

Общество с ограниченной ответственностью "РОЗЕТ"

УДК: 621.389

Регистрационный №АААА-А17-117071020006-5

Инв. №2018-0130

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
Пуляев А. В.
" " 2018 г.



ОТЧЕТ
о выполнении НИОКР по теме:
"Разработка макетного образца детектора радона"
(договор №1895ГС1/26942 от 22.03.2017)

(заключительный)

Руководитель работ

Пуляев А. В.

подпись, дата



Санкт-Петербург, 2018

1. Реферат

Отчет 127 с., 34 рис., 1 табл., 16 приложений, 16 источников

Ключевые слова: детектор радона, импульсная ионизационная камера, электростатическая ловушка дочерних продуктов распада, микроконтроллер, усилитель заряда, формирователь импульса, инструментальный усилитель, алгоритм обнаружения импульса, цифровая фильтрация, топология печатной платы, программное обеспечение, дизайн корпуса, графический дисплей, MEMS-сенсоры.

Цель работы: Разработка макетного образца детектора радона и дочерних продуктов его распада.

Работа выполняется на основании Технического задания к Заявке № С1-22704 2-й этап проекта 26942, договор №1895ГС1/26942 от 22.03.2017 г..

Цели работы – Разработка принципиальной электрической схемы макета; Разработка топологии печатной платы макета; Разработка сборочных чертежей электронной части макета; Разработка алгоритмов программы для макета; Разработка программы для макета; Разработка корпуса; Сборка макета; Проведение испытаний макета.

Методы разработки – литературный обзор для выяснения достигнутого на сегодняшний день уровня техники, патентный поиск с использованием баз патентных данных USPTO, ESPACENET, FindPatent, сравнение существующих методов детектирования радона с целью выявления наиболее перспективного для создания дешевого, высокоэффективного детектора радона, выяснение недостатков выбранного метода и их устранение, разработка структурной схемы устройства, выбор элементной базы с учётом ограничений по себестоимости, разработка принципиальной схемы устройства с использованием методов математического моделирования в САПР NI Multisim, разработка топологии печатной платы устройства по принципиальной схеме с использованием САПР PCAD и Altium Designer, разработка алгоритма функционирования прибора, кодирование алгоритма на языке C/C++/Wiring, отладка с использованием симулятора среды разработки Atmel Studio, макетирование принципиальной схемы на печатной плате и лабораторные исследования макета, разработка дизайн-концепции и макета корпуса в среде Solid Works, доработка электронной части в соответствии с дизайном корпусно-механической части, калибровка, сборка, отладка, проведение испытаний полнофункциональных действующих макетов.

Достигнутые результаты – выбран наиболее перспективный метод детектирования радона и измерения его ЭРОА, модифицирован с целью устранения недостатков, выбрана элементная база устройства, разработана принципиальная схема устройства, реализующего данный метод, разработано программное обеспечение устройства, разработан и испытан в лабораторных условиях макет электронной платы устройства. Внедрена технология передачи данных с прибора на серверы IoT («интернета вещей») в режиме реального времени. Реализовано также подключение дополнительных датчиков, расширяющих функционал устройства. В ходе проекта первоначальная конструкция ионизационных камер усовершенствована, с целью снижения их высоты и повышения вероятности регистрации альфа-частиц. Создана дизайн-концепция корпусно-механической части, разработан и изготовлен макет корпуса, собран полнофункциональный действующий макет прибора, проведены калибровки и испытания. Испытания макета показали, что цели Технического задания полностью достигнуты выбранными методами и предложенными техническими решениями. Ряд характеристик разработанного прибора значительно превосходят характеристики отечественных и зарубежных конкурентов и открывают возможность более широкого использования созданного устройства, чем предполагалось изначально.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики разработанного устройства:

- чувствительность к ДПР радона: 15 импульсов в минуту на 100 Бк/м³.
- время начальной экспозиции: 10 минут.
- периодичность измерений: 1 минута.
- диапазон измерения ЭРОА: 1 – 10 000 Бк/м³.
- габариты: 140x80x40 мм.
- масса: 245 г.
- себестоимость: 2408 руб.

Степень внедрения – завершена стадия НИОКР, разработана техническая документация, изготовлены и испытаны действующие полнофункциональные макеты.

Экономическая эффективность разработанной технологии и прибора обусловлена отсутствием дорогостоящих и дефицитных компонент, использованием современных информационных технологий и позволяет снизить себестоимость прибора по сравнению с лучшими конкурентами (например, RadonEye компании Radon FTLab) не менее, чем на 50% при значительном улучшении основных технических характеристик.

