



УДК 621.372.855

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СТВОРЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВІРКИ КОАКСІАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

О.М. Дзябенко, головний метролог Публічного акціонерного товариства "ФЕД", м. Харків
О.О. Дзябенко, студентка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"
О.П. Нарєжній, старший науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків



О.М. Дзябенко О.О. Дзябенко О.П. Нарєжній

Проведено аналіз методів повірки коаксіальних навантажень. Запропоновано структурну схему вимірювальної установки для повірки коаксіальних навантажень типу 1А і 1Б.

The analysis of the methods of calibration of coaxial loads is carried out. The structural scheme of the measuring units for calibration of coaxial loads type 1A and 1B is proposed.

Мета статті – провести аналіз і вибрати оптимальні методи повірки коаксіальних навантажень із використанням існуючих та перспективних засобів вимірювальної техніки для застосування їх у

вимірювальній установці для повірки коаксіальних навантажень типу 1А і 1Б.

Навантаження типів 1А і 1Б, зовнішній вигляд яких наведено на рис. 1, відносяться до навантажень із фіксованою фазою, причому 1А – узгоджені, 1Б – розузгоджені.

За допомогою коаксіальних навантажень типів 1А, 1Б здійснюється повірка (калібрування) цілої низки засобів вимірювальної техніки: вимірювачів коефіцієнта стоячої хвилі напруги (КСХН) панорамних, вимірювачів комплексних коефіцієнтів передачі та інших засобів вимірювальної техніки, для повірки яких необхідні еталонні коаксіальні навантаження. Такі засоби вимірювальної техніки, у свою чергу, використовуються для визначення параметрів приладів та трактів надвисоких частот радіотехнічних систем. У зв'язку з цим удосконалення методів повірки коаксіальних навантажень є актуальним науково-технічним завданням.

Повірка коаксіальних навантажень полягає у перевірці елементів приєднання коаксіальних навантажень, визначенні опору постійного струму та модуля КСХН ($K_{стУ}$), а навантажень типу 1Б – і фази (φ_{κ}) їх коефіцієнта відбиття, які визначаються методом порівняння з еталонними навантаженнями або опосередкованими методами.



Рис. 1. Коаксіальні навантаження

В Україні немає можливості перевірки еталонних навантажень через відсутність відповідних еталонів, тому найбільш перспективними є опосередковані методи. У цьому випадку $K_{\text{стУ}}$ і $\varphi_{\text{к}}$ знаходяться розрахунковим шляхом за результатами спостереження й визначення параметрів надвисокочастотних (НВЧ) хвиль у трактах із навантаженнями, що перевіряються.

Проведений аналіз показав, що для перевірки коаксіальних навантажень в основному застосовуються три методи:

- із застосуванням рефлектометрів та використанням спрямованих відгалужувачів;
- із застосуванням вимірювальних ліній та визначення параметрів поля у вимірювальній лінії, на виході якої включено навантаження, що перевіряється;
- із використанням автоматичних аналізаторів кіл (ААК).

Проведемо аналіз наведених методів перевірки коаксіальних навантажень.

Метод із застосуванням рефлектометра та використанням спрямованих відгалужувачів

У провідних національних метрологічних лабораторіях [1] для визначення $K_{\text{стУ}}$ коаксіальних навантажень на частотах понад 250 МГц зазвичай використовуються рефлектометри з коаксіальними спрямованими відгалужувачами або резисторні мости Уйтстона з коаксіальними прецизійними з'єднувачами. На точність вимірювань $K_{\text{стУ}}$ впливає витік потужності НВЧ із каналу генератора у вихідний канал діагоналі. Другим джерелом похибки є відмінний від нуля коефіцієнт відбиття у бік приладу від площини вимірювання. Для вимірювання малих $K_{\text{стУ}}$ рефлектометр підключається до чутливої установки для вимірювання послаблення. У коаксіальних рефлектометрах необхідну для настроювання зміну фази забезпечує набір прецизійних відрізків лінії, укомплектованих еталонними навантаженнями.

