

Винахід має відношення до техніки вимірювання параметрів надвисокочастотних (НВЧ) радіохвиль і може бути використаний для вимірювання коефіцієнта відбиття НВЧ коливань в області релаксаційного поглинання радіохвиль у різноманітних матеріалах і середовищах.

В діапазоні НВЧ радіохвиль у вологих матеріалах спостерігається сильне поглинання електромагнітної енергії в області дисперсії комплексної провідності. Максимум поглинання має місце на частотах релаксації, коли частота зовнішнього поля співпадає з власною частотою диполей, які створені молекулами води. Коефіцієнт відбиття, який має мінімальне значення на частоті релаксації, збільшується в процесі сушіння матеріалів і виробів в НВЧ полі. Тому по коефіцієнту відбиття судять про остаточну вологість матеріалу, який висушується. Таким чином, коефіцієнт відбиття в смузі поглинання є важливим технологічним параметром, що дозволяє оптимізувати процес сушіння матеріалів і виробів в НВЧ печах і іншому надвисокочастотному технологічному електрообладнанні.

Відомий спосіб вимірювання коефіцієнта відбиття в смузі поглинання (див. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Пер. с нем. / Под ред. В.Н. Сретенского. - М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. С. 272 - 276.), який полягає в опромінюванні НВЧ коливаннями неоднорідного середовища, розподілі падаючих та відбитих НВЧ коливань, та вимірі відношення амплітуд падаючих та відбитих НВЧ коливань. Однак цей спосіб дає велику похибку вимірювання в смузі поглинання при нерівності частоти  $\omega$  опромінюючих НВЧ коливань і частоти релаксації  $\omega_p$  домішних молекул в опромінюємому середовищі. Остання залежить від температури середовища, значення вологості і форм зв'язку молекул води з матеріалом. Тому в процесі сушіння різниця частот  $\omega - \omega_p$  збільшується і похибка вимірювання різко зростає.

Відомий також спосіб вимірювання коефіцієнта відбиття в смузі поглинання (див. Чернушенко А.М., Майборода А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазона волн. / Под ред. А.М. Чернушенко - М.: Радио и связь, 1986, С. 191 - 196), який полягає в тому, що початкові НВЧ коливання модулюють по амплітуді низькочастотними коливаннями, частоту котрих вибирають рівній половині смуги поглинання, опромінюють модульованими НВЧ коливаннями неоднорідне середовище, розділяють падаючі та відбиті НВЧ коливання, у відбитих НВЧ коливаннях порівнюють амплітуди коливань нижньої і верхньої бокових частот, змінюють частоту початкових НВЧ коливань до отримання рівності амплітуд НВЧ коливань бокових частот і вимірюють відношення амплітуд падаючих та відбитих НВЧ коливань. Крім того, порівняння амплітуд коливань нижньої і верхньої бокових частот здійснюють шляхом їх частотної селекції, роздільного детектування і отримання різницевої напруги випрямлених напруг. Зміну частоти початкових НВЧ коливань здійснюють вручну до досягнення нульового значення різницевої напруги.

Відомий спосіб також не забезпечує точного вимірювання коефіцієнта відбиття. При частотній селекції НВЧ коливань бокових частот двома вузькосмуговими НВЧ фільтрами, роздільному детектуванні коливань двома НВЧ детекторами, формуванні різницевої напруги двоканальним пристроєм порівняння неминуче вносяться великі похибки при визначенні рівності амплітуд через неідентичність і нестабільність параметрів парних елементів. Внаслідок неточного суміщення частоти початкових НВЧ коливань з частотою мінімуму коефіцієнта відбиття вимір відношення амплітуд падаючих та відбитих НВЧ коливань здійснюється з великими похибками.

Відомий пристрій для вимірювання коефіцієнта відбиття в смузі поглинання (див. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Каневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова - М.: Энергоатомиздат, 1987, С. 226 - 229), який містить генератор НВЧ коливань, розв'язуючий атенуатор, спрямований НВЧ детектор падаючої хвилі, спрямований НВЧ детектор відбитої хвилі, блок вимірювання відношення амплітуд падаючої та відбитої напруг, підключений до виходів детекторів падаючої та відбитої хвиль, і індикатор, з'єднаний з виходом блоку вимірювання відношення амплітуд.

Через температурну і тимчасову нестабільність характеристик двох НВЧ направлених детекторів, частотну неідентичність парних елементів неможливо забезпечити високу точність вимірювання коефіцієнта відбиття у широкій смузі поглинання.

Відомий також пристрій для вимірювання коефіцієнта відбиття у смузі поглинання (див. Абубакиров Б.А., Гудков К.Т., Нечаев Э.В. Измерение параметров радиотехнических цепей. / Под ред. В.Г. Адрущенко, Б.П. Фатеева. - М.: Радио и связь, 1984, С. 129 - 133), який містить приймально-передавальну антену, два направлених відгалужувача на вході-виході антени, виходи котрих з'єднані з опорним і вимірювальним каналами, включаючими послідовно з'єднані балансний НВЧ змішувач, вибірний підсилювач різницевої частоти, амплітудний детектор і фільтр нижніх частот, блок вимірювання відношень постійних напруг, входи якого з'єднані з виходами фільтрів нижніх частот опорного і вимірювального каналів, індикатор, виходом з'єднаний з виходом блоку вимірювання відношення, подільник потужності, виходами з'єднаний з другими входами балансних НВЧ змішувачів, керований НВЧ генератор, і генератор низької частоти. Крім того, відомий пристрій містить гетеродин, що перестроюється по частоті, вихід якого з'єднаний із виходом подільника потужності. Приймально-передавальна антена підключена безпосередньо до виходу керованого НВЧ генератора, керуючий вхід котрого з'єднаний з виходом генератора низької частоти.

