

УДК 621.317.7

И.Б. Широков, доцент, канд. техн. наук,**И.В. Сердюк, ассистент****Н.В. Коваль***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, СевНТУ, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: shirokov@stel.sebastopol.ua***МИКРОВОЛНОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ**

Рассмотрен принцип построения микроволнового измерителя интегрального состава газовой среды. Метод измерения основан на определении набега фазы микроволнового сигнала с использованием гомодинного преобразования частоты измерительного сигнала. Использование данного метода позволяет контролировать изменение интегрального состава газовой среды.

Ключевые слова: микроволновые колебания, набег фаз, начальная фаза.

Задача контроля состава газовой среды часто возникает вследствие промышленной деятельности людей. Например, необходимость оценивать и контролировать состав газовой среды возникает при экологическом мониторинге, вблизи промышленных объектов; на предприятиях с токсичными, вредными, пожаро- и взрывоопасными производствами. Также постоянно необходимо контролировать состав воздуха в угольных шахтах, где происходят регулярные выбросы метана. При этом часто необходимо оценивать концентрацию выбросов в некотором объеме, так как они распределены в пространстве. Таким образом, определение интегрального состава газовой среды является актуальной задачей.

Целью данной статьи является анализ работы микроволнового измерителя интегрального состава газовой среды и определение источников его погрешностей.

Для решения задачи увеличения точности измерения флуктуаций набега фаз, при исследовании распространения микроволн от одной точки измерительной трассы к другой предложен способ контроля изменений интегрального состава газовой среды, заявленный в [1]. Недостатком данного способа является необходимость создания отдельного канала синхронизации. Этот недостаток устранён в измерителе интегрального состава газовой среды, предложенном в работе [2]. Измеритель интегрального состава газовой среды можно реализовать с помощью устройства, показанного на рисунке 1.

В предложенном измерителе интегрального состава газовой среды реализован принцип измерения набега фазы микроволнового сигнала с использованием гомодинного преобразования частоты измерительного сигнала. При этом изменения набега фазы микроволнового сигнала пропорциональны изменению диэлектрической проницаемости газовой среды. Кроме того, высокая точность измерения набега фазы микроволнового сигнала достигается за счёт того, что длина измерительной трассы много больше длины волны микроволнового сигнала.

Работает измеритель интегрального состава газовой среды, следующим образом. Микроволновые колебания с начальной амплитудой U_{MW1} , частотой f_{MW1} и начальной фазой φ_{MW1} , описываемые выражением

$$u_{MW1}(t) = U_{MW1} \cos(2\pi f_{MW1}t + \varphi_{MW1}), \quad (1)$$

с выхода генератора микроволновых колебаний ГМВ подаются на микроволновый вход амплитудного модулятора АМ, на модуляционный вход которого подаётся низкочастотный синхронизирующий сигнал с частотой F_S , сформированный путём деления частоты сигнала высокочастотного высокочастотного кварцевого опорного генератора ОГ в делителе частоты Д₁

$$u_S(t) = U_S \cos(2\pi F_S t + \varphi_S), \quad (2)$$

где U_S — амплитуда низкочастотного синхронизирующего сигнала; φ_S — начальная фаза низкочастотного синхронизирующего сигнала.

В результате промодулированные по амплитуде микроволновые колебания можно описать при помощи следующего выражения

$$u_{MW2}(t) = U_{MW2} a_S(t) \cos(2\pi f_{MW1}t + \varphi_{MW1}),$$

где $a_S(t) = 1 + M \cos(2\pi F_S t + \varphi_S)$; M — коэффициент амплитудной модуляции.

Сигнал u_{MW2} с частотой f_{MW1} через микроволновый Y-циркулятор Ц₁ подают на антенну А₁, которая первично излучает эти микроволновые колебания в направлении антенны А₂. При распространении микроволновый сигнал приобретает набег фазы $\Delta\varphi_1$, равный

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi f_{MW1}d\sqrt{\epsilon}}{c},$$

где d — длина измерительной трассы; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость исследуемой газовой среды; c — скорость распространения электромагнитных волн.