Для малих значень $K_{\text{стУ}}$ відносна похибка становить $3 \cdot 10^{-4}$. За допомогою компаратора фази, що реєструє різницю фаз сигналів у каналі генератора та бічному плечі, можна вимірювати і $\varphi_{\text{к}}$.

Прецизійні рефлектометри, які вимагають ретельного й тривалого настроювання, складні та дорогі, крім того, як індикатор необхідно застосувати супергетеродинний приймач, що ще більш ускладнює установку [2].

Метод із застосуванням вимірювальних ліній

Вимірювання параметрів коаксіальних навантажень за допомогою вимірювальних ліній зводиться до порівняння імпедансу навантаження із хвильовим опором тракту вимірювальної лінії, що є еталонним опором [3, 4]. Це порівняння ґрунтується на дослідженні картини розподілу поля хвилі усередині тракту вимірювальної лінії за допомогою зонда, що вводиться у поле лінії через щілину в лінії. Переміщення зонда уздовж щілини дозволяє визначити

розподіл поля хвилі в лінії. За цими даними обчислюються параметри навантажень, що підключені до вимірювальної лінії. Вимірювальні лінії з подовженою щілиною забезпечують найбільшу точність вимірювання КСХН та повного опору, найбільш універсальні з усіх простих і розповсюджених вимірювальних приладів [1].

Похибку вимірювання через відбиття від НВЧ-генератора зменшують ретельним узгодженням або внесенням у тракт із боку генератора мало відбиваючого спрямованого розв'язуючого атенюатора. Вплив механічної нерегулярності, вигинів, змін поперечних перетинів коаксіальних провідників хвилеводу, а також похибки через "паразитні" відбиття від діелектричних тримачів та кінця щілини можуть бути мінімізовані при калібруванні за допомогою включення у тракт прецизійних навантажень.

Метод із використанням автоматичних аналізаторів кіл

З появою керованих НВЧ-генераторів з електронним перестроюванням частоти стало можливим створення вимірювальних систем, що забезпечують полярну індикацію модуля коефіцієнта відбиття $|\Gamma|$ і фазового кута коефіцієнта відбиття, а також спостереження частотної залежності коефіцієнтів передачі 4-полюсників [1, 5].

У більшості так званих аналізаторів кіл сигнал або відбивається, або (при зміні положення НВЧ-перемикачів) проходить через досліджуваний прилад та порівнюється за модулем і фазою із опорним сигналом за допомогою двоканальної супергетеродинної приймальної системи або системи з модульованою підносійною.

Для мінімізації похибки неузгодженості й відліку та похибки через кінцеву спрямованість, які обмежують точність аналогових систем, було створено автоматичні комп'ютерні аналізатори НВЧ-кіл.

Такі ААК будуються на основі 12-полюсників. У 12-полюсних ААК, особливо в області високих частот, застосовується просте детектування потужності. У принципі, 12-полюсні рефлектометри являють собою лінійну пасивну НВЧ-схему підходящої конфігурації із шістьма плечима. До одного з пліч підключено генератор НВЧ, що забезпечує на фіксованих частотах досить чистий сигнал. Вихідне плече навантажене або на міру відбиття, або на досліджуваний прилад, тобто має невідомий коефіцієнт відбиття. Інші чотири плеча підключено до широкосмугових вимірювачів потужності. Комплексний коефіцієнт відбиття визначається як відношення лінійних комбінацій цих потужностей з одинадцятьма дійсними параметрами 12-полюсника, що залежать від частоти і визначаються при градуванні вимірювальної установки. Існує низка методів градування із використанням набору навантажень або з частково відомими значеннями повного опору.