Керований по частоті НВЧ генератор забезпечує реєстрацію на осцилографічному індикаторі частотної залежності коефіцієнта відбиття в смузі поглинання. Проте, осцилографічна індикація коефіцієнта відбиття не забезпечує точного вимірювання його мінімального значення через пологий характер мінімуму. Крім того, безперервне качання частоти НВЧ коливань знижує ефективність сушіння в електромагнітному полі, бо найбільший ККД має місце при збігу частоти поля  $\omega$  з частотою релаксації  $\omega_p$  молекул води.

В основу винаходу покладена задача створення такого способу і пристрою вимірювання коефіцієнта відбиття в смузі поглинання, в яких введення нових операцій в спосіб і введення нових елементів в пристрій дозволили б здійснювати автоматичний вимір відношення мінімальної амплітуди відбитих НВЧ коливань до амплітуди падаючих НВЧ коливань і завдяки цьому підвищити точність вимірювання коефіцієнта відбиття в центрі смуги поглинання.

Поставлена задача вирішується тим, що в спосіб вимірювання коефіцієнта відбиття у смузі поглинання, який полягає в тому, що початкові НВЧ коливання модулюють по амплітуді низькочастотними коливаннями, частоту котрих вибирають рівній половині смуги поглинання, опромінюють модульованими НВЧ коливаннями неоднорідне середовище, розділяють падаючі та відбиті НВЧ коливання, у відбитих НВЧ коливаннях порівнюють амплітуди коливань нижньої і верхньої бокових частот, змінюють частоту початкових НВЧ коливань до отримання рівності амплітуд НВЧ коливань бокових частот і вимірюють відношення амплітуд падаючих та відбитих НВЧ коливань, згідно винаходу початкові НВЧ коливання попередньо розщеплюють по фазі на  $90^\circ$  і модулюють кожну із складових по амплітуді низькочастотними коливаннями, розщепленими по фазі також на  $90^\circ$ , далі складають і віднімають модульовані НВЧ коливання, опромінюють неоднорідне середовище сумарними НВЧ коливаннями, змішують падаючі і відбиті НВЧ коливання з різницевиими НВЧ коливаннями, після цього опромінюють неоднорідне середовище різницевиими НВЧ коливаннями, змішують падаючі і відбиті НВЧ коливання з сумарними НВЧ коливаннями, виділяють по чергово із змішаних падаючих і

відбитих НВЧ коливань низькочастотні сигнали з подвоєною частотою модуляції, з низькочастотного сигналу, одержуваного з відбитих НВЧ коливань, виділяють напругу огибаючої, а зміну частоти початкових НВЧ коливань проводять до зникнення напруги огибаючої.

Поставлена задача вирішується також тим, що у пристрої для вимірювання коефіцієнта відбиття в смузі поглинання, який містить приймально-передавальну антену, два спрямованих відгалужувача на вході-виході антени, виходи котрих з'єднані з опорним і вимірювальним каналами, включаючими послідовно з'єднані балансні НВЧ змішувач, вибірний підсилювач різницевої частоти, амплітудний детектор і фільтр нижніх частот, блок поділу амплітуд низькочастотних сигналів, входи якого з'єднані з виходами фільтрів нижніх частот опорного і вимірювального каналів, індикатор, входом з'єднаний з виходом блоку поділу амплітуд низькочастотних сигналів, подільник потужності, виходами з'єднаний з другими входами балансних НВЧ змішувачів, керований НВЧ генератор, і генератор низької частоти, згідно винаходу введені двоканальний комутатор, подільник частоти, послідовно з'єднані підсилювач частоти комутації, синхронний детектор і інтегратор, подвійний хвилевідний трійник, два амплітудних НВЧ модуляторів, квадратурний низькочастотний фазорозщеплювач і квадратурний НВЧ фазорозщеплювач, вхід якого з'єднаний з виходом керованого НВЧ генератора, виходи з'єднані з сигнальними входами амплітудних НВЧ модуляторів, модулюючі входи яких через двоканальний комутатор з'єднані з виходами квадратурного низькочастотного фазорозщеплювача, входом підключеного до виходу генератора низької частоти, виходи амплітудних НВЧ модуляторів з'єднані зі входами подвійного хвилевідного трійника, один вихід якого з'єднаний зі входом-виходом приймально-передавальної антени, другий вихід з'єднаний зі входом подільника потужності, вхід підсилювача частоти комутації з'єднаний з виходом фільтра, низьких частот вимірювального каналу, вихід інтегратора з'єднаний з входом керованого НВЧ генератора, а керуючі входи двоканального комутатора і синхронного детектора підключені через подільник частоти до виходу генератора низької частоти.

