

УДК 614.842

*Курская Т.Н., канд. техн. наук, ст. преп., НУГЗУ,
Иванова Е.П., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
ННЦ „Институт метрологии”*

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ В ТРАКТАХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ТЭС

(представлено д-ром техн. наук Куценко Л.Н.)

В данной работе показана возможность создания датчиков, которые могут обеспечить непрерывный и достаточно точный контроль состава выхлопных дымовых газов, в частности, непосредственно в газоходах ТЭС. Приведены результаты ряда экспериментальных исследований и вариант построения структурной схемы для контроля состава дымовых газов.

Ключевые слова: спектроскопический эффект, газоанализатор, радиоволновой датчик

Постановка проблемы. В числе задач по обеспечению безопасности тепловых электростанций (ТЭС) и котельных одной из наиболее важных является контроль содержания вредных выбросов при их работе [1]. На практике требуется измерять содержание в дымовых газах четырех вредных компонент: серы, углерода, пыли и оксидов азота. В действительности в уходящих газах ТЭС содержится большое количество различных токсичных примесей – ванадий, свинец, ртуть, мышьяк и т.д., но их концентрации считаются допустимыми и не нормируются. Для контроля уходящих газов используются различные приборы отечественного и зарубежного производства с погрешностями измерений от 15% до высокоточных систем с микропроцессорной обработкой.

Однако, газоанализаторные системы, выполненные на основе известных методов и требующие, как правило, пробоотбора, осложняют проведение непрерывного оперативного контроля и автоматизацию процессов регулирования теплотехнического оборудования. Сложность создания подобных систем состоит в необходимости обеспечить многокомпонентность измерений, простоту конструкции, низкую стоимость измерительной системы в производстве и эксплуатации.

В данной работе показана возможность создания для указанных целей радиоволновых датчиков и соответствующих систем

Курская Т.Н., Иванова Е.П.

контроля, которые позволят обеспечить непрерывный контроль отдельных компонент из состава дымовых газов непосредственно в газоходах ТЭС. Принцип работы таких датчиков основан на использовании спектроскопического эффекта резонансного ослабления (поглощения) электромагнитных волн при прохождении их через различные среды. Применение этого эффекта хорошо известно по исследованиям газовой атмосферы планет. Но практически неизвестны примеры, казалось бы, очевидного применения радиоспектроскопии при анализе газовой среды в наземных условиях, в частности, для контроля отходящих газов тепловых станций. Причинами этого были, с одной стороны, высокая стоимость, относительная сложность и весьма ограниченная распространённость рабочей техники (техники миллиметрового - КВЧ диапазона радиоволн), а с другой стороны - низкий уровень требований к экологической безопасности ТЭС.

Анализ последних исследований и публикаций. Проведенный ранее обзор ряда патентов СССР, России, Великобритании, США и Германии [2,3] касался усовершенствований техники СВЧ измерений в области газовой спектроскопии, направленных на повышение чувствительности СВЧ спектрометров, их быстродействия и точности измерений, а также на обеспечение возможности одновременной работы с разными газами. Однако эти решения не могут быть напрямую применены для контроля состава дымовых газов ТЭС, так как имеют дело с газами при значительно меньших давлениях, чем в газоходах ТЭС.

Постановка задачи и ее решение. Для обеспечения экологической безопасности ТЭС наиболее важной задачей является контроль содержания выбросов непосредственно в процессе функционирования. В технике СВЧ для измерения параметров материалов широко распространены резонаторные методы. Спектроскопический эффект обусловлен квантовыми переходами между разными энергетическими уровнями соответствующих сред и веществ при зондировании электромагнитными волнами определенных диапазонов [4]. Измеряя интегральные интенсивности поглощения анализируемого газа на частотах, соответствующих вращательному переходу, можно определить концентрацию анализируемого компонента в общей газовой смеси, которая связана с интегральным коэффициентом поглощения при средних давлениях уравнением

$$\alpha_g = \frac{8\pi^2 N f |\mu_{ij}|^2 \nu^2 \Delta \nu}{3ckT \left[(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta \nu)^2 \right]}, \quad (1)$$