Систематична похибка вимірювання $|\Gamma|$ із використанням ААК становить $4 \cdot 10^{-4}$, а випадкова похибка, включаючи похибку за рахунок відхилення параметрів коаксіальних з'єднувачів від екземпляра до екземпляра, $-1,5 \cdot 10^{-4}$. Значення похибки при вимірюванні фазового кута Γ не більше $0,02(1+|\Gamma|)/|\Gamma|$ [6].

Відтворення одиниці хвильового опору на рівні державних спеціальних еталонів і повірочних установок вищої точності (ПУВТ) реалізується комплектами мір прохідного типу, а на рівні робочих еталонів та зразкових повірочних установок – комплектами мір хвильового опору кінцевого або прохідного типу, у залежності від алгоритму передавання розміру одиниці.

Робочі еталони другого розряду повіряються методом прямих вимірювань і звіренням за допомогою компаратора з робочими еталонами першого розряду, в якості яких використовуються:

- установки для повірки мір КСХН і повного опору;
- міри КСХН і повного опору;
- міри хвильового опору.

Атестація зразкових повірочних установок за допомогою комплектів мір порівняння, що входять до складу робочих еталонів та ПУВТ, проводиться шляхом звірення результатів вимірювання параметрів мір на зразковій установці і вихідних робочих еталонах. Іноді показники точності повірочних установок установлюються поелементним методом шляхом вимірювання окремих параметрів за допомогою мір хвильового опору й розрахунку сумарної похибки. Правильність розрахунків підтверджується експериментально шляхом звірення з вихідними робочими еталонами.

Повірка коаксіальних навантажень 2-го розряду здійснюється за допомогою комплектів мір КСХН і повного опору 1-го розряду, для яких похибка атестації повинна бути не більше 1...2 % за КСХН і 1...2° за фазою коефіцієнта відбиття.

Згідно з ГОСТ 8.365–79 “Загрузки коаксиальные. Методы и средства поверки”, повірка коаксіальних навантажень 2-го розряду може здійснюватися за допомогою вимірювальної лінії 1-го класу або більш низького класу, якщо їхні метрологічні характеристики задовольняють необхідну точність повірки.

Із проведеного аналізу випливає, що існує кілька методів вимірювання КСХН, модуля та фази коефіцієнта відбиття навантажень. Порівняльний аналіз цих методів показав, що в Україні відсутні еталонні вимірювальні установки для повірки коаксіальних навантажень типу 1А і 1Б у діапазоні частот 1...7,5 ГГц, що унеможливує проведення атестації еталонних навантажень по 1-му розряду, а також проведення калібрування рефлектометрів і ААК. Тому наразі найбільш прийнятним є створення вимірювальної установки для повірки коаксіальних навантажень типу 1А і 1Б, у якій як вихідний еталон будуть застосовані спеціально підібрані або дороблені вимірювальні лінії, метрологічні параметри яких близькі до параметрів ліній 1-го класу. Такі вимірювальні лінії можуть бути атестовані існуючими засобами вимірювань, а сама установка може бути покладена в основу метрологічної схеми передавання розміру одиниці повного опору в коаксіальних хвилеводах до створення в Україні відповідних державних еталонів.

Вимірювальна установка для повірки коаксіальних навантажень типу 1А і 1Б, що пропонується до створення, повинна забезпечувати похибку повірки (калібрування):

- навантажень типу 1А – за КСХН не більш ніж 1,5 % у діапазонах частот 1,0...5,0 ГГц (перетин тракту 16,00/6,95 мм), 1,0...3,0 ГГц (перетин тракту 16,00/4,60 мм), 1,0...7,50 ГГц (перетин тракту 7,00/3,04 мм);

- навантажень типу 1Б – за КСХН не більш ніж 2,0 % і за фазою коефіцієнта відбиття не більш ніж 3,0° у тих же діапазонах частот.

Структурну схему вимірювальної установки для повірки коаксіальних навантажень типу 1А і 1Б, що пропонується до створення, наведено на рис. 2.