Саме комутаційне формування пакетів НВЧ коливань з періодичною зміною знака одної бокової частоти, змішування пакетів падаючих і відбитих НВЧ коливань з НВЧ коливаннями іншої, протилежно зміненої бокової частоти, режим періодичного почергового створення пари модульованих НВЧ коливань з протилежно розташованими боковими частотами, отримання різницевого сигналу у вигляді напруги огибаючої частоти комутації і формування керуючого сигналу для НВЧ генератора синхронним детектуванням напруги огибаючої дозволяє виключити вплив нерівності амплітуд коливань бокових частот і нестабільності параметрів вимірювального каналу на точність налагодження початкових НВЧ коливань на максимум поглинання, що сприяє підвищенню точності вимірювання коефіцієнта відбиття в центрі смуги поглинання.

Введення в структуру пристрою квадратурних фазорозщеплювачів НВЧ коливань і низькочастотного сигналу дозволяє пригнічувати в амплітудно-модульованих коливаннях одну з бокових частот, наявність двоканального комутатора в ланцюзі низькочастотних модулюючих сигналів забезпечує почергове і періодичне пригнічення однієї з бокових частот, а складання і віднімання амплітудно-модульованих коливань у подвійному хвильоводному трійнику дозволяє формувати водночас пару модульованих НВЧ коливань з протилежно пригніченими боковими частотами. Керування двоканальним комутатором і синхронним детектором низькочастотним модулюючим сигналом через подільник частоти забезпечує виділення напруги огибаючої у вимірювальному каналі і формування керуючого сигналу для НВЧ генератора, наявність інтегратора у ланцюзі керування дає повний збіг несучої частоти опромінюючих НВЧ коливань з частотою релаксаційного поглинання, що також сприяє підвищенню точності вимірювання коефіцієнта відбиття в центрі смуги поглинання.

На фіг. 1 зображена структурна схема пристрою для вимірювання коефіцієнта відбиття у смузі поглинання, на фіг. 2 - частотні залежності коефіцієнта відбиття у смузі поглинання і відповідні епюри низькочастотних сигналів.

Пристрій містить приймально-передавальну антену 1, на вході-виході якої включені спрямовані відгалужувачі 2 і 3. Антена підключена до одного з виходів подвійного хвильоводного трійника 4, другий вихід якого з'єднаний з подільником потужності 5. Вихід спрямованого відгалужувача 2 падаючих НВЧ коливань з'єднаний з опорним каналом, а вихід спрямованого відгалужувача 3 відбитих НВЧ коливань з'єднаний з вимірювальним каналом. Обидва канала включають послідовно з'єднані балансні НВЧ змішувачі 6 і 7, вибірні підсилювачі різницевої частоти 8 і 9, амплітудні детектори 10 і 11, фільтри нижніх частот 12 і 13. Другі входи балансних НВЧ змішувачів 6 і 7 з'єднані з виходами подільника потужності 5. До виходів опорного і вимірювального каналів підключено входами блок 14 поділу амплітуд низькочастотних сигналів, вихід якого з'єднаний з індикатором 15. До виходу фільтра нижніх частот 13 вимірювального каналу підключені послідовно з'єднані підсилювач 16 частоти комутації, синхронний детектор 17 і інтегратор 18, вихід якого з'єднаний з входом керованого НВЧ генератора 19. Керований НВЧ генератор 19 живить квадратурний НВЧ фазорозщеплювач 20, до виходів якого підключені сигнальними входами амплітудні НВЧ модулятори 21 і 22, модулюючі входи яких через двоканальний комутатор 23 з'єднані з квадратурним низькочастотним фазорозщеплювачем 24. Керуючі входи двоканального комутатора 23 і синхронного детектора 17 з'єднані з виходом подільника частоти 25, підключеного до генератора 26 низької частоти.

Суть способу полягає у наступному.

Початкові НВЧ коливання генератора 19 (фіг. 1) розділяються по фазі на 90° квадратурним фазорозщеплювачем 20, створюючи на його виході два ортогональних коливання:

$$U_1(t) = a_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (1)$$

$$U_2(t) = a_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (2)$$

де  $a_1$ ,  $\omega_1$  і  $\varphi_1$  - амплітуда, частота і фаза НВЧ коливань.

Коливання (1) і (2) модулюються по амплітуді в НВЧ модуляторах 21 і 22 низькочастотними коливаннями генератора 26, які також розділяються по фазі на 90° квадратурним фазорозщеплювачем 24:

$$U_3'(t) = A \cos(\Omega t + \Phi_1), \quad (3)$$

$$U_4'(t) = A \sin(\Omega t + \Phi_1), \quad (4)$$

де:  $A_1$ ,  $\Omega_1$  і  $\Phi_1$  - амплітуда, частота і фаза низькочастотних коливань.

Низьку частоту  $\Omega_1$  вибирають рівній половині смуги поглинання  $\Delta\omega$  опромінюємого середовища (фіг. 2, а), тобто

частота модуляції  $\Omega_1 = \Delta\omega / 2$ .

