

УДК 621.317.791

А.Н. Трушкин, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ВОЗДУШНОЙ И ЖИДКОЙ СРЕД

Описаны способ и устройства для измерения расстояния до границы раздела воздушной и жидкой сред сверхвысокочастотным методом. Проанализированы погрешности, обусловленные неточностью воспроизведения длины опорного канала и частоты СВЧ сигналов.

Известны различные устройства для измерения уровня жидкости, базирующиеся на традиционных методах измерения: ультразвуковой, поплавковый и другие методы.

Повышение класса точности этих устройств ведет к резкому возрастанию их стоимости, поскольку повышение точности изготовления конструктивных элементов датчиков граничит с технологическими возможностями современного производства.

Широкие перспективы в измерительной технике открываются перед электромагнитными системами с распределенными параметрами.

В работе [1] описан способ измерения расстояния до неоднородности в протяженном СВЧ тракте, основанный на подсчете числа импульсов на выходе СВЧ детектора за один цикл перестройки генератора. Точность измерения в этом способе определяется в основном погрешностью измерения верхней и нижней частот диапазона перестройки, которые определяют с помощью резонансных волномеров с погрешностью $\pm 0,1 \%$, что соответствует погрешности определения длины тракта в несколько сантиметров.

Ниже предлагается способ и устройства, его реализующие, для измерения расстояния до границы раздела воздуха и жидкости в резервуаре.

Напряжения на выходе первого СВЧ детектора в короткозамкнутой линии опорного канала имеют вид (рисунок 1)

$$U_1 = 4K_{1Д}E_0^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}L_1\right), \quad U_2 = 4K_{1Д}E_0^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_2}L_1\right), \quad (1)$$

где L_1 – расстояние вдоль линии от плоскости короткозамыкателя до зонда в опорном канале; λ_1, λ_2 – максимальная и минимальная длины волны в волноводе; E_0 – амплитуда напряженности электрического поля в области зонда; $K_{1Д}$ – коэффициент преобразования первого СВЧ детектора.

Аналогично напряжения на выходе детектора измерительного канала имеют вид:

$$U_3 = 4K_{2Д}E_0^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}L_2\right), \quad U_4 = 4K_{2Д}E_0^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_2}L_2\right), \quad (2)$$

где $K_{2Д}$ – коэффициент преобразования второго СВЧ детектора; L_2 – расстояние вдоль линии от плоскости короткозамыкателя до зонда в измерительном канале.



Рисунок 1 – Схема измерения расстояния L_1

При изменении длины волны СВЧ генератора в процессе перестройки от λ_1 до λ_2 напряжение на любом из СВЧ детекторов изменяется от нулевого до максимального значения $U_{\text{макс}} = 4K_{Д}E_0^2$. Из (1) и (2) при $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 0$

$$\frac{2 \cdot L_1}{\lambda_1} = n_1, \quad \frac{2 \cdot L_1}{\lambda_2} = n_2, \quad \frac{2 \cdot L_2}{\lambda_1} = n_3, \quad \frac{2 \cdot L_2}{\lambda_2} = n_4. \quad (3)$$

где n_1, n_2, n_3, n_4 – число полуволен λ_1, λ_2 , укладываемых на отрезках L_1 и L_2 соответственно.

Из (3) получаем

$$N_1 = n_2 - n_1 = \frac{2 \cdot L_1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} (\lambda_1 - \lambda_2), \quad N_2 = n_4 - n_3 = \frac{2 \cdot L_2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} (\lambda_1 - \lambda_2). \quad (4)$$

где N_1, N_2 – число импульсов на выходах детекторов опорного и измерительного каналов, подсчитанных блоком обработки за один цикл перестройки СВЧ генератора.

Из (4) найдем

$$L_1 = \frac{N_1 \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad L_2 = \frac{N_2 \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (5)$$

Измеряемая длина L_2 определяется из (5).

$$L_2 = L_1 \frac{N_2}{N_1}. \quad (6)$$

Таким образом, задаваясь L_1 и подсчитывая N_1, N_2 , можно рассчитать искомую длину по формуле (6).

Из (3) следует

$$n_1 - n_3 = \frac{2(L_2 - L_1)}{\lambda_1} = N_3. \quad (7)$$

Анализ формулы (7) показывает, что для того, чтобы N_3 оставалось целым числом при изменении расстояния L_2 числитель выражения (7) должен быть кратен значению λ_1 . Откуда следует, что измерение L_2 возможно только с дискретностью λ_1 .