где N – число молекул в 1 см^3 ; f – относительное число молекул в нижнем из двух энергетических состояний, между которыми происходит рассматриваемый переход; $|\mu_{ij}|^2$ – квадрат абсолютного значения матричного элемента дипольного момента для данной компоненты, просуммированный по трем взаимно перпендикулярным направлениям в пространстве; ν – рабочая частота; ν_0 – резонансная частота, равная центральной частоте линии поглощения данного газа; $\Delta \nu$ – полуширина линии поглощения; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Для большинства газообразных сред переходы между вращательными энергиями молекул наблюдаются непосредственно в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Наряду с высокой стабильностью спектров поглощения, причем практически вне зависимости от внешних условий, к очевидным достоинствам СВЧ спектроскопии относятся чрезвычайно высокая разрешающая способность и весьма широкий интервал частот (несколько октав электромагнитного спектра). Каждому газу соответствуют одна или несколько частот, на которых наблюдаются резонансы поглощения. Многие резонансные частоты отходящих газов ТЭС лежат в диапазоне миллиметровых волн. При зондировании газовой среды СВЧ излучением и измерении резонансного поглощения на разных частотах можно с достаточной степенью достоверности установить уровень концентрации соответствующих газов. Это и составляет существо метода СВЧ радиоспектроскопии.

Система контроля дымовых газов на каждом котле ТЭС может быть установлена в одном или в каждом из двух контрольных сечений газохода:

1) за холодным пакетом конвективного пароперегревателя, 2) за дымососом [2]. В первом сечении дымовые газы не искажены присосами воздуха и по составу газов можно судить о характеристиках топчного режима (в частности, по содержанию СО и O_2 - о степени выгорания топлива); именно в этом сечении проводятся измерения при наладочных работах, при диагностике и оптимизации режимов сжигания топлива. Во втором сечении достигается практически полное перемешивание продуктов сгорания и, следовательно, равномерность по сечению концентрационных полей;

поэтому это сечение наиболее удобно для оценки общего количества вредных выбросов на одном котле. Для каждого варианта размещения контрольного оборудования имеются особые требования, устанавливаемые по экстремальным условиям работы газохода [2].

Общие требования и соображения по их реализации достаточно полно указывают направления исследований по созданию радиоволновых датчиков дымовых газов. При этом выбор варианта зависит от конкретных требований без предпочтения какого-либо одного. Основой мы назвали бы радиоволновые методы и, прежде всего, их спектроскопическую ориентацию при исследованиях. Отсюда – важность экспериментальных исследований при выборе оптимальных решений и, следовательно, создания соответствующих измерительных комплексов.

В каждом из таких комплексов должно быть и нерадиотехническое оборудование. При этом традиционные пробоотборные системы не являются обязательными, но для сопоставления и установления достоверности измерений требуется калибровка с помощью эталонных газовых смесей.

В общем случае в состав комплекса должны входить:

- блок датчика, включающий измерительную ячейку, зондирующий генератор, аттенюатор и детекторную камеру;
- блок электроники, включающий блоки питания, блок обработки сигналов, согласующее устройство, терморегулятор;
- блок стабилизации параметров газа, состоящий из фильтра, переключателя каналов по газу, стабилизаторов расхода и давления газа, стабилизатора общего давления;
- блок транспортировки газа, включающий газозаборное устройство, вентиль, холодильник-фильтр;
- блок калибровки, включающий вентиль и образцовые газовые смеси.

