

К.Л. Шевченко, к.т.н., доц.
Київський національний університет технологій та дизайну

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА СТОЯЧОЇ ХВИЛІ НВЧ СИГНАЛІВ

Розглянута структурна схема НВЧ-вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі та алгоритм його роботи, які забезпечують підвищеної точності вимірювання, що дозволяє використовувати прилад для оцінки вологості матеріалів і речовин, концентрації рідинних розчинів, стану біологічних об'єктів.

Вступ

Зміна діелектричних властивостей матеріалів і середовищ в НВЧ діапазоні тісно пов'язана з кількістю води, що в них міститься. Застосування апаратури, яка реєструє зміни відбитого від середовища чи матеріалу НВЧ сигналу, дозволяє безконтактно одержувати різноманітну інформацію про стан об'єкта, який контролюється. За значеннями коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) можна одержувати інформацію про вологість матеріалу, концентрацію технологічних розчинів. У деяких випадках, базуючись на інформації про значення КСХ, може здійснюватись оцінка стану біологічних об'єктів та діагностика деяких внутрішніх захворювань людини [1].

Коефіцієнт стоячої хвилі K_x визначається відношенням максимального значення напруги (або струму) до мінімального значення напруги (або струму) вздовж однорідної лінії:

$$K_x = U_{\max} / U_{\min} = I_{\max} / I_{\min}.$$

В залежності від відгалужувальної спроможності об'єкта величина K_x змінюється від 1 до ∞ . Повному відбиванню від об'єкта сигналу НВЧ відповідає нескінченно великій K_x .

Традиційно [2] оцінку малих і середніх значень коефіцієнта стоячої хвилі ($K_x < 10$) проводять шляхом безпосереднього виміру індикатором мінімальної та максимальної напруг при переміщенні каретки із зондом вздовж вимірювальної лінії. При квадратичному детекторі

$$K_x = \sqrt{U_{\max} / U_{\min}}.$$

При вимірі $K_x > 3$ мінімальні значення сигналу, що вимірюється, стають занадто малими у порівнянні з максимальним, і похибка вимірів зростає. При $K_x > 10$ похибки виміру стають неприпустимо великими (більше 15–20 %).

У деяких випадках для визначення коефіцієнта стоячої хвилі використовують двоканальні схеми [3], в яких безпосередньо вимірюється коефіцієнт відбивання з співвідношення:

$$\Gamma = \sqrt{P_0 / P_n},$$

де P_0 – потужність відбитої хвилі; P_n – потужність хвилі, що падає.

Коефіцієнт стоячої хвилі визначається побічно за формулою:

$$K_x = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \frac{1+\sqrt{P_0/P_n}}{1-\sqrt{P_0/P_n}}.$$

Шкала вольтметра, проградуїрована в одиницях K_x у відповідності до розрахункової формули, має нерівномірний характер: вона стиснута в області великих значень K_x . Це є однією з причин збільшення похибки виміру при $K_x > 3$. Крім того, похибка виміру різко збільшується при великих значеннях ($K_x > 10$), бо знаменник розрахункової формули прагне до нуля, і невеликі похибки в значеннях коефіцієнта відбивання Γ призводять до великих похибок виміру K_x .