У результаті модуляції НВЧ коливань утворюються ортогональні трьохчастотні коливання вигляду:

$$U_5(t) = a_H \{ \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + 0,5m \cos[(\omega_1 - \Omega_1)t + \varphi_1 - \Phi_1] + 0,5m \cos[(\omega_1 + \Omega_1)t + \varphi_1 + \Phi_1] \}, \quad (5)$$

$$U_6(t) = a_H \{ \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + 0,5m \cos[(\omega_1 - \Omega_1)t + \varphi_1 - \Phi_1] - 0,5m \cos[(\omega_1 + \Omega_1)t + \varphi_1 + \Phi_1] \}, \quad (6)$$

де:  $a_H$  - амплітуда несучих коливань;

$m$  - коефіцієнт глибини амплітудної модуляції.

Коливання різницевої частоти  $\omega_2 = \omega_1 - \Omega_1$ , з фазою  $\varphi_2 = \varphi_1 - \Phi_1$  являють собою коливання нижньої бокової частоти відносно несучої частоти  $\omega_1$ , а коливання сумарної частоти  $\omega_3 = \omega_1 + \Omega_1$ , з фазою  $\varphi_3 = \varphi_1 + \Phi_1$  - коливання верхньої бокової частоти.

Трьохчастотні коливання (5) і (6) складаються і віднімаються в подвійному хвильоводному трійнику 4. У результаті цих операцій на виходах подвійного хвильоводного трійника формуються модульовані НВЧ коливання тільки з одною боковою частотою. При складанні модульованих коливань утворюється НВЧ сигнал з нижньою боковою частотою

$$U_7(t) = a'_H [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \pi / 4) + m \cos(\omega_2 t + \varphi_2)], \quad (7)$$

і в результаті віднімання - НВЧ сигнал з верхньою боковою частотою

$$U_8(t) = a''_H [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 - \pi / 4) + m \cos(\omega_3 t + \varphi_3)], \quad (8)$$

де  $a'_H$  і  $a''_H$  - амплітуда несучих коливань модульованих сигналів.

Глибину модуляції НВЧ коливань вибирають невеликою у межах 5 ... 10% ( $m = 0,05 \dots 0,1$ ), щоб потужність НВЧ коливань була зосереджена в основному у несучих коливаннях частоти  $\omega_1$ , які впливають на неоднорідне середовище. Сумарні НВЧ коливання (7) з одного виходу подвійного хвильоводного трійника надходять до приймально-передавальної антени 1, а різниці НВЧ коливання (8) з другого виходу подвійного хвильоводного трійника через подільник потужності 5 надходять на балансні НВЧ змішувачі 6 і 7. За допомогою спрямованих відгалужувачів 2 і 3 виділяються падаючі на неоднорідне середовище і відбиті від нього НВЧ коливання. Амплітуда відбитих коливань пропорційна коефіцієнту відбиття середовища, котрий в смугі поглинання істотно залежить від частоти опромінюючих коливань (рис. 2, а і б). Мінімальне значення коефіцієнта відбиття має місце при збігу частоти збуджуючих коливань  $\omega_i$  з частотою  $\omega_p$  релаксації молекул води вологого матеріалу ( $\omega_p = \omega_i$ ). Модуль коефіцієнта відбиття в залежності від співвідношення частот  $\omega_p$  і  $\omega_i$  можна показати таким чином

$$\Gamma_i = \sqrt{4\Gamma_p^2 + (1 - \Gamma_p)^2 \zeta_i^2} / \sqrt{4 + (1 + \Gamma_p)^2 \zeta_i^2}, \quad (9)$$

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

Відбиті від середовища сумарні НВЧ коливання (7) з урахуванням коефіцієнта відбиття приймають вигляд

$$U_9(t) = a'_H [\Gamma_1 \cos\{\omega_1 t + \varphi_1 + \pi / 4 + \Delta\varphi_1\} + \Gamma_2 m \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \Delta\varphi_2)], \quad (10)$$

де  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$  - модулі коефіцієнта відбиття неоднорідного середовища на частотах  $\omega_1$  і  $\omega_2$ ;  $\Delta\varphi_1$  і  $\Delta\varphi_2$  - додаткові фазові зсуви коливань на відповідних частотах.

При змішуванні виділених спрямованих відгалужувачем 3 відбитих НВЧ коливань (10) з різницевиими НВЧ коливаннями (8) у балансному змішувачі 7 формуються низькочастотні коливання з різницевиими частотами  $\omega_3 - \omega_1 = \Omega_1$ , і  $\omega_3 - \omega_2 = 2\Omega_1$ . З спектру цих коливань вибірним підсилювачем 9 виділяють коливання з подвоєною частотою модуляції

$$U_{10}(t) = S_1 \Gamma_2 K_1 m^2 a'_H a''_H \cos(2\Omega_1 t + \Phi_2), \quad (11)$$

де  $S_1$  - крутість балансного змішування;  $K_1$  - коефіцієнт вибірного підсилення;  $\Phi_2$  - фаза низькочастотних коливань при опромінюванні середовища сумарними НВЧ коливаннями.

