

– инфракрасный датчик. Обнаруживают изменения теплового излучения объектов. Работают на основе пироэлектрического эффекта или используют другие методы, например изменение температуры или интенсивности излучения. Используются в системах безопасности, автоматическом освещении и устройствах умного дома [1].

Каждый тип датчика движения имеет свои особенности и применение в зависимости от конкретных требований задачи. Пироэлектрические датчики хорошо подходят для обнаружения теплового излучения живых объектов, микроволновые датчики обладают высокой чувствительностью, ультразвуковые датчики применяются в парковочных системах, а инфракрасные датчики находят широкое применение в системах безопасности и умных домах.

Направления использования датчиков движения:

– лазерное сканирование – процесс использования лазерных лучей для обнаружения и измерения движения объектов в окружающей среде. В основе работы лазерного сканирования датчиков движения лежит скорость прохождения лазерного луча. Датчик посылает короткий импульс лазерного света и измеряет время, необходимое, для возвращения в первичную точку. Измерение времени позволяет определить расстояние до объекта. В современных системах лазерного сканирования используется особый вид датчиков, называемый лидаром (LIDAR – Light Detection and Ranging);

– видеоаналитика – обнаружение движущихся объектов в видеопотоке. Позволяет следить за объектом и автоматически уведомлять об изменении его положения или взаимодействия с другими

объектами. Видеоаналитика с использованием датчиков движения обеспечивает автоматизированную и эффективную обработку видеоданных, что помогает снизить нагрузку на операторов системы видеонаблюдения и обеспечивает более точное и быстрое обнаружение событий;

– радары – устройства измеряющие расстояние до объектов, определяющие их скорость и направление движения. Датчики движения используются в радарх для обнаружения и отслеживания движущихся объектов в окружающей среде. Работают в данном случае на основе эффекта Доплера (возникает при изменении частоты радиоволн, отраженных от движущихся объектов). Измерение изменения частоты позволяет определить скорость объекта относительно радара.

Преимуществами датчиков движения являются:

- повышение безопасности;
- экономия энергии;
- удобство и эффективность.

Датчики движения продолжают развиваться и находят применение во многих сферах. Их возможности постоянно расширяются, а цена и размеры снижаются, что делает их доступными для широкого использования. Будущее датчиков движения связано с их интеграцией в «умные» системы, где они будут играть ключевую роль в создании комфортной, безопасной и эффективной среды для жизненных и рабочих задач.

#### Литература

1. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях / А.Ф. Котюк. – М. : Радио и связь, 2006. – 571 с.

УДК 577.2.08

### МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БИОАЭРОЗОЛЕЙ Люцко К.С.<sup>1</sup>, Филатов С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Описывается разработка мультисенсорной микропроцессорной системы детектирования биоаэрозолей с открытой архитектурой для мониторинга качества воздуха.

**Ключевые слова:** биосенсор, биоаэрозоли, мониторинг качества воздуха.

### MULTISENSORY SYSTEM FOR DETECTION OF BIOAEROSOLS Liutsko K.S.<sup>1</sup>, Filatov S.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

<sup>2</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The development of a multisensor microprocessor-based bioaerosol detection system with an open architecture for air quality monitoring is described.

**Key words:** biosensor, bioaerosols, air quality monitoring.

Адрес для переписки: Люцко К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: liutsko@bntu.by

В настоящее время прямое и косвенное радиационное воздействие аэрозолей на атмосферу признано основным источником неопределенности в моделировании глобального климата,

причем значительную роль играют аэрозоли как антропогенного происхождения (связанных со сжиганием ископаемого топлива, промышленных процессов, работой транспорта) так и естест-

венного происхождения (например, песок, пыльца, бактерии, а также частицы, выбрасываемые в результате эрозии почвы, песка, пожаров). Отдельную проблему представляют биологические аэрозоли, в том числе субмикронного размера, содержащие токсичные веществ. Системы дистанционного, спутникового зондирования, как правило не позволяют определить приземную концентрацию и состав таких аэрозолей, что делает актуальным разработку систем локального и мобильного мониторинга аэрозольного загрязнения атмосферы. Характеристика таких биоаэрозолей имеет важное значение для секторов охраны окружающей среды, общественного здравоохранения и безопасности. Разработка детекторов флуоресценции, индуцированной ультрафиолетовым излучением (UV-LIF), такие как широкополосный интегрированный биоаэрозольный спектрометр (WIBS) и многопараметрический спектрометр биологических аэрозолей (MBS), позволили в режиме реального времени проводить измерения флуоресценции для обнаружения патогенных частиц [1–5].