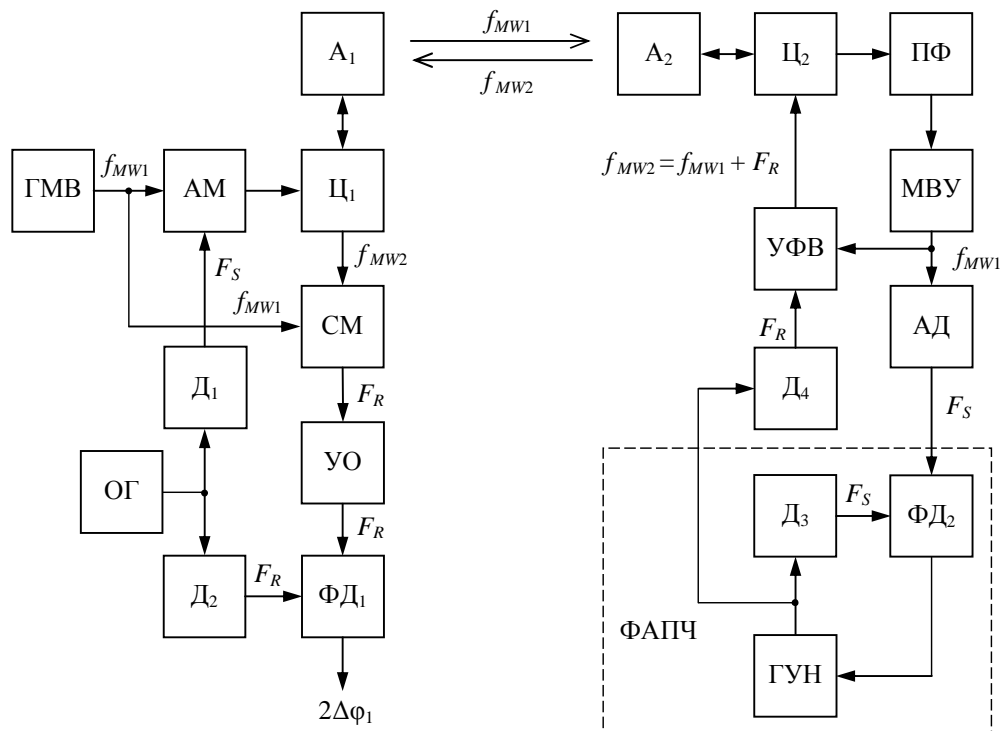


Рисунок 1 — Структурная схема измерителя состава газовой среды

Таким образом, принятые микроволновые колебания имеют следующий вид

$$u_{MW3}(t) = U_{MW3} a_S(t) \cos(2\pi f_{MW1} t + \phi_{MW1} + \Delta\phi_1),$$

где U_{MW3} — амплитуда принятых микроволновых колебаний.

Далее принятые колебания через микроволновый Y-циркулятор Ц₂ подают на полосовой фильтр ПФ, настроенный на частоту f_{MW1} , а потом на микроволновый усилитель МВУ.

Усиленные колебания $u_{MW3}(t)$ демодулируются, при помощи амплитудного детектора АД. Полученный таким образом низкочастотный сигнал имеет вид (2). Этот сигнал $u_S(t)$ с частотой F_S подают на систему фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ, состоящую из фазового детектора ФД₂, кварцевого опорного генератора управляемого напряжением ГУН и делителя частоты Д₃.

Низкочастотный опорный сигнал с частотой F_R , полученный путём деления частоты сигнала высокочастотного высокочастотного кварцевого опорного генератора управляемого напряжением ГУН при помощи делителя частоты D_4 , описывается выражением

$$u_{R2}(t) = U_{R2} \cos(2\pi F_R t + \phi_{R2}),$$

где U_{R2} — амплитуда опорного сигнала; ϕ_{R2} — начальная фаза опорного сигнала.

Опорный сигнал $u_{R2}(t)$ подаётся на управляющий вход управляемого микроволнового фазовращателя УФВ, на сигнальный вход которого подают усиленные микроволновые колебания с частотой f_{MW1} с микроволнового усилителя МВУ. В управляемом микроволновом фазовращателе УФВ в микроволновые колебания с частотой f_{MW1} вносится периодический нарастающий от 0 до 2π фазовый сдвиг с периодом, равным $T_R = 1/F_R$. В результате возникает сдвиг спектра микроволновых колебаний на частоту, равную [3]

$$F_R = \frac{1}{T_R}.$$

Таким образом, осуществляется сдвиг частоты микроволнового сигнала с частотой f_{MW1} на величину, равную частоте F_R .

Трансформированный по частоте микроволновый сигнал с частотой $f_{MW2} = f_{MW1} + F_R$ имеет вид

$$u_{MW4}(t) = U_{MW4} a_S(t) \cos(2\pi f_{MW2} t + \varphi_{MW1} + \Delta\varphi_1 + \varphi_{R2}),$$

где U_{MW4} — амплитуда микроволнового сигнала.