Из выражения (6) видно, что погрешность измерения L_2 зависит от точности воспроизведения L_1 .

Приращение L_1 длины на величину ΔL_T , обусловленное колебаниями температуры окружающей среды, можно рассчитать по формуле

$$\Delta L_T = \pm \Delta L_0 TK_L (T - T_0), \quad (8)$$

где TK_L – температурный коэффициент линейного расширения сплава, ΔL_0 – разница геометрических длин измерительного и опорного каналов при нормальной температуре, T – текущее значение температуры; $T_0 = 293$ К.

Результирующее отклонение длины ΔL_P с учетом (8) определяется выражением

$$\Delta L_P = \sqrt{(\Delta L_T)^2 + (\Delta L_F)^2}, \quad (9)$$

где ΔL_F – составляющая погрешности измерения L_2 , обусловленная неточностью воспроизведения L_1 за счет внешних воздействий, например, за счет продольной деформации волновода.

Абсолютная погрешность измерения L_2 рассчитывается по формуле

$$\Delta L = \frac{\Delta L_P N_2}{N_1}. \quad (10)$$

Для сплавов на основе меди или алюминия, использующихся для

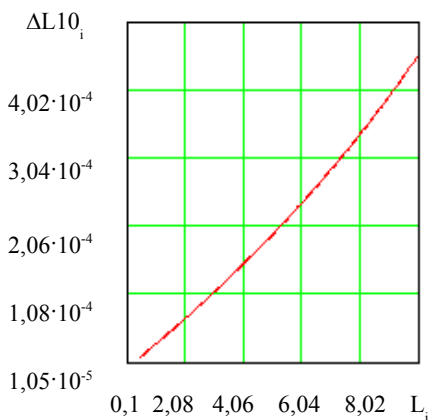


Рисунок 2 – Погрешность измерения расстояния до границы раздела двух сред

изготовления волноводов, температурный коэффициент линейного расширения $TK_L \approx 17 \times 10^{-6} K^{-1}$ [2]. Расчет по формуле (8) показывает, что набег ΔL_T за счет изменения температуры на $\pm 30^\circ C$ при L_1 равной 10 метров составляет примерно 5 миллиметров. Поэтому при расчете L_2 по формуле (6) необходимо L_1 корректировать на величину TK_L по результатам измерения температуры дополнительным датчиком.

Пусть погрешность ΔL_F воспроизведения L_1 равна одному миллиметру, а погрешность измерения температуры $\pm 1^\circ C$. Тогда погрешность ΔL измерения L_2 , рассчитанная по формуле (10), будет определяться кривой, приведенной на рисунке 2.

Анализ кривой, рассчитанной для диапазона частот от 26,4 ГГц до 37 ГГц показывает, что с увеличением измеряемой длины погрешность измерения возрастает и в диапазоне от 0,1 метра до 10 метров не превышает 0,5 миллиметра.

На рисунке 3 изображена структурная схема измерения расстояния до границы раздела воздушной и жидкой сред.

Из сказанного выше следует, что рассмотренная схема не требует измерения λ_1 , λ_2 , что является ее существенным преимуществом, одна-

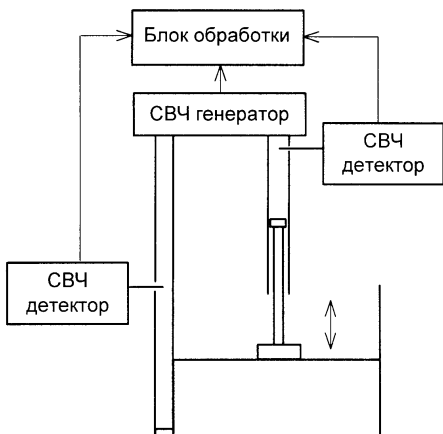


Рисунок 3 – Структурная схема измерителя

ко она измеряет L_2 только с дискретностью, равной λ_1 . Во многих случаях требуется определение L_2 в любой точке заданного диапазона. Поэтому рассмотрим еще один вариант измерения L_2 , свободный от указанного недостатка.