Главным компонентом в каждом комплексе является датчик. Принцип работы радиоспектроскопического датчика концентрации компонента газа основан на измерении интегрального коэффициента поглощения анализируемого компонента газа на частотах, соответствующих вращательному переходу. По значению коэффициента поглощения на частоте перехода рассчитывается концентрация анализируемого газа [4]

$$N = (\alpha_{\max} 3ckT\Delta f) / (8\pi^2 \chi |\mu_{ij}|^2 f_0^2). \quad (2)$$

Датчики различаются по диапазону частот, но основным моментом при классификации датчиков является различие в измерительных ячейках, обеспечивающих взаимодействие зондирующего излучения с контролируемой газовой смесью. Датчики могут быть выполнены на базе как закрытых, так и открытых волноводов и резонаторов, а также на базе приёмо-передающих систем пространственного излучения. Ввиду значительной ширины спектральных линий поглощения в обычных условиях работа датчиков возможна и на нерезонансной частоте указанных спектральных линий.

Вариантами контрольных секций являются секции на основе металлических волноводов, объемных резонаторов и резонаторов Фабри-Перо.

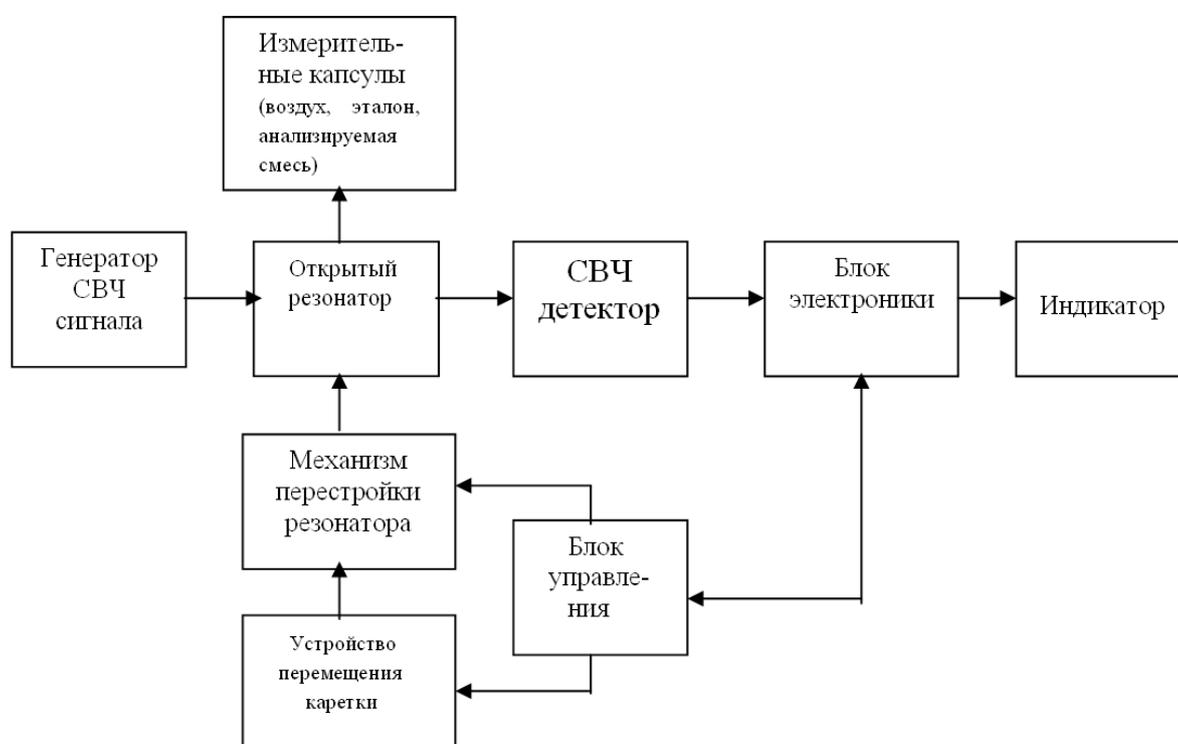


Рис. –Схема измерения многокомпонентной газовой смеси

Схема одного из вариантов системы представлена на рис. В системе имеются:

- три несообщающиеся капсулы - ячейки из радиопрозрачного материала, заполненные соответственно воздухом, образцовой и анализируемой смесью;
- ячейки закреплены неподвижно в прямую линию на общем основании;

- резонатор Фабри-Перо, одно из зеркал которого соединено с СВЧ генератором, а второе – с СВЧ детектором; взаимным перемещением зеркал достигается настройка резонатора на заданную резонансную частоту;

- генератор, зеркала и детектор закреплены на общей подвижной каретке, которая может перемещаться вдоль ячеек и фиксироваться по оси резонатора.