Як джерело НВЧ-сигналу, каліброваного за частотою та рівнем потужності, до використання пропонуються генератори сигналів високочастотні Г4–76А, Г4–78, –79, –80, –81, –82 (або РГЧ –03, –04, –05, –06, –07) у діапазоні частот 0,4...7,5 ГГц.

Як однонаправлену розв'язку елементів коаксіального тракту при проведенні повірки, а також для

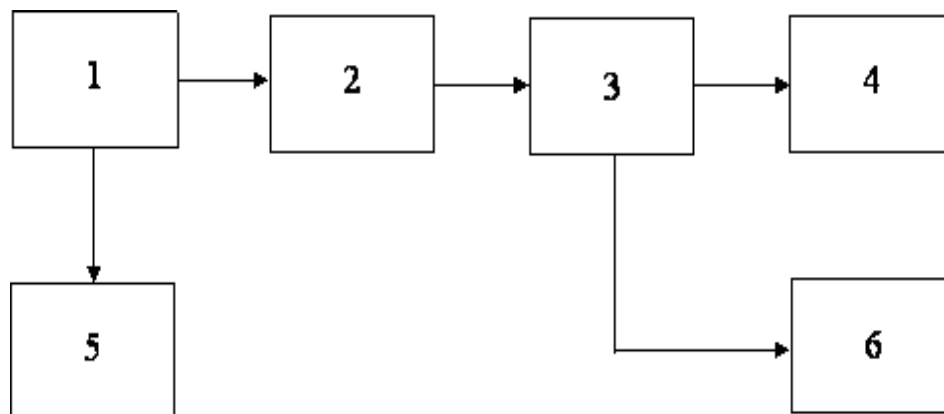


Рис. 2. Структурна схема вимірювальної установки: 1 – генератор сигналів; 2 – вентиль; 3 – вимірювальна лінія; 4 – навантаження, що повіряється; 5 – частотомір; 6 – вимірювальний прилад