Сигнал $u_{MW4}(t)$ через Y-циркулятор Ц₂ подают на антенну А₂, которая вторично излучает микроволновые колебания в направлении антенны А₁. В результате микроволновый сигнал приобретает дополнительный набег фазы, равный

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi f_{MW2} d \sqrt{\varepsilon}}{c}.$$

Так как частота F_R низкочастотного опорного сигнала много меньше частоты f_{MW1} микроволнового измерительного сигнала, то

$$f_{MW2} = f_{MW1} + F_R \approx f_{MW1}.$$

Следовательно, набег фазы микроволнового сигнала с частотой f_{MW2} приближённо равен

$$\Delta\varphi_2 \approx \frac{2\pi f_{MW1} d \sqrt{\varepsilon}}{c} = \Delta\varphi_1.$$

Микроволновые колебания, принятые антенной А₁, через Y-циркулятор Ц₁ подают на смеситель СМ, вместе с исходными микроволновыми колебаниями (1) с частотой f_{MW1} , в котором происходит гомодинное преобразование частоты. Полученный в результате преобразования низкочастотный сигнал описывается следующим выражением

$$u_{FT}(t) = U_{FT} a_S(t) \cos(2\pi F_R t + 2\Delta\varphi_1 + \varphi_{R2}),$$

где U_{FT} — амплитуда низкочастотного сигнала, полученного в результате гомодинного преобразования частоты.

Сигнал $u_{FT}(t)$ ограничивается по амплитуде в избирательном усилителе-ограничителе УО после чего он принимает вид

$$u_{LF}(t) = U_{LF} \cos(2\pi F_R t + 2\Delta\varphi_1 + \varphi_{R2}),$$

где U_{LF} — амплитуда низкочастотного измерительного сигнала.

Затем сигнал $u_{LF}(t)$ подаётся на сигнальный вход фазового детектора ФД₁, на опорный вход которого подаётся опорный сигнал с частотой F_R и начальной фазой φ_{R1} , полученный путём деления частоты кварцевого опорного генератора ОГ делителем Д₂. Выражение для низкочастотного опорного сигнала имеет следующий вид

$$u_{R1}(t) = U_{R1} \cos(2\pi F_R t + \varphi_{R1}).$$

При условии синхронизации опорных генераторов выполняется следующее равенство $\varphi_{R1} \approx \varphi_{R2}$. Таким образом, на выходе фазового детектора ФД₁ получают сигнал пропорциональный набегу фазы микроволнового сигнала, при его двукратном прохождении измерительной трассы

$$u_{PD}(t) = K_{PD} (2\Delta\varphi_1 + \varphi_{R1} - \varphi_{R2}) \approx 2\Delta\varphi_1 K_{PD},$$

где K_{PD} — коэффициент преобразования фазового детектора.

Зная длину измерительной трассы, можно контролировать изменения относительной диэлектрической проницаемости ε исследуемой газовой среды, а, следовательно, и изменения её интегрального состава.

Погрешность измерения фазы микроволнового сигнала в измерителе интегрального состава газовой среды определяется погрешностью синхронизации опорных генераторов, а также фазовой нестабильностью генератора микроволнового сигнала. В работе [4] показано, что опорные генераторы можно синхронизировать с точностью до 1 градуса. При этом в качестве опорных генераторов достаточно использовать термостатированные кварцевые генераторы с относительной нестабильностью частоты порядка 10^{-7} . В то же время нестабильность начальной фазы микроволнового сигнала влияет на максимальную длину измерительной трассы. С одной стороны, чем длиннее измерительная трасса, тем больший набег приобретает микроволновый сигнал и тем точнее его можно измерить. Однако с другой

сторони, чем длиннее измерительный канал, тем больше время распространения микроволнового сигнала. Увеличение времени задержки микроволнового сигнала в измерительной трассе может привести к тому, что начальные фазы излученного и принятого микроволновых сигналов не будут коррелированы. Рассмотрим подробнее влияние времени задержки микроволнового сигнала на точность определения фазы при гомодинном преобразовании измерительного сигнала.