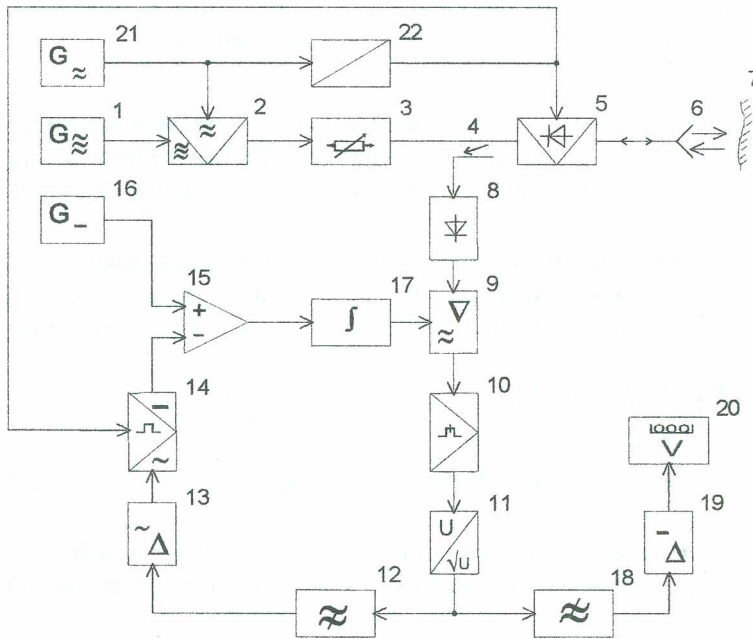
Суттєвим джерелом похибок є неминуча нестабільність і неідентичність каналів відбитих хвиль і хвиль, що падають. Це зумовлено передусім нерівністю коефіцієнтів передачі направлених відгалужувачів хвиль, що падають, і відбитих хвиль, відмінністю в чутливості НВЧ детекторів, згладжуючих фільтрів, підсилювачів та інших елементів двоканального вимірювача відношення напруг, що порівнюються. При вимірі K_x по напрузі (КСХН)

необхідно введення двох кореневилучаючих перетворювачів, які мають, як правило, низькі метрологічні характеристики. Все це зумовлює низьку точність виміру коефіцієнта стоячої хвилі.

Основна частина

Для усунення похибок, які перелічені вище, пропонується пристрій для виміру коефіцієнта стоячої хвилі [4], в якому забезпечено підвищення точності виміру коефіцієнта стоячої хвилі в області великих значень.

На кресленні наведена функціональна схема запропонованого пристрою для виміру коефіцієнта стоячої хвилі.



Пристрій містить НВЧ генератор 1, до виходу якого підключені послідовно з'єднані амплітудний модулятор 2, НВЧ атенюатор 3, направлений відгалужувач 4 відбитої хвилі, НВЧ ключ 5 і антена 6, що опромінює об'єкт 7. До виходу направленного відгалужувача 4 підключені послідовно з'єднані НВЧ детектор 8, вибірково регульований підсилювач 9, амплітудний детектор 10 і кореневилучаючий перетворювач 11. До виходу кореневилучаючого перетворювача підключені послідовно з'єднані фільтр 12 верхніх частот, підсилювач 13 змінної напруги і фазочутливий випрямляч 14, вихід якого з'єднаний з одним входом диференціального підсилювача 15, інший вхід якого з'єднаний з виходом джерела 16 стабілізованої опорної напруги. До виходу диференціального підсилювача підключений вхід інтегратора 17, вихід якого з'єднаний з керуючим входом вибірково регульованого підсилювача 9. До виходу кореневилучаючого перетворювача 11 також підключені послідовно з'єднані фільтр 18 нижніх частот, підсилювач 19 постійної напруги і цифровий вольтметр 20. Низькочастотний генератор 21 з'єднаний з керуючим входом амплітудного модулятора 2 і з входом дільника частоти 22, вихід якого з'єднаний з керуючими входами НВЧ ключа і синхронного детектора.

Пристрій для виміру коефіцієнта стоячої хвилі працює таким чином.

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

В закритому стані НВЧ ключ 5 працює за принципом відбивання НВЧ сигналу. Коли ключ відкритий, модульований НВЧ сигнал від НВЧ атенюатора 3 надходить в антену 6 і випромінюється в напрямленні досліджуваного об'єкта 7. Відбитий від об'єкта модульований

сигнал знов надходить на антену 6 і через відкритий НВЧ ключ 5 влучає на вхід направленою відгалужувача 4 відбитої хвилі. Відгалужений модульований НВЧ сигнал детектується НВЧ детектором 8, в результаті чого на його виході виділяється напруга низькочастотної огибаючої. Амплітуда напруги огибаючої U_1 при квадратичній характеристиці НВЧ детектора визначається виразом:

$$U_1 = k_1 k_2 S_1 m^2 \Gamma^2 P_0, \quad (1)$$

де k_1 – коефіцієнт передачі атенюатора 3; k_2 – коефіцієнт передачі направленою відгалужувача 4; S_1 – чутливість НВЧ детектора 8; Γ – коефіцієнт відбивання об'єкта 7; P_0 – потужність НВЧ генератора 1.