Целью настоящей работы является разработка сенсорной системы для обнаружения вредных и токсичных биологических аэрозолей а также неорганических аэрозольных частиц в воздухе и воде. Модульная структура системы с открытой архитектурой позволяет расширить диагностические возможности системы, как по оценке размеров частиц, так и по концентрации и типу обнаруживаемых аэрозолей. Система также может быть использована для обучения и верификации работы сенсорных систем других типов.

Решение проблем, связанных с мониторингом качества воздуха, обнаружением и детектированием биоаэрозолей, является сложной комплексной задачей, которая предполагает решение комплекса задач для построения оптимальной методики эксперимента, создания математических моделей, создания новых технических средств детектирования биоаэрозолей, методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных (в том числе с использованием, разрабатываемых средств искусственного интеллекта на основе нейронных сетей). Важное значение имеет локализация проведения экспериментов в реальных климатических условиях и обучение системы в условиях фоновых воздействий и с учетом особенностей природных и техногенных аэрозолей.

Для обнаружения неорганических частиц в воздухе используется измерение рассеянного излучения непрерывного диодного лазера (660 нм). После обнаружения частиц размером до ~1 мкм импульсное УФ излучение 254, 280 нм и 365–370 нм используется для возбуждения биофлуорофоров триптофана и никотинамидадениндинуклеотида (например, E.coli, споры BG (*Bacillus atrophaeus*,

имитация спор *V. anthracis*)). Обнаружение флуоресценции возбуждаемой обеими импульсами свидетельствует о наличии биологической аэрозоли [1]. Ожидаемая скорость регистрации – до 200 частиц в секунду, что достаточно для обнаружения следовых концентраций аэрозольных частиц. Для генерации УФ излучения будут использоваться высокоэффективные лазерные диоды. Для регистрации флуоресценции в диапазоне 300–450 нм и 400–650 нм используются ФЭУ (могут быть использованы High Quantum Efficiency фотодиоды) с интерференционными фильтрами.

Отличительной особенностью установки является использование аэрозольного циклона для концентрирования аэрозольных частиц, а также возможность измерения лазерно-индуцированной флуоресценции отдельных частиц. Аэродинамическая и оптическая схема системы будет спроектирована и оптимизирована с помощью систем CAD, CAE, прототипирование системы выполнено с использованием 3D принтера, что позволяет осуществлять быструю адаптацию системы для решения задач. В отличие от известных систем FLAPS2 (Defence Research Establishment Suffield, Canada), WIBS2 и WIBS3 (Centre for Atmospheric Science, Manchester), разрабатываемая система имеет классическую схему (рисунок 1) детектирования флуоресценции аэрозольных частиц и модульную открытую архитектуру, что в перспективе позволит использовать спектральную информацию для автоматического (AI) распознавания типа аэрозольных частиц после обучения системы.

В прототипе сенсорной системы (рисунок 2), использованы модифицированные датчики аэрозольных частиц Plantower PMS5003 (рисунок 3) и микроконтроллер Arduino UNO.

Дополнительно к сенсору аэрозольных частиц (контроль твердых частиц: Pm10, Pm5, Pm2.5) в прототипе экспериментальной системы используются датчики CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>3</sub>, что позволяет более точно верифицировать возможное происхождение биоаэрозолей.