Для внедрения разработанной технологии и прибора, рекомендуется выполнить следующий перечень организационно-технических мероприятий:

- Произвести опытную серию устройств.
- Провести серийные испытания.
- Привлечь инвесторов для внедрения продукта на рынок.
- Разработать рыночную стратегию продвижения продукта.

Прогноз развития – в соответствии с имеющимися научно-техническими и рыночными тенденциями, будет повышаться степень интеграции подобных устройств и систем (интегрирование всё большего числа сенсоров в одном приборе), увеличиваться количество выполняемых функций, будут выполняться не только измерительные функции, но и функции оповещения, в т.ч. с использованием соц. сетей, функции автоматического управления, в т.ч. интеграция в «умный дом», «умный город», снижаться себестоимость за счёт повышения степени интеграции и развития элементной базы. В части основной функции (измерения ОА/ЭРОА радона) в среднесрочной перспективе (3-5 лет) будут внедряться самые передовые технологии, подобные GEM/RETGEM и MICROMEGAS ввиду ожидаемого снижения себестоимости сенсоров, использующих эти технологии. При разработке устройства были учтены указанные тенденции и прогнозы, что позволяет использовать данную разработку в качестве быстро развиваемой платформы, способной оперативно реализовывать прогнозируемые тенденции.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель
канд. техн. наук




подпись, дата

И. Мисюченко (введение,
заключение, разделы 1, 2, 3, 7, 10,
12, приложение П)

Исполнители темы:

инженер-программист



подпись, дата

С.А. Голованов (разделы 4, 5, 11,
приложение Д,Р)

генеральный директор



подпись, дата

А. В. Пуляев (подраздел 1.5,
подраздел 1.6, разделы 8, 9, 10, 11,
Приложения А, Б, В, Г, И, К, Л, М,
Н, С, Т)

инженер-конструктор



подпись, дата

А. В. Востриков (раздел 6,
Приложения Е, Ж)

нормоконтроль



подпись, дата

А.В. Пуляев

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Определения | 7 |
| Обозначения и сокращения..... | 8 |
| Введение | 9 |
| 1 Разработка принципиальной электрической схемы макета..... | 16 |
| 1.1 Разработка сенсора альфа-частиц и электростатической ловушки ДПП радона..... | 16 |
| 1.2 Повышение чувствительности детектора радона с помощью электростатической ловушки ДПП | 17 |
| 1.3 Устранение недостатков импульсной открытой ионизационной камеры | 18 |
| 1.4 Совмещение функций ловушки и ионизационной камеры в одной конструкции..... | 20 |
| 1.5 Электроника сенсора-ловушки | 22 |
| 1.6 Принцип действия детектора радона..... | 23 |
| 1.7 Устройство электронной части детектора радона..... | 25 |
| 1.8 Требования к принципиальной схеме устройства | 27 |
| 1.9 Выбор элементной базы..... | 28 |
| 1.10 Принципиальная схема устройства..... | 29 |
| 2 Разработка топологии печатной платы макета..... | 31 |
| 2.1 Топология сенсора-ловушки..... | 31 |
| 2.2 Специфические требования к печатной плате и монтажу..... | 32 |
| 3 Разработка сборочных чертежей электронной части макета..... | 33 |
| 4 Разработка алгоритмов программы для макета..... | 34 |
| 4.1 Алгоритм работы устройства в целом..... | 34 |
| 4.2 Алгоритм детектирования импульсов альфа-частиц | 35 |
| 5 Разработка программы для макета..... | 37 |
| 6 Разработка эскиза и конструкторской документации корпуса макета | 38 |
| 6.1 Выбор дизайн-концепта | 38 |
| 6.2 Разработка макета по выбранному дизайн-концепту | 40 |
| 7 Доработка топологии печатной платы и сборочных чертежей | 41 |
| 7.1 Формирование требований к доработке..... | 41 |
| 7.2 Выявленные на 1-м этапе работ недостатки и способы их устранения | 43 |
| 7.3 Разработка модифицированного сенсора-ловушки | 45 |
| 7.4 Внедрение дополнительного набора сенсоров и модулей в прибор | 47 |
| 8 Изготовление и сборка электронных плат..... | 49 |
| 9 Изготовление корпусов макетов | 50 |
| 10 Сборка образцов макетов | 52 |
| 11 Отладка образцов макетов, в т.ч. программы..... | 54 |
| 12 Проверка образцов макетов..... | 55 |
| 12.1 Тестирование макета электронной платы устройства..... | 55 |

