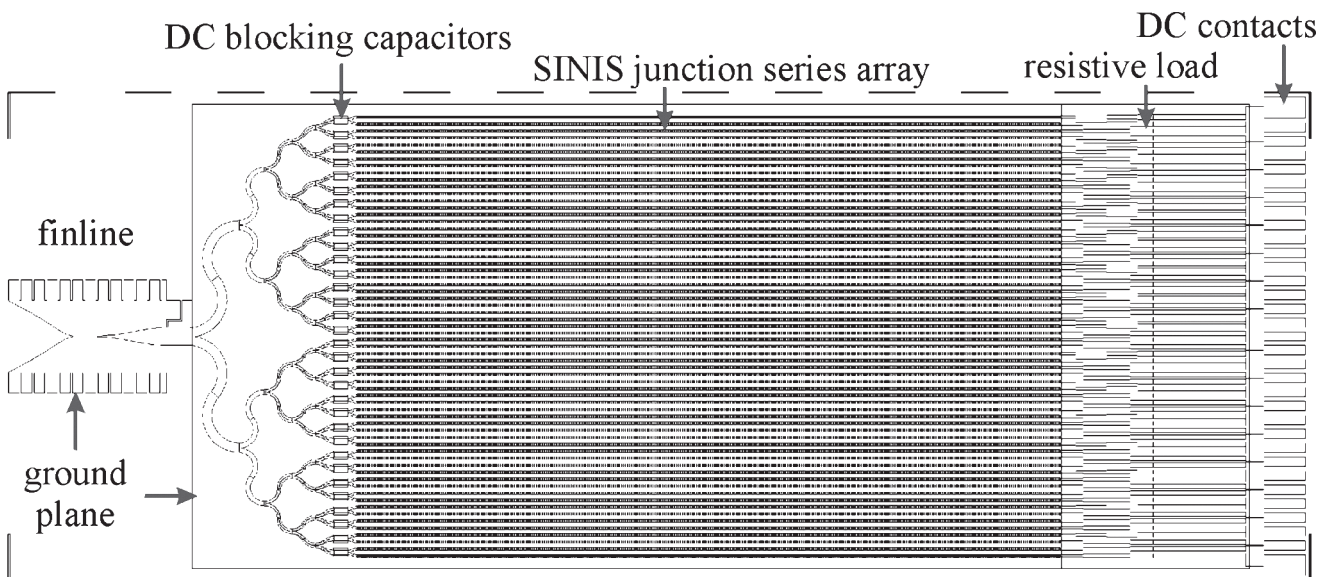


Рис. 21. SINIS-матриця 10 В, яка вміщує 69120 КД

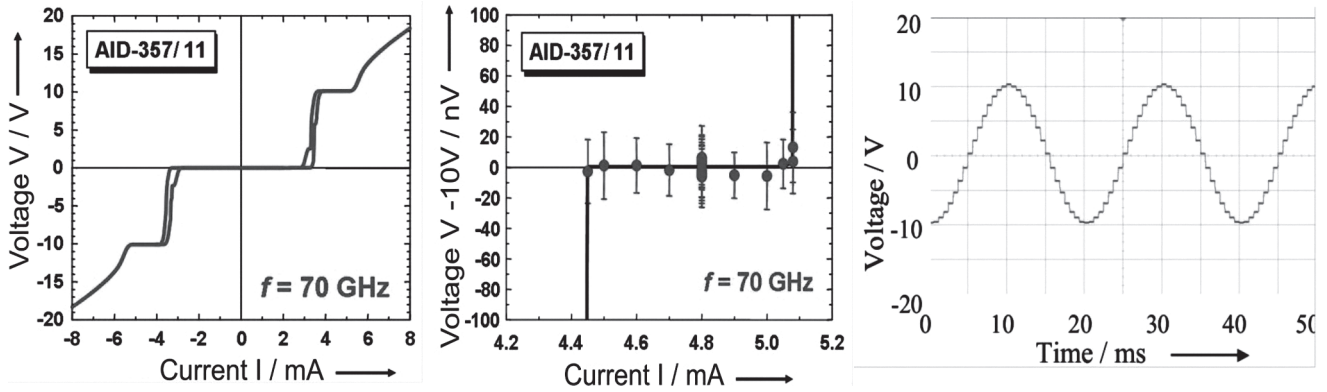


Рис. 22. Характеристика струму-напруги лінійної матриці SINIS на 10 В і постійний стрибок напруги на рівні 10 В, створений мікрохвильовим опроміненням із частотою 70 ГГц

Проста матриця із частотою 70 ГГц вимагає близько 70 000 переходів для одержання напруги 10 В, що в 5 раз більше, ніж стандартна матриця SIS. Це свідчить про те, що технології виробництва матриць сильно загасаючих переходів мають бути на значно вищому рівні. Якщо з ряду причин потрібно використовувати більш низьку частоту (близько 20 ГГц), число переходів навіть збільшується пропорційно зменшенню частоти опромінення.