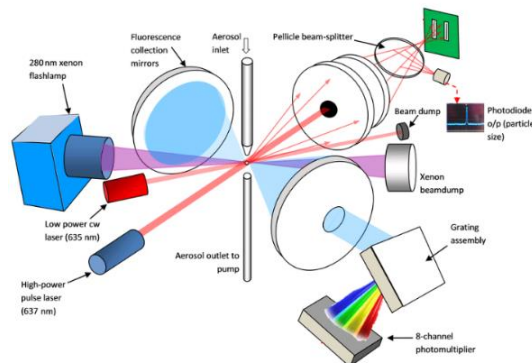


Рисунок 1 – Классическая» схема детектирования флуоресценции аэрозольных частиц [4]

Высокая чувствительность и относительная простота анализа делают лазерно-индуцированную флуоресценцию привлекательной как для аналитических целей, так и для задач технологического контроля, что позволяет обнаруживать вещества с низким квантовым выходом флуоресценции в концентрации  $10^{-11}$ – $10^{-15}$  моль/л.



Рисунок 2 – Прототип установки для детектирования аэрозольных частиц в воздухе

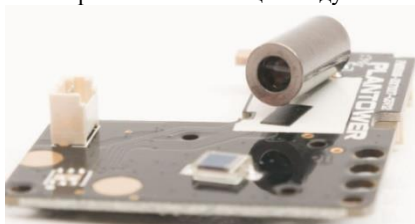


Рисунок 3 – Одноканальный датчик аэрозольных частиц Plantower PMS5003

Разработанная система найдет широкое применение для оценки биологических аэрозолей, как биогенного, так и техногенного происхождения, в системах безопасности и системах мониторинга качества воздуха. Исследование аэрозолей воздуха также станет основой для оптимизации моделей генерации аэрозолей и их роли в глобальных климатических процессах.

#### Литература

1. Bio-aerosol fluorescence sensor / F.L. Reyes [et al.] // Field Anal. Chem. and Technol. – 1999. – № 3 (4–5). – P. 240–248.
2. Single particle fluorescence spectrometer for ambient aerosols / Y-L Pan [et al.] // Aerosol Sci. Tech. – 2003. – № 37. – P. 628–639.
3. Kaye, P.H. A single-particle multichannel bioaerosol fluorescence sensor / P.H. Kaye, W.R. Stanley, E. Hirst // Optics Express. – Vol. 13, № 10. – P. 3583–3593.
4. Evaluation of machine learning algorithms for classification of primary biological aerosol using a new UV-LIF spectrometer / S. Ruske [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2017. – № 10. – P. 695–708.
5. Systematic characterization and fluorescence threshold strategies for the wideband integrated bioaerosol sensor (WIBS) using size-resolved biological and interfering particles / Savage, N.J. [et al.]. – 2017.

УДК 621.455.4

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ В МИКРО- И НАНОТЕХНИКЕ

Подвицкий Н.В., Люцко К.С.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Целью работы является исследование устройства, назначения и типологии электромагнитных МЭМС-переключателей, теоретическое исследование проводилось методом анализа литературы и нормативных источников.

**Ключевые слова:** исследование, МЭМС, переключатель, датчик, актюатор, кантилевер.

### ELECTROMAGNETIC SWITCHES IN MICRO- AND NANOTECHNOLOGY

Podvitskiy N.V., Liutsko K.

*<sup>1</sup>Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The purpose of the work is to study the design, purpose and typology of electromagnetic MEMS switches, theoretical research was carried out by analyzing literature and regulatory sources.

**Key words:** research, MEMS, switch, sensor, actuator, cantilever.

*Адрес для переписки: Люцко. К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: liutsko@bntu.by*

Микроэлектромеханическими системами (МЭМС) называют класс механических и электронных устройств размерами менее 100 мкм. В их числе встречаются датчики давления и температуры, акселерометры, кварцевые генераторы, биморфные актюаторы и прочие миниатюрные приборы. Зачастую ющейся в единицах фемтофарад. Переключатель с емкостными контактами является, по-сути, дискретно перестраиваемым

конденсатором, у которого отношение емкостей во включенном и выключенном состоянии  $C_{вкл}/C_{выкл}$  может достигать 100 [1]. Переключатели такого типа характеризуются крайне малыми потерями на высоких частотах (0,1 дБ на 40 ГГц) и высокой линейностью (более 66 дБм). Управляющее напряжение, приложенное к переключателю с емкостными контактами, ниже по сравнению с резистивными ведь нет необходимости в