| | | |
|------|--|-----|
| 12.2 | Тестирование электроники устройства в режиме регистрации альфа-частиц искусственного источника | 56 |
| 12.3 | Тестирование электроники устройства в режиме накопления ДПР радона..... | 58 |
| 12.4 | Калибровка макета..... | 60 |
| 12.5 | Поверочные испытания образцов макетов | 66 |
| | Заключение | 72 |
| | Список использованных источников..... | 74 |
| | Приложение А Принципиальная схема устройства..... | 76 |
| | Приложение Б Перечень компонентов и материалов электронной платы | 77 |
| | Приложение В Чертеж топологический печатной платы | 79 |
| | Приложение Г Сборочный чертеж печатной платы | 81 |
| | Приложение Д Исходный текст программы прибора..... | 82 |
| | Приложение Е Дизайн-концепции корпуса прибора | 88 |
| | Приложение Ж Чертежи макета корпуса | 89 |
| | Приложение И Доработанная схема электрическая принципиальная | 94 |
| | Приложение К Доработанный перечень компонентов и материалов электронной части | 95 |
| | Приложение Л Доработанный чертеж топологический печатной платы | 97 |
| | Приложение М Доработанный сборочный чертеж печатной платы..... | 99 |
| | Приложение Н 3D-модель электронной платы прибора..... | 100 |
| | Приложение П Уведомление о приеме и регистрации заявки на полезную модель | 101 |
| | Приложение Р Текст отлаженной программы макета | 111 |
| | Приложение С Протокол испытаний..... | 123 |
| | Приложение Т Акт испытаний..... | 126 |

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями (в алфавитном порядке).

Аэрозоли - дисперсная система, состоящая из взвешенных в газовой среде (дисперсионной среде), обычно в воздухе, мелких частиц (дисперсной фазы). Частицы могут быть как твёрдыми, так и каплями различных жидкостей.

Беккерель – единица активности изотопов, количество распадов образца изотопа в одну секунду

Беккерель на кубический метр – единица объёмной активности изотопов, количество распадов изотопа, содержащегося в одном кубическом метре среды за одну секунду. Таким образом, величина ОА радона 100 Бк/м^3 означает, что в каждом кубометре воздуха происходит 100 распадов атомов радона в секунду.

Дочерние продукты распада – разнообразные изотопы, возникающие в процессе распада родительского изотопа. Дочерними продуктами распада газообразного радона являются изотопы висмута, свинца, полония, т.е. металлы. В воздухе присутствуют в виде аэрозолей.

Ионизационная камера – газовый конденсатор, содержащий как минимум два электрода и газовый промежуток между ними.

Открытая ионизационная камера – ионизационная камера, в которой рабочим газом служит атмосферный воздух

Объёмная активность радона – количество распадов в единице объёма за единицу времени

Эквивалентная равновесная объёмная активность радона – количество распадов радона и продуктов его распада в единице объёма за единицу времени, в предположении что радон находится в равновесии со своими продуктами распада.

Эманыции – все газообразные радиоактивные производные уранового, ториевого и актиниевого рядов элементов

Электростатическое осаждение – процесс осаждения аэрозолей из воздуха на электрически заряженные поверхности

Электростатическая ловушка – устройство для осуществления процесса электростатического осаждения на собственную поверхность

Эксхалация радона – процесс выделения радона с поверхности материалов

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете применяются следующие сокращения:

| | | |
|-------|---|---|
| АЦП | - | Аналого-цифровой преобразователь |
| ГОСТ | - | Государственный стандарт |
| ДПР | - | Дочерние продукты распада радона |
| ИИП | - | Импульсный источник питания |
| ИК | - | Ионизационная камера |
| ИУ | - | Инструментальный усилитель |
| ЛВС | - | Локальная вычислительная сеть |
| МК | - | Микроконтроллер |
| МЭМС- | | Микроэлектромеханические системы |
| ОЗУ | - | Оперативное запоминающее устройство |
| ОС | - | Операционная система |
| ОУ | - | Операционный усилитель |
| ОА | - | Объёмная активность |
| ПО | - | Программное обеспечение |
| ПК | - | Персональный компьютер |
| ПЭВМ- | | Персональные электронно – вычислительные машины |
| САПР | - | Система автоматизированного проектирования |
| ТЗ | - | Техническое Задание |
| УН | - | Умножитель напряжения |
| ЦАП | - | Цифро-аналоговый преобразователь |
| ШИМ | - | Широтно-импульсная модуляция |
| ЭРОА | - | Эквивалентная равновесная объёмная активность |