С учетом наличия дестабилизирующих факторов опорный сигнал, поступающий от микроволнового генератора на первый вход смесителя, можно представить в виде узкополосного сигнала [2] со случайными амплитудой $U_{MW}(t)$ и начальной фазой $\xi(t)$

$$u_{MW1}(t) = U_{MW1}(t) \cos[\psi_{MW1}(t)] = U_{MW1}(t) \cos[2\pi f_{MW1}t + \varphi_{MW} + \xi(t)], \quad (2)$$

где $\psi_{MW1}(t)$ — полная фаза микроволнового сигнала; φ_{MW} — математическое ожидание начальной фазы микроволнового сигнала.

Поскольку амплитуду колебаний можно эффективно ограничить, то в дальнейшем будем считать, что амплитуда является постоянной $U_{MW}(t) = U_{MW} = \text{const}$, при этом формула (2) приобретает вид [2]

$$u_{MW1}(t) = U_{MW1} \cos[\psi_{MW1}(t)] = U_{MW1} \cos[2\pi f_{MW1}t + \varphi_{MW} + \xi(t)]. \quad (3)$$

Рассмотрим функцию $\xi(t)$, представляющую собой флуктуирующий процесс, который изменяется намного медленнее по сравнению с зондирующим микроволновым сигналом.

Измерительный сигнал, поступающий на сигнальный вход смесителя, можно записать в виде [2]

$$u_{MW5}(t) = U_{MW5} \cos[\psi_{MW5}(t)] = U_{MW5} \cos[2\pi(f_{MW1} + F_R)t + \varphi_{MW} + 2\Delta\varphi_1 + \xi(t + \Delta t)], \quad (4)$$

где $\psi'_{MW}(t)$ — полная фаза измерительного микроволнового сигнала; U'_{MW} — амплитуда измерительного микроволнового сигнала; $\xi(t + \Delta t)$ — приращение начальной фазы измерительного микроволнового сигнала, представляющее собой ту же случайную функцию времени t , что и в выражении (2), но запаздывающую относительно последней; Δt — время запаздывания измерительного микроволнового сигнала относительно опорного.

Время запаздывания измерительного микроволнового сигнала относительно опорного, при двукратном прохождении измерительного канала, определяется по формуле

$$\Delta t = \frac{2d}{c},$$

где d — длина трассы; c — скорость распространения электромагнитных волн.

С учетом (3) и (4) разностную составляющую тока, протекающего через нелинейный элемент микроволнового смесителя, определим следующим образом [4]

$$i_P(t) = k U_{MW1} U_{MW5} \cos[2\pi F_R t + 2\Delta\varphi_1 + \xi(t + \Delta t) - \xi(t)], \quad (5)$$

где $k = \text{const}$ — коэффициент преобразования микроволнового смесителя.

Соотношение (5) представим в следующем виде

$$i_P(t) = k U_{MW1} U_{MW5} \cos[2\pi F_R t + 2\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_F(t, \Delta t)],$$

где $\Delta\varphi_F(t, \Delta t)$ — флуктуирующий набег фазы за время запаздывания Δt .

Результаты численного моделирования среднеквадратического отклонения флуктуирующего набег фазы, выраженного в градусах, показаны на рисунке 2. На этом рисунке представлены зависимости среднеквадратической ошибки измерения набег фазы $\sigma_{\Delta\varphi}(d)$ при различных значениях нестабильности частоты опорного генератора: 1 — $N = 10^{-6}$; 2 — $N = 5 \cdot 10^{-7}$; 3 — $N = 10^{-7}$. Длина трассы d изменялась от 0 до 10 км.

Из приведенного графика следует, что погрешность определения фазового сдвига гомодинным методом возрастает при увеличении длины трассы. При длине трассы $d = 10$ км среднеквадратическое отклонение фазового сдвига разностной составляющей тока гомодинного преобразователя частоты равно: при $N = 10^{-6}$ — 0,62 град; при $N = 5 \cdot 10^{-7}$ — 0,31 град; при $N = 10^{-7}$ — 0,07 град.

Кроме этого, из анализа графиков на рисунке 2 можно сделать вывод, что среднеквадратическое отклонение набег фазы $\sigma_{\Delta\varphi}(d)$ нелинейно зависит от длины трассы d и от интервала времени Δt и при увеличении этого интервала неограниченно возрастает. Из этого следует вывод о невозможности долговременных фазовых измерений при использовании классической схемы разнесенного супергетеродинного приема, поскольку погрешности измерений, вызванные флуктуациями фазы колебаний автогенераторов, могут иметь недопустимо большие значения.