Пусть в опорный канал включен двухпозиционный согласованный аттенюатор, автоматически устанавливающийся в закрытое или открытое состояния. В открытом состоянии аттенюатора напряжение на первом детекторе описывают формулами (1), а в закрытом - выражением

$$U_0 = K_{1Д} E_0^2. \quad (11)$$

Генератор перестраивается по частоте так, что выполняется равенство

$$U_1 = U_2. \quad (12)$$

С учетом (1) и (12) получаем уравнение

$$\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} L_1 + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} L_1\right). \quad (13)$$

Решение уравнения (13) относительно L_1 приводит к выражению

$$L_1 = \frac{1}{4 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}. \quad (14)$$

Анализ (1) показывает, что крутизна изменения напряжений U_1 и U_2 от частоты СВЧ генератора максимальна в точках перегиба этих функций, поэтому именно при этих напряжениях погрешность определения λ_1 , λ_2 ожидается минимальной. Из этих соображений получаем два уравнения

$$L_1 = m \frac{\lambda_1}{4} + \frac{\lambda_1}{8}, \quad L_1 = n \frac{\lambda_2}{4} + \frac{\lambda_2}{8}, \quad (15)$$

где m и n – число четвертьволновых отрезков для λ_1 и λ_2 , укладываемых на образцовом отрезке L_1 .

Пусть m и n связаны соотношением

$$n = m + 1. \quad (16)$$

Тогда из (15), (16) следует

$$\lambda_1 = \frac{8L_1}{2m+1}, \quad \lambda_1 = \frac{8L_1}{2m+3}. \quad (17)$$

Задаваясь коэффициентом перестройки $\gamma = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, найдем

$$m = \frac{1 - 3\gamma}{2(\gamma - 1)}.$$

Таким образом, исходя из рабочего диапазона частот СВЧ генератора, можно рассчитать длину опорного канала, соответствующую λ_1 , λ_2 по формуле (14).

При изменении L_2 изменяются в некоторых пределах λ_1 и λ_2 , так как по принципу работы измерителя на L_2 должно укладываться целое число полуволн. Максимальное изменение длины волны, обусловленное выше указанной причиной, можно оценить по формуле

$$\Delta \lambda = 2L_2 \frac{0,5}{N(N + 0,5)}, \quad (18)$$

где N – количество полуволн, укладывающихся на отрезке L_2 .

Расчет по формуле (18) показывает, что изменение минимальной и максимальной длин волн генератора при вариациях измеряемой длины соответствует изменению частоты генератора на единицы мегагерц, а изменению напряжения на первом СВЧ детекторе не более одного процента при малых L_2 (порядка одного метра). С увеличением L_2 величина изменения напряжения на первом СВЧ детекторе снижается (рисунок 4).

Таким образом напряжения на детекторе опорного канала измеряются в окрестности точки перегиба, что соответствует требованию максимальной точности.

Можно показать, что длина волны в волноводе определяется при заданном значении L_2 и измеренных значениях напряжений U_0 , U_1 , U_2 из выражений

$$\lambda_1 = \frac{2\pi L_1}{\left(\arcsin \sqrt{\frac{U_1}{4U_0}} \right) (2m + 1)}, \quad \lambda_2 = \frac{2\pi L_1}{\left(\arcsin \sqrt{\frac{U_2}{4U_0}} \right) (2m + 3)}. \quad (19)$$

Искомая длина L_2 с учетом (19) рассчитывается по формуле (5).

Анализ погрешностей определения L_2 по формуле (5), обусловленных неточностью воспроизведения длины опорного канала L_1 и неточностью измерения напряжений U_0 , U_1 , U_2 показывает, что L_2 можно измерять с погрешностью до долей миллиметра в любой точке заданного диапазона.

Таким образом, в результате анализа предлагаемых схем измерения длины L_2 можно сделать следующие выводы:

- в задачах допускового контроля уровня жидкости первая схема наиболее предпочтительна, так как работает по принципу подсчета импульсов и особые требования к устройству обработки не предъявляются;

- вторая схема построена на принципе определения λ_1 , λ_2 по фазовым соотношениям в опорном канале, следовательно, напряжения на первом детекторе должны определяться с высокой точностью.

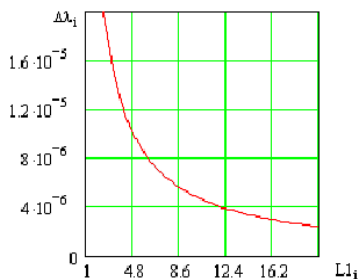


Рисунок 4 – Зависимость вариации длины волны от измеряемой длины L_1

Библиографический список

1. Трушкин А.Н. Способ измерения расстояния до неоднородности в протяженном СВЧ тракте/ А.Н. Трушкин // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2002. — Вып. 41. — С. 88 – 92.
2. Справочник по электротехническим материалам. Т.3 / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. — 3-е изд., перераб. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. — 728 с.

Поступила в редакцию 12.03.2004 г.