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к радиологическому воздействию радона на население возник в начале 80-х годов и первые же работы показали, что концентрация радона в воздухе жилых домов, особенно одноэтажных, часто превышает даже уровень предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для работников урановых рудников, где служба безопасности традиционно борется за снижение накопления радиологически опасных концентраций радона. Согласно расчетам Британского Бюро защиты от радиации, в Великобритании ежедневно погибают 2500 человек от рака легких, вызванного радиоактивным газом радоном. По данным Агентства окружающей среды в США ежегодно около 20 тысяч онкологических заболеваний инициируется радоном и продуктами его распада. Также остра проблема радиологического воздействия радона на население в Швейцарии, Швеции, Финляндии, Австралии, отдельных регионах Российской Федерации [1,2]. Распределение вкладов в дозовую нагрузку от различных источников облучения и средние дозы облучения по различным регионам Российской Федерации отражены на рис. 1.

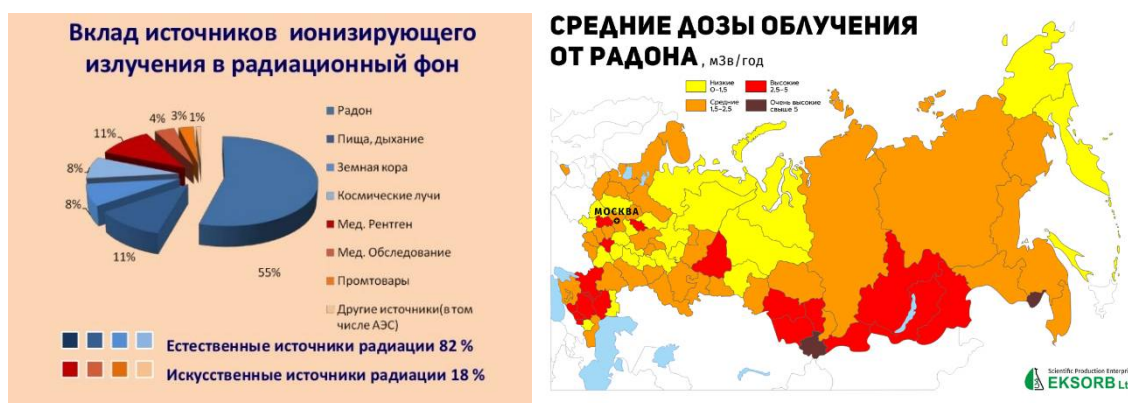


Рисунок 1 - Вклад в годовую дозовую нагрузку населения различных источников и «радоновая карта» РФ.

Общий вклад естественного облучения в дозовую нагрузку составляет около 82%. Если в обучении человека от естественных источников космическое излучение дает почти 8-ми процентный вклад в общую дозу облучения, внешнее и внутреннее естественное гамма – излучения 19%, то вклад радона оценивается в 55%. Этот факт вызвал громадный интерес к радоновой проблеме практически во всех развитых странах, поскольку более половины годовой дозы от всех природных источников излучения человек получает через воздух, облучая радоном свои легкие во время дыхания. Основная проблема состоит в том, что человек находится в зоне облучения постоянно: в школе, дома, на отдыхе, а также на рабочем месте. Поэтому радоновая проблема стала одной из основных в радиационной экологии. Изотопы радона ^{222}Rn и ^{220}Rn образуются при распаде ^{226}Ra (в семействе U) и ^{224}Ra (в семействе Th). Это

единственные в них газообразные продукты, так называемые эманации [2,3]. Радон образуется в породах в местах нахождения радия, растворяется в грунтовых водах или диффундирует по трещинам и пустотам, а затем попадает в атмосферный воздух. Как и инертный газ, радон практически не сорбируется минералами и может удерживаться в породах только чисто механически, а попадая в воздух, довольно быстро рассеивается в атмосфере. Долгое время считали, что благодаря таким свойствам он не оказывает существенного радиационного воздействия на человека, тем более что оба его изотопа, как α -излучатели, не влияют на измеряемую величину естественного γ -фона.