Аналогічним образом у балансному змішувачі 6 змішуються сумарні падаючі НВЧ коливання (7), виділені спрямованим відгалужувачем 2, з різницевиими НВЧ коливаннями (8). На виході вибірного підсилювача 8 виділяються також низькочастотні коливання з подвоєною частотою модуляції

$$U_{11}(t) = S_1 K_1 m^2 a'_H a''_H \cos(2\Omega t + \Phi_3), \quad (12)$$

де  $\Phi_3$  - фаза низькочастотних опорних коливань.

Низькочастотні коливання (11) і (12) детектуються амплітудними детекторами 10 і 11. Постійні складові напруг виділяються фільтрами нижніх частот 12 і 13 і надходять на входи блоку поділу 14, де здійснюється операція поділу. На індикатор 15 надходить напруга, пропорційна частці від поділу означених напруг. З виразів (11) і (12) слідує, що частка від поділу амплітуд низькочастотних напруг пропорційна коефіцієнту відбиття опромінюемого середовища, тобто

$$U_{12} = S_2 \Gamma_2(\omega_2), \quad (13)$$

де  $S_2$  - крутість результуючого перетворення коефіцієнта відбиття в напругу;  $\Gamma_2(\omega_2)$  - коефіцієнт відбиття середовища на частоті  $\omega_2$ .

Коефіцієнт відбиття на нижній боковій частоті  $\omega_2$  має вигляд

$$\Gamma_2(\omega_2) = \sqrt{4\Gamma_p^2 + (1 - \Gamma_p)^2 \zeta_2^2} / \sqrt{4 + (1 + \Gamma_p)^2 \zeta_2^2}, \quad (14)$$

де  $\zeta_2 = 2Q\Delta\omega_2/\omega_p$  - узагальнена розстройка на нижній боковій частоті  $\omega_2$ ;

$\Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_p$  - розстройка відносно частоти релаксації неоднорідного середовища  $\omega_p$ .

При зміні положення контактів комутатора 23 відбувається взаємне заміщення низькочастотних модулюючих коливань  $U_3$  і  $U_4$ :

$$U_3'' = A \sin(\Omega t + \Phi_1), \quad (15)$$

$$U_4'' = A \cos(\Omega t + \Phi_1). \quad (16)$$

В результаті заміщення на виходах подвійного хвилевідного трійника 4 відбувається також заміщення сумарних НВЧ коливань різницевиими і навпаки:

$$U_7''(t) = a_H'' [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 - \pi/4) + m \cos(\omega_3 t + \varphi_3)], \quad (17)$$

$$U_8''(t) = a_H'' [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \pi/4) + m \cos(\omega_2 t + \varphi_2)]. \quad (18)$$

При цьому контрольоване середовище починає опромінюватись різницевиими модульованими НВЧ коливаннями, а на опорні входи балансних змішувачів 6 і 7 починають надходити сумарні модульовані НВЧ коливання з виходів подільника потужності 5. Відбиті від середовища різницеви НВЧ коливання (16) приймають вигляд

$$U_9''(t) = a_H'' [\Gamma_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 - \pi/4 + \Delta\varphi_1'') + \Gamma_3 m \cos(\omega_3 t + \varphi_3 + \Delta\varphi_3)], \quad (19)$$

де  $\Gamma_3$  - модуль коефіцієнта відбиття середовища на частоті  $\omega_3$ ;

$\varphi_1''$  і  $\Delta\varphi_3$  - додаткові фазові зсуви коливань на несучій і боковій частотах.

Коефіцієнт відбиття на частоті  $\omega_3$ , має вигляд

$$\Gamma_3(\omega_3) = \sqrt{4\Gamma_p^2 + (1 - \Gamma_p)^2 \zeta_3^2} / \sqrt{4 + (1 + \Gamma_p)^2 \zeta_3^2}, \quad (20)$$

де  $\zeta_3 = 2Q\Delta\omega_3/\omega_p$  узагальнена розстройка на верхній боковій частоті  $\omega_3$ ;

$\Delta\omega_3 = \omega_3 - \omega_p$  - розстройка відносно частоти релаксації  $\omega_p$ .

Змішують відбиті від середовища модульовані НВЧ коливання (10) з сумарними НВЧ коливаннями (17). У виміральному каналі виділяють із змішаних коливань низькочастотний сигнал з подвоєною частотою модуляції аналогічний (11).

$$U_{10}''(t) = S_1 \Gamma_3 K_1 m^2 a_H'' \cos(2\Omega_1 t + \Phi_2''), \quad (21)$$

де  $\Phi_2''$  - фаза низькочастотних коливань при опромінюванні середовища різницевиими НВЧ коливаннями.