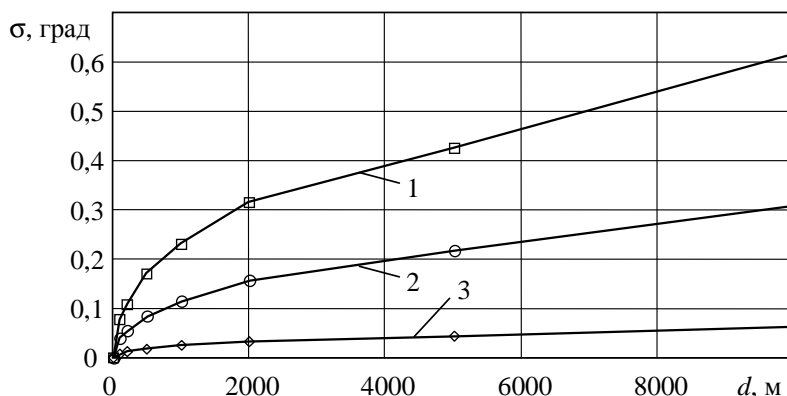


Рисунок 2 — СКО флюктуруючого набігу фази сигналу в залежності від довжини вимірної траси

Из графиков (см. рисунок 2) также следует, что относительные нестабильности частот опорного и синхронизируемого генераторов, составляющие всего 10^{-7} , не влияют на долговременные фазовые измерения. Только длина опорного канала связи (в первом приближении равная длине микроволновой измерительной трассы) определяет дополнительную ошибку измерения фазовых флуктуаций, на микроволновой измерительной трассе. Но при длине трассы до 3 километров, влиянием этой флуктуационной составляющей ошибки можно пренебречь. Таким образом, ошибками в определении фазы микроволнового сигнала, при известных системных допущениях, можно пренебречь. При этом можно производить исследования комплексного коэффициента передачи микроволнового канала связи с точностью до одного градуса.

Задачей дальнейшего исследования является определение влияния соотношения частот синхронизирующего и опорного сигналов, а также глубины модуляции микроволнового сигнала на точность определения набігу фази микроволнового сигнала.

Бibliографический список использованной литературы

1. Пат. 91951 Украины, МПК G01R 29/08, G01R 25/00, H04B 7/00, G01S 3/14, G01S 3/00, H01Q 3/00. Пристрій для виміру флуктуацій набігу фази та кутів приходу мікрохвиль / Широков І.Б., Сердюк І.В.; Заявитель Широков І.Б.; заяв. 22.09.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17.
2. Пат. 95712 Украины, МПК G01N 22/00, A62B 15/00, E21F 17/00. Спосіб контролю змін інтегрального складу газового середовища / Широков І.Б., Сердюк І.В.; Коваль Н.В.; Заявитель Широков І.Б.; заяв. 18.03.2010; опубл. 25.08.2011, Бюл. № 16.
3. Гимпилевич Ю.Б. Радиоволновые гомодинные измерительные преобразователи в системах контроля параметров технологических процессов / Ю.Б. Гимпилевич, И.Б. Широков, С.Н. Поливкин // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2011»: материалы 7-ой междунар. молодежной науч.-техн. конф., 11 – 15 апреля 2011 г. — Севастополь, 2011. — С. 35–37.
4. Сердюк І.В. Исследование воздействия фазового шума на систему синхронизации генераторов через атмосферный канал связи / И.В. Сердюк, И.Б. Широков // Сб. науч. трудов СВМИ им. П.С. Нахимова ВМС ВСУ. — Севастополь, 2010. — Вып. 1 (1). — С. 48–53.

Поступила в редакцию 26.01.2012 г.

Широков І.Б., Сердюк І.В., Коваль Н.В. Мікрохвильовий вимірник інтегрального складу газового середовища серед

Розглянуто принцип побудови мікрохвильового вимірника інтегрального складу газового середовища. Метод вимірювання засновано на визначенні набігу фази мікрохвильового сигналу з використанням гомодинного перетворення частоти вимірювального сигналу. Використання зазначеного методу дозволяє контролювати зміну інтегрального складу газового середовища.

Ключові слова: мікрохвильові коливання, набіг фаз, початкова фаза.

Shirokov I.B., Serdyuk I.V., Koval N.V. The microwave measuring device of integral composition of gas environment

Principles of microwave device to measure the integral composition of gas environment are considered. A measuring method is based on determination of microwave signal phase progression with using of homodyne frequency transformation of measuring signal. This method allows to control the integral composition of gas environment changing.

Keywords: microwave, phase progression, initial phase.