Однако детальная оценка дозы внутреннего облучения показала существенное значение радона: он дает примерно половину (или даже немного больше) общей дозы от всех природных источников, вместе взятых [1,2]. Радиобиологический эффект самого радона невелик, действуют в основном его короткоживущие дочерние продукты - ^{218}Po , ^{214}Pb и ^{214}Bi . Решающее значение имеет облучение легких, куда радон поступает со вдыхаемым воздухом. Радон хорошо растворяется в крови и других биологических жидкостях, однако надолго в организме он не задерживается и не накапливается.

В начале 1980-х гг. определённая переоценка роли радона в радиационной нагрузке на человека вызвала всплеск внимания к определению его содержания в жилых и производственных помещениях. Было выявлено множество реальных ситуаций, способствующих накоплению радона в концентрациях, в десятки и сотни раз превышающих обычные. Обсуждению радоновой опасности посвящено множество исследований, также существуют государственные программы по борьбе с ней.

Среднее содержание радона в приземном слое воздуха обычно невелико, около 2-10 Бк/м³, но на открытой местности оно может значительно возрастать, например, в туман, безветрие и при отсутствии интенсивных вертикальных потоков воздуха. Также скорость эманации радона из грунта подвержена и сезонным изменениям: минимальна зимой и повышена летом.

Накопление радона в воздухе помещений связано с его проникновением через щели в полу или с эманацией из стен и других строительных конструкций. При плохом проветривании концентрация радона в подвальных помещениях и на первых этажах может возрастать в десятки, сотни и даже тысячи раз. Допустимое содержание радона в воздухе помещений установлено в 100-400 Бк/м³. Абсолютно безопасным считается уровень менее 50 Бк/м³. Герметизации межэтажных перекрытий и другие меры по энергосбережению, практикующиеся в северных странах, могут, с одной стороны, ограничить попадание радона в здание через подвальные помещения, а с другой - затруднить его отток, что может вызвать нарастание концентраций радона внутри плохо проветриваемых помещений. Организация хорошо

продуманной системы вентиляции, включая и вентиляцию подпольного пространства, а также надежное изолирование подвальных помещений от эманации из грунта (например, бетонированием) радикально решает проблемы, связанные с накоплением радона. На верхних этажах многоквартирных жилых домов таких проблем, как правило, нет, так как здесь его концентрация всегда в несколько раз ниже, чем на первом этаже. Пути попадания радона в помещения схематически отражены на рис. 2.



Рисунок 2 - Пути попадания радона в дом.

Внутри помещений эманирование радона зависит от содержания ^{226}Ra в использованных стройматериалах, а также от микроструктуры этих материалов и изменения последней при технологической обработке (при цементировании, высокотемпературной обработке в т. п.). В частности, эманирование радона из стройматериалов, спекавшихся в результате высокотемпературной обработки (красный кирпич, цемент, зола, шлак, природный вулканический туф) на порядок меньше, чем из материалов, не подвергавшихся такой обработке (силикатный кирпич, песок, щебень, гравий). Мерами, заметно уменьшающими эманиацию, служат окрашивание стен масляной краской, использование моющихся обоев с полимерным покрытием и т. п. Замедление диффузии радона по порам материала способствует тому, что значительная часть ^{223}Rn и практически весь ^{220}Rn распадаются еще за время диффундирования до выхода в воздух.

В деревянных сельских домах концентрации радона в воздухе обычно невелики, однако зимой здесь может проявиться так называемый эффект дымовой трубы, или стек-эффект, вызванный подсасыванием радона из грунта под домом вследствие перепада температур и давления, особенно при плохой изоляции дома от погреба.

Дополнительным источником поступления радона в жилые помещения может оказаться вода из артезианских скважин (чего никогда не бывает с водой, приходящей в дома из открытых водоемов, так как радон быстро улетучивается в атмосферу).

Артезианская вода, в которой содержание радона достигает 10^2 - 10^3 Бк/л (в Хельсинки отмечено до 10^5 Бк/л), совершенно не опасна при приготовлении пищи (при кипячении воды радон улетучивается), но может обусловить накопление высоких концентраций радона в воздухе закрытых помещений, например, во время принятия душа в ванной комнате. При принятии радоновых ванн на бальнеологических курортах концентрация радона в воздухе может достигать до 10^5 Бк/м³.