Є й інші проблеми при використанні простої матриці. Тому було запропоновано використовувати більш складну матрицю, що складається з послідовності бінарних сегментів з $2^0, 2^1, \dots, 2^p, \dots$ переходами, кожний із яких запускається окремим джерелом струму. При роботі з наборами сегментів можна вибрати будь-яку бажану вихідну напругу: $V = 0, \pm \Phi_0 f, \dots, \pm \Phi_0 n f$. Програмоване перемикання на встановлення певної комбінації джерел струму на I_{bias} дозволяє швидко вибрати стабільні напруги постійного струму. Після відповідного програмування система дозволяє синтезувати довільні напруги змінного струму (рис. 22).

Для конструювання програмованих еталонів напруги було запропоновано використовувати послідовні матриці сильно загасаючих контактів із відповідними НВЧ-колами. У цьому випадку кожний окремий контакт вкладає цілком певне число постійних сходинок напруги в сумарну зразкову напругу. На цей час використовуються перепади $\pm U_1$ відносно нульової напруги. У результаті вихідна напруга є однозначною і система автоматично повертається до встановленої зразкової напруги у випадку втрати фазової синхронізації на короткий час. Було запропоновано два різновиди схем: в одному матрицю розділено на двійкові секції, що дозволяє формувати зразкову напругу $N U_1$ комбінацією двійкових секцій таким чином, що N контактів роблять внесок у зразкову напругу; у другому різновиді використовується високочастотний імпульсний сигнал із сигма-дельта-модуляцією, що дозволяє регулювати зразкову напругу зміною частоти повторення імпульсів у широкому діапазоні. При цьому поділ на двійкові секції не використовується.

Суть конструкції двійкової (бінарної) матриці полягає в тому, що вона поділяється на ряд двійко-

вих секцій, що дозволяє встановлювати необхідну напругу певною комбінацією цих секцій (рис. 23).

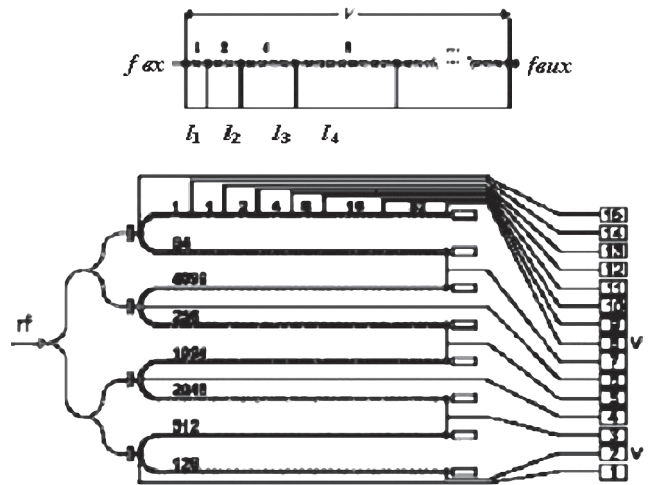


Рис. 23. Двійкова (бінарна) матриця

Розділені на дві секції SNS-матриці з 32768 контактами типу Nb-PdAu-Nb успішно працюють при частоті опромінення 16 ГГц і генерують зразкові напруги 1 В. Невелике значення $I_c R_n$ (від 10 до 40 мкВ) прийнятне для еталонів напруги з відносно низькими частотами збурення й максимальними вихідними напругами не більше 1 В. Ведеться робота зі збільшення $I_c R_n$ до значень, які б дозволили працювати із частотами порядку 70 ГГц і тим самим зменшити число контактів для одержання заданої максимальної вихідної напруги.

Більші значення $I_c R_n$ були отримані в послідовних матрицях з Nb-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Nb SINIS-контактами. Це дозволяє працювати із SINIS-матрицями в широкому частотному діапазоні: від 10 до 100 ГГц.

Описані двійкові матриці забезпечують мінімальний час перемикання між різними зразковими напругами порядку 1 мкс. Це робить їх ідеальними для застосування в програмованих квантових вольтметрах постійного струму. Однак у ті моменти часу, коли секції матриці перемикаються від сходинки напруги до нульової напруги, невизначені стани на-

пруги переходів між сходами напруги вносять свою похибку у зразкову напругу. Це ускладнює досягнення точності, необхідної для синтезу напруг змінного струму. Для цього виду синтезатора довільної форми хвилі добре підходять матриці SNS, тому що їхні оптимальні робочі частоти знаходяться у діапазоні до 30 ГГц, що є граничною частотою серійних генераторів імпульсних послідовностей.

Роботи з удосконалення конструкції матриць і технологій їх виготовлення в РТВ і NIST продовжуються, що може принести нові цікаві можливості.