В опорному каналі на виході вибірного підсилювача 8 виділяють аналогічні (12) опорні низькочастотні коливання

$$U_{11}''(t) = S_1 K_1 m^2 a_H'' \cos(2\Omega_1 t + \Phi_3''). \quad (22)$$

На виході блоку поділу 14 у результаті поділу амплітуд сигналів (21) і (22) утворюється напруга

$$U_{12}'' = S_2 \Gamma_3(\omega_3). \quad (23)$$

При періодичній роботі комутатора 23 з більш низькою частотою  $\Omega_2$  порівняно з частотою модуляції  $\Omega_1$  ( $\Omega_2 < \Omega_1$ ) на виході вибірного підсилювача 9 по чергові виділяються пакети низькочастотних сигналів  $U_{10}'(t)$  і  $U_{10}''(t)$ , амплітуди яких пропорційні коефіцієнтам відбиття  $\Gamma_2$  і  $\Gamma_3$ . При їх нерівності виникає огинаюча амплітуди низькочастотних сигналів, період повторення якої рівний періоду перемикавання комутатора 23. У результаті детектування цього сигналу на виході фільтру 13 нижніх частот поряд з постійною складовою утворюється змінна складова частота комутації

$$U_{13}(t) = K_2 \frac{U_{10}' - U_{10}''}{2} \cos(\Omega_2 t + \Phi_4) = 0,5 S_1 K_1 K_2 m^2 a_H'' (\Gamma_2 - \Gamma_3) \cos(\omega_2 t + \Phi_4), \quad (24)$$

де  $K_2$  - коефіцієнт перетворення низькочастотних коливань.

Напруга (24) частоти комутації посилюється підсилювачем 16 частоти комутації, випрямляється синхронним детектором 17 і змінює частоту НВЧ генератора 19. Процес регулювання частоти генератора 19 здійснюється до отримання нульової напруги частоти комутації (24). При досягненні рівності коефіцієнтів відбиття на бокових частотах  $\omega_2$  і  $\omega_3$  (фіг. 2, б) має місце рівність

$$\Gamma_2 = \Gamma_3 \text{ або } |\omega_2 - \omega_p| = |\omega_3 - \omega_p| \quad (25)$$

Оскільки бокові частоти  $\omega_2$  і  $\omega_3$  модульованих НВЧ коливань змінюються синхронно із зміною несучої частоти  $\omega_1$ , рівність (25) задовольняється за умовою

$$|\omega_1 - \Omega_1 - \omega_{p=1}| = |\omega_1 + \Omega_1 - \omega_p|. \quad (26)$$

З останнього видно, що в цьому випадку несуча частоти  $\omega_1$  модульованих коливань, на якій зосереджена більша частина енергії опромінюючих НВЧ коливань, починає співпадати з частотою релаксації  $\omega_p$ .

$$\omega_1 = \omega_p = \frac{2\pi}{\tau_p}, \quad (27)$$

де  $\tau_p$  - час релаксації диполей води неоднорідного середовища.

При цьому на виході блоку поділу 14 утворюється сигнал постійного струму, пропорційний (фіг. 2, б)

$$U_{12}'' = U_{12}' = S_2 \Gamma_2(\omega_2) = S_2 \Gamma_3(\omega_3) = (S_2 / \sqrt{2}) \Gamma_{\min}(\omega_4) = S_2' \Gamma_{\min}(\omega_p), \quad (28)$$

де  $S_2' = \frac{S_2}{\sqrt{2}}$  - нормована крутість перетворення.

Таким чином, частота опромінюючих НВЧ коливань точно настроюється на частоту релаксації сор, наприклад, частоту релаксації диполей молекул води вологого матеріалу, що відповідає максимуму поглинання електромагнітної енергії вологим матеріалом. Коефіцієнт відбиття приймає мінімальне значення, котре однозначно зв'язане з вологістю матеріалу. На співвідношення (26) не впливає неминуча нерівність амплітуд опромінюючих НВЧ коливань

$a_{\text{н}} \neq a_{\text{н}}'$ , нестабільність і нерівність параметрів змішувачів, підсилювачів, детекторів, фільтрів і інших елементів вимірювального і опорного каналів. Це пояснюється тим, що зникнення напруги частоти комутації має місце тільки при рівності коефіцієнтів відбиття ( $\Gamma_2 = \Gamma_3$ ) на бокових частотах ( $\omega_2$  і  $\omega_3$ ) незалежно від значень параметрів перетворювальних ланок і амплітуд почергово опромінюючих коливань.

Пристрій працює таким чином.