Еще одним, хотя и небольшим, источником поступления радона является природный газ, который изначально содержит его в концентрациях порядка 100-1000 Бк/м³ (в газе из Северного моря - намного меньше, 35 Бк/м³). Концентрация радона в газе, поступающем на газовую плиту, зависит от времени транспортировки: за 2-3 недели перекачки газа по трубопроводам ^{222}Rn распадается на 92-98% (период его полураспада равен 3,8 сут.).

Таким образом, радоновая проблема имеет большое значение в т.ч. и для Российской Федерации. Одним из эффективных путей решения этой проблемы является вовлечение населения в её решение. Для того, чтобы это сделать необходимо: повысить информированность населения о радоновой проблеме и методах борьбы с повышенным содержанием радона, обеспечить наличие на рынке широко доступных, недорогих, современных бытовых измерительных приборов. Методы борьбы с повышенным содержанием радона в воздухе достаточно просты, доступны населению и эффективны: прежде всего хорошая вентиляция помещений, использование радиационно-безопасных строительных материалов, знание и соблюдение правил работы с газовым и водяным оборудованием в случае повышенных концентраций радона в воде или природном газе. Ключевым моментом является наличие широкодоступной бытовой измерительной техники, позволяющей непрерывно измерять уровень радона (т.е. проводить не только быстрые однократные измерения, но и вести непрерывный мониторинг в течении длительного времени). В настоящем отчёте освещается первый этап разработки такого устройства. Поскольку вдыхаемый радон опасен не столько сам по себе, сколько своими продуктами распада, то для оценки степени опасности для здоровья человека необходимо регистрировать не только радон, но и альфа-активные продукты его распада. Оценка радоновой обстановки с учётом продуктов распада радона отражается, как правило, в показателе, именуемом «эквивалентной равновесной объёмной активностью» (ЭРОА) радона. Для достаточно точной, а главное, быстрой оценки ЭРОА требуется повышать концентрацию ДПР вблизи сенсора альфа-частиц. Это делают, применяя различные методы накопления ДПР [4]: метод аэрозольного фильтра, абсорбцию на активированном угле, электростатическое собирание ДПР. Большую роль в эффективности прибора играют как сенсор, так и способ накопления анализируемых ДПР. Поэтому центральное место в подобных

устройствах всегда занимает, во-первых, метод накопления дочерних продуктов распада радона (ДПР), а во-вторых, собственно сенсор, регистрирующий акты распада ДПР.

Методы определения концентрации радона, не использующие накопление, требуют очень большого времени измерений и для оперативного мониторинга непригодны. Методы с накоплением, требующие прокачки воздуха через аэрозольные фильтры, мембраны или активированный уголь, хотя и высокоэффективны, однако связаны с использованием расходных материалов, их регулярной заменой, специальными навыками и знаниями и используются, в основном, в профессиональном оборудовании. Для бытового применения они малопригодны. В то же время методы накопления ДПР радона, связанные с их электростатическим осаждением на проводящую поверхность (электростатическую ловушку) широко применяются в последние 20 лет как в профессиональном, так и в бытовом измерительном оборудовании. Этот метод основан на том факте, что ДПР радона в основном являются положительными ионами и, как следствие, интенсивно оседают на отрицательно заряженных поверхностях (проводах, сетках, фольгах и т.п.). Поэтому в качестве базового метода накопления ДПР был взят именно метод электростатического осаждения [6]. Электростатические ловушки ДПР, описанные в литературе, имеют ряд недостатков, которые для создания эффективного устройства требуется устранить. Так, например, традиционно ловушки строятся как открытые воздушные конденсаторы, суммарный электрический заряд которых близок к нулю. Это происходит потому, что источник высокого напряжения, как правило, включается между «землей» схемы и близко расположенным собирающим электродом ловушки. За счёт работы источника напряжения часть электронов переносится с одного проводника на другой, но суммарный электрический заряд прибора при этом остаётся нулевым. В результате область эффективного электрического поля таких ловушек сосредоточена между собирающим электродом и «землей» прибора и, при небольших габаритах прибора оказывается невелика, что приводит к осаждению ДПР только из небольшой по объёму области воздуха, близко прилегающей к ловушке.