Список літератури

1. *Purcell, Torrey, Paund* // Phys. Rev. Mod. Phys. – 1946. – V. 18. – P. 323.
2. *Bloch, Hansen, Packard* // Phys. Rev. – 1946. – V. 69 – P. 127.
3. *Lampard D.G.* // Proc. IEEE Monograph 216M. – 1957. – 271. – 104 с.
4. *Thompson A.M.* A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance / A.M. Thompson, D.G. Lampard // Nature. – 1956. – V. 177, № 4515. – P. 888.
5. *Josephson B.* // Phys. Lett. – 1962. – V. 1. – P. 251.
6. Квантовая метрология и фундаментальные константы: сб. статей; пер. с англ. – М: Мир, 1981. – 368 с.
7. *Кононогов С.А.* Метрологические основы электрических измерений / С.А. Кононогов, И.Я. Краснополин, С.Г. Семенчинский // Метрология. – 2006. – № 5.
8. *Klitzing K.* New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance / K. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V. 45, № 6. – P. 494–497.
9. *Тейлор Б.* Фундаментальные константы и квантовая электродинамика / Б. Тейлор, В. Паркер, Д. Лангенберг. – М.: Атомиздат, 1972.
10. *Popel R.* The Josephson Effect and Voltage Standards / R. Popel // Metrologia. – 1992. – V. 29. – P. 153–174.
11. Новий державний еталон одиниці електрорушійної сили і сталої напруги / В.В. Анікін, Ю.Ф. Павленко, О.І. Колбасін [та ін.] // Український метрологічний журнал. – 2007. – № 2. – С. 21–26; 2007. – № 3. – С. 8–12; 2007. – № 4. – С. 11–14.
12. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля: предлагаемый подход к применению Рекомендации 1 МКМВ (С1-2005) / Я.М. Миллс, П.Дж. Мор, Т.Дж. Квинн [и др.] // Метрология. – 2007. – № 2. – С. 5–57.
13. *Катков А.С.* Государственный первичный эталон единицы силы постоянного тока / А.С. Катков, И.В. Короткова, О.М. Павлов // Измерительная техника. – 1995. – № 1. – С. 3–4.
14. The NIST project for the electronic realization of the kilogram/R.L. Steiner, D.B. Newell, E.R. Williams

- [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2005. – Vol. 54, № 2. – P. 846–849.
15. Reconciling Planck constant determinations via watt balance and enriched-silicon measurements at NRC Canada / A.G. Steele, J. Meija, C.A. Sanchez [et al.] // Metrologia. – 2012. – Vol. 49, № 1. – P. L8–L10.
16. An electronic measurement of the Boltzmann constant / S.P. Benz, A. Pollarolo, J. Qu [et al.] // Metrologia. – 2011. – 48. – P. 142–153.
17. *Ларкин С.Ю.* Измерение частоты монохроматического СВЧ поля на основе нестационарного эффекта Джозефсона / С.Ю. Ларкин – К.: Наукова думка, 1999.
18. Josephson arrays for modern DC and AC metrology / J. Niemeyer, F. Muller, O. Kieler [et al.] // Метрологія та вимірювальна техніка: VI Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія – 2008”, 14–16 жовтня 2008 р., м. Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2008. – С. 16–21.
19. Present status of ac Josephson voltage metrology at РТВ / J. Niemeyer, O. Kieler, F. Müller [et al.] [Електронний ресурс] // Метрологія та вимірювальна техніка: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія – 2012”, 9–11 жовтня 2012 р., м. Харків: наук. праці. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2012. – С. 12–15. – 1 CD-ROM.
20. Розроблення технологій із застосуванням високоінтегрованих мікроструктур з реалізації квантового ефекту Джозефсона: наук.-техн. звіт ННЦ “Інститут метрології”; кер. Ю.Ф. Павленко. – Харків, 2010.
21. *Hamilton C.A.* Josephson D/A converter with fundamental accuracy / C.A. Hamilton, C.J. Burroughs, R.L. Kautz // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1995, 44 223-5.
22. *Mueller F., Behr R., Palafox L.* [et al.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2007. – P. 649-652.
23. 1 V and 10 V SNS Programmable Voltage Standards for 70 GHz / F. Mueller, R. Behr, T. Weimann [et al.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2009. – 19. – P. 981–986.
24. *Benz S.P.* A pulse-driven programmable Josephson voltage standard / S.P. Benz, C.A. Hamilton // Appl. Phys. Lett. – 1996. – 68. – P. 3171–3173.
25. *Kieler O.F., Kohlmann J., Mueller F.* // Supercond. Sci. Technol. – 2007. – 9. – P. 318–322.
26. The Josephson two-terminal-pair impedance bridge / J. Schurr, J. Nissilä, L. Palafox, R. Behr // Metrologia. – 2010. – 47. – P. 453–459.
27. kret. com/ru/news/3742/.
28. *Ю. Нимейер.* Матрицы Джозефсона для динамических измерений напряжения / Ю. Нимейер // Український метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 1. – С. 5–11.