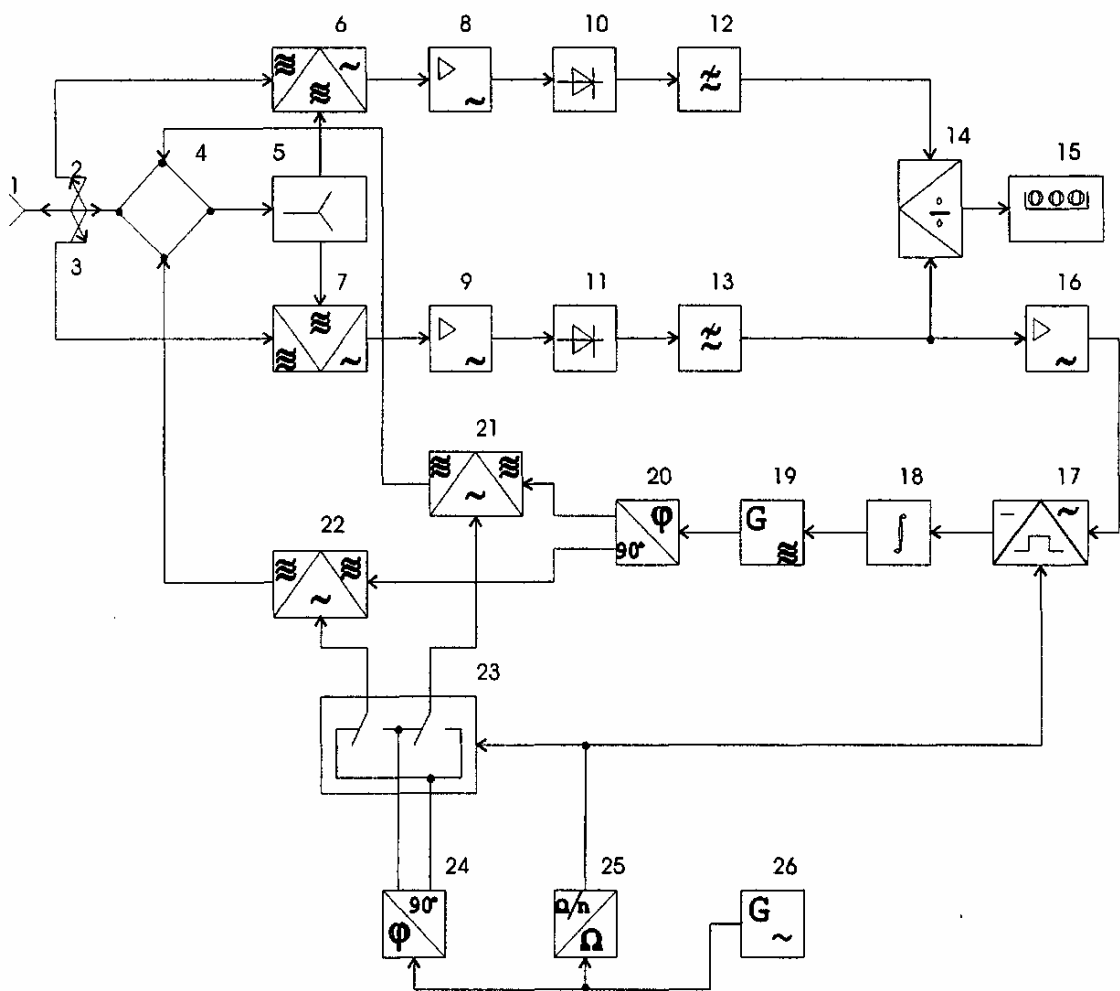
Вихідні коливання керованого НВЧ генератора 19 розділяються на два безперервних квадратурних коливання, наприклад, за допомогою НВЧ гібридного з'єднання 20. Низькочастотні коливання генератора 26 аналогічним образом поділяються на  $90^\circ$  квадратурним фазорозщеплювачем 24. В НВЧ модуляторах 21 і 22 здійснюється амплітудна модуляція НВЧ коливань з визначеним в способі значенням глибини модуляції. В подвійному хвильоводному трійнику 4 в одному з плечей відбувається складання, а в другому - віднімання модульованих НВЧ коливань. З одного з плечей трійника 4 модульовані НВЧ коливання надходять в приймально-передавальну антену 1, а з другого плеча на опорні входи балансних НВЧ змішувачів 6 і 7 через подільник потужності 5. Частина енергії падаючих НВЧ коливань через спрямований відгалужувач 2 надходить на балансний НВЧ змішувач 6 опорного каналу. Енергія відбитих від контрольованого середовища НВЧ коливань через спрямований відгалужувач 3 надходить на балансний НВЧ змішувач 7 вимірювального каналу. Низькочастотні коливання різницевої частоти посилюються вибірними підсилювачами 8 і 9, детектуються амплітудними детекторами 10 і 11, згладжуються фільтрами нижніх частот 12 і 13. Блоком поділу 14 формується напруга, пропорційна коефіцієнту відбиття, котра надходить на індикатор 15. За допомогою двоканального комутатора 23 відбувається періодичне заміщення низькочастотних модулюючих коливань, зсунутих за фазою на  $90^\circ$ . Частота комутації  $\Omega_2$  визначається коефіцієнтом поділу  $n$  подільника частоти 25 ( $\Omega_2 = \Omega_1/n$ ), котрий підключено до виходу модулюючого генератора 26. У результаті періодичної зміни фаз модулюючих коливань формуються пакети НВЧ коливань з періодично змінним знаком бокової частоти. Пакети цих коливань почергово опромінюють контрольоване середовище. Синхронно з цим відбувається зміна знаку бокової частоти НВЧ коливань на опорних входах балансних НВЧ змішувачів 6 і 7, але в протилежному напрямку. Якщо коефіцієнти відбиття на верхній і нижній бокових частотах не рівні, то на виході фільтру нижніх частот 13 вимірювального каналу виникає змінна напруга частоти комутації. Ця напруга посилюється підсилювачем 16 частоти комутації, яке після цього випрямляється синхронним детектором 17. Опорною напругою цього детектора служить та ж сама напруга, що управляє роботою комутатора 23.

Випрямлена напруга заряджає електричний інтегратор 18, вихідна напруга якого керує частотою НВЧ генератора 19. При зміні знаку частоти розстройки відносно частоти релаксації  $\omega_p$  опромінююмого середовища змінюється фаза напруги частоти комутації на  $180^\circ$ , а отже, і полярність випрямленої напруги. Інтегратор 18 перезаряджається доки частота НВЧ коливань генератора 19 не співпаде з частотою релаксації контрольованого середовища.