В качестве сенсора в профессиональном оборудовании, как правило, используются те или иные детекторы альфа-частиц, поскольку именно альфа-активные изотопы наносят наибольший вред при вдыхании и, кроме того, другие источники альфа-фона (не связанные с радоном и его ДПР) практически не вносят никакого вклада из-за очень малой длины свободного пробега альфа-частиц в воздухе (4-8 см). Альфа-частицы регистрируются различными сенсорами: сцинтилляционными датчиками, ионизационными камерами, полупроводниковыми детекторами. Сцинтилляционные датчики как правило имеют в своём составе сцинтиллятор (вещество, дающее короткие световые вспышки при облучении альфа-частицами) и фотоумножитель, либо его полупроводниковый аналог. Это достаточно дорогое и

сложное в эксплуатации оборудование. Для бытового устройства оно малоприспособлено. Полупроводниковые детекторы распространены гораздо шире, фактически именно они чаще всего используются в бытовых радиометрах радона и его ДПР. Однако и эти сенсоры имеют высокую стоимость, связанную с необходимостью выращивания монокристаллов высокочистого полупроводника больших размеров. В то же время открытые (воздушные) ионизационные камеры, являясь исторически первыми сенсорами альфа-частиц, до сих пор не утратили своего научно-технического значения и достаточно широко используются, в т.ч. и в бытовом и в профессиональном измерительном оборудовании. По сути, открытая ионизационная камера представляет собой воздушный конденсатор, между обкладками которого создана значительная разность потенциалов. Их себестоимость несопоставима с себестоимостью полупроводниковых или сцинтилляционных датчиков, она ниже более чем в 100 раз. Способность же её регистрировать альфа-частицы потенциально ненамного хуже среднего полупроводникового датчика, для целей же счёта частиц, например, (когда не требуется точный анализ энергий частиц) она подходит практически идеально. Соответственно, в качестве основы для разработки сенсора бытового прибора низкой себестоимости был выбран принцип открытой воздушной ионизационной камеры. Разумеется, такая камера имеет ряд характерных для неё недостатков [3,10], которые в ходе разработки устройства необходимо устранить. В частности, ионизационная камера весьма чувствительна к механическим вибрациям и звуковым колебаниям, поскольку является по своей конструкции электростатическим микрофоном, она не терпит попадания внутрь пыли, капель влаги и интенсивного движения воздуха. Все эти факторы вызывают многочисленные ложные срабатывания приборов, оборудованных открытыми ионизационными камерами.

В соответствии вышеописанным состоянием уровня техники было осуществлено планирование научно-технического уровня разработки. В частности, было установлено, что инкрементальное совершенствование присутствующих на рынке технологий является достаточно дорогостоящим и трудоемким, поскольку большинство технических систем в этом сегменте находятся на поздних стадиях технического развития. Соответственно, для получения значительного улучшения технических и экономических характеристик продукта требуются «прорывные» инновации. Такие инновации, как правило, затрагивают принцип действия технических систем. Следовательно, одной из основных задач разработки является внесение существенных изменений в принцип действия устройства. Такое требование повышает ожидаемый научно-технический уровень разработки, требуя значительного вклада в научную компоненту. С другой стороны, рыночные тенденции к быстрому снижению себестоимости при миграции технических систем с профессионального на бытовой уровень требуют использования максимально дешевых технических решений. Такие решения известны (например, открытая ионизационная камера), но устранение присущих им недостатков является

сложной технической задачей. Для решения этой задачи традиционно используются методы объединения альтернативных систем, что приводит к высокому уровню новизны получаемых решений. Таким образом, в данной разработке планировалось как внесение существенных изменений в принцип действия физического сенсора с целью многократного повышения его чувствительности (высокий научный уровень), так и радикальное улучшение технических характеристик открытых ионизационных камер, устранение присущих им традиционных недостатков (повышенный технический уровень).

Патентные исследования показывают, что принцип регистрации уровня радона по его ДПР давно известен и применяется. В то же время в мировом уровне техники отсутствуют патенты, в которых раскрывалась бы конструкция, объединяющая электростатическую ловушку и ионизационную камеру. В связи с этим отсутствуют какие-либо препятствия в виде патентов для использования электростатического принципа для повышения чувствительности детектора радона.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что патентная ситуация не препятствует достижению запланированного научно-технического уровня разработки.

1 Разработка принципиальной электрической схемы макета

1.1 Разработка сенсора альфа-частиц и электростатической ловушки ДПР радона

Поскольку работа прибора в очень большой степени обусловлена свойствами его сенсора продуктов распада радона, то разработка принципиальной схемы велась методом «снизу-вверх» от сенсора. Рассмотрим сначала работу сенсорной части прибора. Традиционные аналогичные устройства содержат сенсор, осуществляющего регистрацию актов распада радона и/или его ДПР. Сенсоры обычно располагаются в регистрационных камерах, в которые радон и/или его ДПР проникают путем естественной конвекции воздуха либо нагнетаются с помощью насоса, задача которого состоит в повышении концентрации радиоактивных нуклидов вблизи сенсора прибора.