Проведенные частотные измерения поглощения зондирующего сигнала в агрессивном газе (смесь азота и аммиака с концентрацией $(0,767 \pm 0,03)$ объёмн. % представлены в табл.

Таблица

Частота, МГц	Выходное напряжение детектора, мВ (воздух)	Выходное напряжение детектора, мВ (аммиак)	Поглощение мощности, дБ
23868	40,0	7,5	7,25
23869	62,2	4,1	10,7
23870	100,0	3,8	14,2
23871	68,4	5,2	11,3
23872	44,5	8,0	7,4

Экспериментальные исследования по применению в радиоспектроскопии газов коротких закрытых металлических резонаторов, обеспечивающих требуемую эквивалентную длину, при зондировании агрессивного газа (смесь азота и аммиака с концентрацией $(0,767 + 0,03)$ объёмн.% показали:

- резонансное поглощение зондирующего сигнала на частоте основного перехода 23 870 МГц в полосе частот 23 768-23 872 МГц составило 14,2 дБ;

- коэффициент поглощения на единицу длины поглощающей ячейки в резонаторе с эквивалентной длиной 20 м составил $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$.

Выводы. Таким образом, из представленных экспериментальных данных следует, что для регистрации линии поглощения на частоте зондирующего сигнала необходимо обеспечить резонансное ослабление контролируемого газа более 0,05 дБ. Полученные результаты указывают на возможность создания простых,

экономических и надежных радиоволновых систем контроля состава уходящих дымовых газов ТЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Росляков П.В. Методические проблемы контроля газовых выбросов на ТЭС и в котельных / П.В. Росляков, И.А. Закиров, И.Л. Ионкин, Л.Е. Егорова // Вестник МЭИ. – 1997. №4. – С. 25–32.
2. Иванова Е.П. О радиоволновом контроле в трактах газового выброса ТЭС / Е.П. Иванова, С.М. Смольский, А.Е. Ханамиров, А.В. Хрюнов // Вестник МЭИ. – 2004. – №1. – С. 64–69.
3. Гусев В.В. Радиоспектроскопия и контроль газов ТЭС. / В.В. Гусев, Е.П. Иванова, С.М. Смольский [и др.] – Сб. докл. XI междунар. Конф. По спиновой электронике и гировекторной электродинамике. – М.: 2002. – Изд. УНЦ-1 МЭИ (ТУ). – С. 447–486.
4. Таунс Ч. Радиоспектроскопия / Ч. Таунс, А. Шавлов – М.: Изд. иностранной. лит., 1959. – 356 с.

Курська Т.М., Иванова К.П.

Застосування радіохвильових методів контролю у трактах газових викидів ТЕС

В цій роботі показана можливість створення датчиків, які можуть забезпечити безперервний і достатньо точний контроль складу димових газів ТЕС. Наведено результати експериментальних даних та варіант побудови структурної схеми для контролю складу димових газів.

Ключові слова: спектроскопічний ефект, газоаналізатор, радіохвильовий датчик

Kurskaya T.N., Ivanova K.P.

The radiowave methods using in the heat power station gas extras sections

The sensors creation opportunity to provide the continuous and quite exact checking of the smoke exhaust content in particular, gas streams of heat power station is shown in this paper. The experimental research results and structural schedule building variant to check smoke gases content are done.

Key words: spectroscopy effect, gas analysis device, radiowave sensor