Коли НВЧ ключ 5 закривається, модульований НВЧ сигнал з виходу атенюатора 3 повністю від нього відбивається і влучає також на вхід направленою відгалужувача 4. Амплітуда напруги огибаючої U_2 при цьому буде мати вигляд:

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

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

Пакети напруг огибаючої посилюються вибіркоким підсилювачем 9 низької частоти, що настроений на частоту генератора 21. Посилена напруга знов детектується по амплітуді детектором 10. На виході амплітудного детектора 10 формуються відеоімпульси з амплітудами:

$$U_3 = k_1 k_2 S_1 k_3 S_2 m^2 \Gamma^2 P_0, \quad (3)$$

$$U_4 = k_1 k_2 S_1 k_3 S_2 m^2 P_0, \quad (4)$$

де k_3 – регульований коефіцієнт підсилення підсилювача 9; S_2 – чутливість амплітудного детектора 10.

Послідовність відеоімпульсів функціонально перетворюється в кореневилучаючому перетворювачі 11, в результаті чого амплітуди відеоімпульсів приймають значення:

$$U_5 = S_0 m \Gamma \sqrt{P_0}, \quad (5)$$

$$U_6 = S_0 m \sqrt{P_0}, \quad (6)$$

де $S_0 = \sqrt{k_1 k_2 S_1 k_3 S_2 S_3}$ – результуюча крутість перетворення одноканального тракту; S_3 – чутливість кореневилучаючого перетворювача 11.

З послідовності відеоімпульсів з амплітудами U_5 і U_6 фільтром 12 верхніх частот виділяється змінна складова напруги з частотою комутації та амплітудою:

$$U_7 = k_4 \frac{U_6 - U_5}{2} = 0,5 k_4 S_0 m (1 - \Gamma) \sqrt{P_0}, \quad (7)$$

де k_4 – коефіцієнт передачі фільтра 12.

Виділена фільтром напруга посилюється підсилювачем 13 змінної напруги і випрямляється синхронним детектором 14, що, як і НВЧ ключ, управляється вихідною напругою дільника частоти 22. Випрямлена напруга приймає вигляд:

$$U_8 = k_5 k_6 U_7, \quad (8)$$

де k_5 – коефіцієнт підсилення підсилювача 13; k_6 – коефіцієнт передачі синхронного детектора 14.

Напруга U_8 прямує на один вхід диференціального підсилювача 15, на інший вхід якого прямує опорна напруга $U_0 = \text{const}$ зі стабілізованого джерела напруги 16. Різницєва напруга з виходу диференціального підсилювача заряджає інтегратор 17, вихідна напруга якого прямує на керуючий вхід регульованого вибіркового підсилювача 9. Направлення регулювання коефіцієнта підсилення k_3 вибране таким, щоб різниця вхідних напруг диференціального підсилювача 15 прагнула до нуля.

При досягненні рівності вхідних напруг диференціального підсилювача маємо:

$$k_5 k_6 U_7 = U_0, \quad (9)$$

або з урахуванням виразу (7) одержуємо:

$$U_0 = 0,5k_4k_5k_6S_0m(1-\Gamma)\sqrt{P_0}. \quad (10)$$

Результуючу крутість перетворення одноканального тракту S_0 уявимо у вигляді:

$$S_0 = \sqrt{k_3}S'_0, \quad (11)$$

де $S'_0 = \sqrt{k_1k_2S_1S_2S_3}$ – постійна нерегульована частина крутості перетворення.

Підставляючи значення S_0 з виразу (11) в (10) і вирішуючи отримане рівняння відносно коефіцієнта підсилення k_3 регульованого підсилювача, одержуємо:

$$k_3 = \left(\frac{2U_0}{k_4k_5k_6S'_0m(1-\Gamma)\sqrt{P_0}} \right)^2. \quad (12)$$

Таким чином, коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 9 автоматично приймає значення (12).

З послідовності відеоімпульсів з амплітудами U_5 і U_6 фільтром 18 нижніх частот виділяється також постійна складова напруги:

$$U_9 = k_7 \frac{U_5 + U_6}{2}, \quad (13)$$

де k_7 – коефіцієнт передачі фільтра 18 нижніх частот.