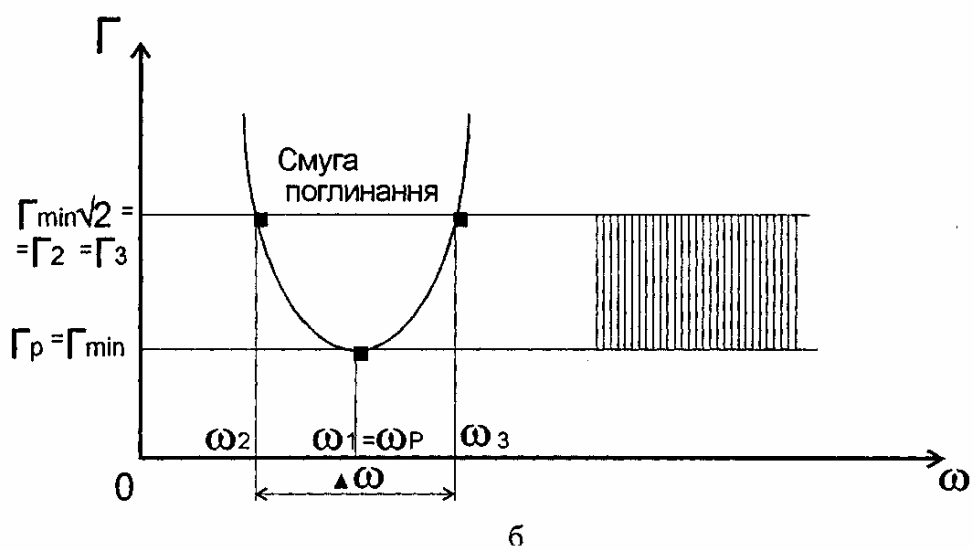
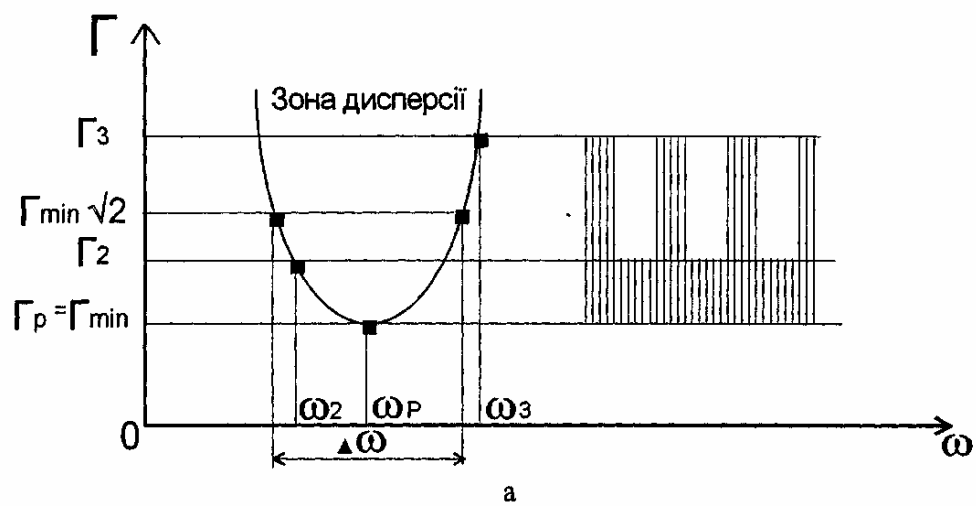
При збігу частоти  $\omega_1$  генератора 19 з частотою релаксації  $\omega_p$  середовища зникає змінна складова частоти комутації, припиняється зарядження інтегратора 18 і частота НВЧ генератора 19 приймає значення, що встановилося. У випадку зміни частоти релаксації через зміну вологості або зміну температури середовища зміняться коефіцієнти відбиття на бокових частотах НВЧ коливань і відбудеться автоматична настройка частоти НВЧ генератора 19 на нове значення частоти релаксації. При цьому індикатор 15 покаже нове значення коефіцієнта відбиття на частоті  $\omega_p$ , яке пропорційно залишковій вологості матеріалу.

Використання розглянутих способу і пристрою дозволяє, наприклад, в процесі сушіння матеріалів автоматично перестроювати частоту опромінюючих НВЧ коливань за максимумом поглинання, що значно прискорює процес сушіння. Об'єктивний контроль вологості за мінімальним коефіцієнтом відбиття дозволяє з високою точністю витримувати технологічний регламент сушіння і підвищити, завдяки цьому, якість волого-теплової обробки матеріалів.

Дослідження показали, що режим сушіння НВЧ коливаннями капілярно-пористих матеріалів (шкіра, тканини, папір та ін.) у діапазоні частот 3 ... 10 ГГц з настройкою на частоту релаксації дозволяє скоротити час сушіння у 1,5 - 2 рази, а похибку вимірювання вологості знизити до 0,2 - 0,5%. При цьому на 30 - 40% зменшуються витрати НВЧ енергії через поглинання відбитих від матеріалу НВЧ коливань конструктивними елементами апаратів для сушіння.



Фиг. 1.



Фиг. 2.