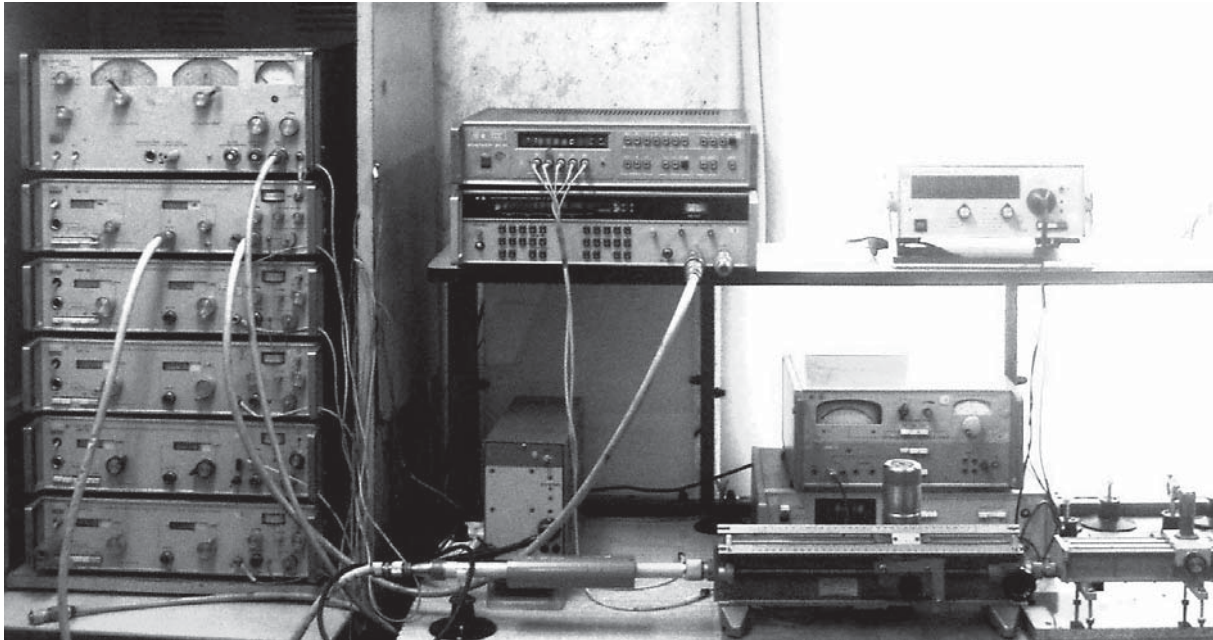


Рис. 3. Загальний вигляд вимірювальної установки

поліпшення якості узгодження вимірювальної апаратури використано вентилі коаксіальні Э6–28, –29, –30, –32, –33, –34, –35 у діапазоні частот 0,9...7,5 ГГц.

Для напівавтоматичного вимірювання середнього значення частоти використано частотомір електронно-лічильний ЧЗ–66.

Як вимірювальний прилад застосовано вимірювач відношення напруги В8–7 із чутливістю 0,7...1,0 мкВ.

Як вихідний еталон використовуються спеціально атестовані вимірювальні лінії з перетином 16/6,95; 16/4,58 та 7/3,04 мм, які випускаються серійно і, за необхідності, дороблені для підвищення їхніх метрологічних характеристик, та комплекти навантаження до них.

Технічні характеристики вимірювальної установки (рис. 3):

| | |
|--|--|
| Діапазон значень КСХН | від 1,05 до 3,0 |
| Діапазон значень фази коефіцієнта відбиття (φ) | від 0 до 360° |
| Границі допустимої основної похибки вимірювання КСХН (δ_k) вимірювальними лініями у залежності від значень частоти і перетину | від $1 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ |
| Границі допустимої основної похибки вимірювання ($\Delta\varphi$) вимірювальними лініями зі складу установки у залежності від значень частоти і перетину | від 1 до 3° |

Автоматизація цієї установки із застосуванням персональної електронної обчислювальної машини дозволить зменшити випадкові похибки, впровадити методики й алгоритми вимірювань, які дозволять зменшити систематичні похибки та похибки неузгодженості, збільшити швидкість виконання вимірювань і, отже, створити умови для оперативного контролю стабільності метрологічних характеристик

як вимірювальної установки, так і коаксіальних навантажень, що на ній перевіряються [7].

Надалі в цій установці можуть бути використані багатозондові вимірювальні лінії, що мають більш високу точність, простоту конструкції і широку можливість використання математичних методів обробки вимірювальної інформації. Це дозволить створити на їхній основі високоефективні автоматичні вимірювачі параметрів НВЧ-кіл.

Список літератури

1. Юркис А.П. Национальные эталоны и аппаратура высшей точности для измерения импеданса и коэффициента отражения / А.П. Юркис, У. Штумпер // ТИИЭР. — 1986. — Т. 74, № 1. — С. 45–52.
2. Каменецкий М.И. Рабочие эталоны единицы волнового сопротивления в коаксиальных волноводах 16/6,95 и 7/3,04 мм / М.И. Каменецкий, Э.М. Гутина, Ю.В. Кондаков // Измерительная техника. — 1981. — № 2. — С. 56–58.
3. Стариков В.Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий / В.Д. Стариков. — М.: Сов. радио, 1972. — 145 с.
4. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах: справочное руководство / Ф. Тишер. — М.: Физматиздат, 1963. — С. 368.
5. Косаковский И.Т. Десятиполюсные измерители комплексных параметров СВЧ-цепей / И.Т. Косаковский // Измерительная техника. — 1991. — № 6. — С. 47–49.
6. Адам С. Автоматическое измерение в СВЧ-цепях / С. Адам // ТИИЭР. — 1978. — Т. 65, № 4. — С. 20–28.
7. Штейн Э.М. Система автоматизации измерительной линии с использованием ЭВМ / Э.М. Штейн // Измерительная техника. — 1981. — № 5. — С. 47–49.