Постійна напруга U_9 посилюється підсилювачем 19 постійної напруги і вимірюється вольтметром 20.

Напруга, що вимірюється,

$$U_{10} = 0,5k_7k_8\sqrt{k_3}S'_0m(1+\Gamma)\sqrt{P_0} \quad (14)$$

з урахуванням значення коефіцієнта підсилення k_3 із співвідношення (12) приймає вигляд:

$$U_{10} = \frac{k_7k_8}{k_4k_5k_6} \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} U_0. \quad (15)$$

Коефіцієнт передачі фільтра 12 верхніх частот вибирають рівним коефіцієнту передачі фільтра 18 нижніх частот ($k_4 = k_7$), а коефіцієнт підсилення підсилювача 13 змінної напруги з урахуванням коефіцієнта передачі синхронного детектора 14 встановлюють рівним коефіцієнту підсилення підсилювача 19 постійної напруги ($k_5k_6 = k_8$). При виконанні цих умов напруга, що вимірюється вольтметром 20, дорівнює:

$$U_{10} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} U_0. \quad (16)$$

Оскільки опорна напруга $U_0 = \text{const}$, то напруга, що вимірюється, прямо пропорційна коефіцієнту стоячої хвилі:

$$U_{10} = K_x U_0. \quad (17)$$

Межі виміру K_x змінюються зміною опорної напруги U_0 . Завдяки автоматичному регулюванню коефіцієнта підсилення вибіркового підсилювача 9 на результат виміру не впливає нестабільність параметрів елементів, що входять в одноканальний тракт перетворення (k_2, S_1, k_3, S_2, S_3). Рівень опромінювання об'єкта 7 задається атенюатором 3, але непостійність його коефіцієнта передачі k_1 також не впливає на результат виміру. Не впливає також на результат виміру і непостійність потужності P_0 НВЧ генератора 1. Оскільки коефіцієнт K_x в розглянутому пристрої вимірюється безпосередньо, то точність виміру із зростанням його значення не знижується. Тому коефіцієнт стоячої хвилі доцільно використовувати для виміру великих розузгоджень з досліджуваним об'єктом ($K_x > 10$).

Висновки

У порівнянні з відомими приладами з двоканальною структурою одноканальний вимірювач K_x не вимагає підбору однакових елементів: направлених відгалужувачів, НВЧ детекторів, підсилювачів, кореневилучаючих перетворювачів та інших парних елементів з нестабільними характеристиками. Так, НВЧ детектори, навіть при цілком ідентичних конструкціях

детекторних секцій і однакових вольт-амперних характеристиках діодів по постійному струму в діапазоні НВЧ можуть сильно відрізнятись за своїм повним опором, а отже, і за чутливістю. Ще більш важко забезпечити ідентичність двох кореневилучаючих перетворювачів, що реалізуються, з допомогою нелінійних елементів.

Шкала вольтметра 20 проградуєвана у відповідності до формули:

$$k_x = \frac{\sqrt{P_n} + \sqrt{P_{OT}}}{\sqrt{P_n} - \sqrt{P_{OT}}}, \quad (18)$$

де P_{OT} – потужність відбитої хвилі.

У відповідності до виразу (17) шкала вимірювача K_x лінійна і рівномірна на відміну від нерівномірних шкал розглянутих раніше вимірювачів. Дослідження показали, що похибка одноканальних вимірювачів K_x не перевищує $\pm 0,5\%$ в діапазоні значень 3–50 на частотах 0.5–30 ГГц.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Хитров Ю.А., Шестиперов В.А. СВЧ в медицине. Обзор по электронной технике. Сер. I. Электроника СВЧ. – 1983. – Вып. 16 (998). – С. 40–49.
2. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, Р.А. Боргов, В.М. Коневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 219–221.
3. Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн / Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1980. – С. 99–102.
4. Патент № 52668 (Україна). Пристрій для вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Іващенко В.О. – Бюл. № 1 від 15.01.2003.

ШЕВЧЕНКО Костянтин Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

- автоматизація та комп'ютерна обробка сигналів;
- радіометрія та вимірювання слабких сигналів.

Тел.: (044) 256-29-93.

Подано 18.05.04