В случае естественной воздушной конвекции концентрация радона и/или его ДПР в регистрационной камере совпадает с концентрацией в окружающем воздухе и чувствительность прибора зависит от объема регистрационной камеры. В случае малого объема прибор обладает низкой чувствительностью и может регистрировать только высокие уровни радона. В то же время увеличение размера регистрационной камеры приводит к существенному росту габаритов прибора.

Применение насоса позволяет повысить концентрацию радона и его ДПР в регистрационной камере, однако насос является дорогостоящим элементом, который существенно повышает себестоимость прибора и ограничивает срок его службы вследствие наличия в насосе движущихся и изнашивающихся частей.

Широко применяемые сенсоры частиц также имеют ряд существенных недостатков. Например, полупроводниковые сенсоры весьма дорогостоящи. Сцинтилляционные сенсоры также дороги и имеют большие размеры. Ионизационные камеры зачастую имеют большие размеры, требуют стабильного питания и подвержены микрофонному эффекту.

1.2 Повышение чувствительности детектора радона с помощью электростатической ловушки ДПР

Ионизационные камеры широко применяются в детекторах и мониторах радона и его ДПР, однако зачастую их эффективность оказывается низкой. Причина кроется не только в малогабаритности этих устройств, но и в особенностях их питания высоким напряжением. Так, например, при батарейном питании (или питании от осветительной сети через трансформатор) в устройстве отсутствует реальная «земля» и суммарный заряд прибора оказывается равен нулю. При этом силовые линии электрического поля камеры замыкаются на ближайших проводниках, расположенных рядом в силу малогабаритности прибора (рис. 3). Это приводит к тому, что ДПР собираются из весьма ограниченного объёма воздуха в самой регистрационной камере и непосредственно вблизи прибора [10]. Обеспечение заземления прибора через осветительную сеть (рис. 3) позволяет резко увеличить эффективный объём электрического поля вокруг прибора (в этом случае его силовые линии замыкаются на элементах проводки в стенах, далеко от прибора) и, соответственно, многократно увеличивается эффективный объём, из которого собираются ДПР.

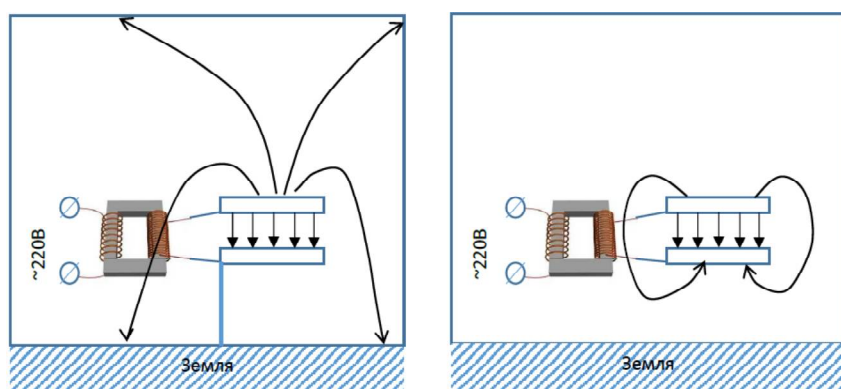


Рисунок 3 - Традиционная схема подключения ионизационной камеры(справа) и предлагаемая схема электростатической ловушки ДПР (слева) и распределение электрического поля вблизи ловушки.

Иногда это увеличение эффективности происходит в десятки раз [12]. Таким образом не надо стремиться изолировать прибор от проводников осветительной сети, а напротив, следует использовать её «земляной» или «нулевой» проводники в качестве «земли» прибора. Разумеется, при этом необходимо удовлетворить требованиям по электробезопасности и помехозащите [11] устройства.

1.3 Устранение недостатков импульсной открытой ионизационной камеры

В качестве потенциально наиболее дешевого и эффективного сенсора альфа-активности путём изучения уровня техники была выбрана открытая воздушная ионизационная камера (*open-air ion chamber*). До настоящего времени ионизационные камеры являются одним из наиболее точных инструментов для измерения низкофоновой альфа-активности. Ионизационная камера очень проста по конструкции (рис. 4) и практически нечувствительна к бета- и гамма излучению, нейтронам (без применения специальных мер), космическим лучам.

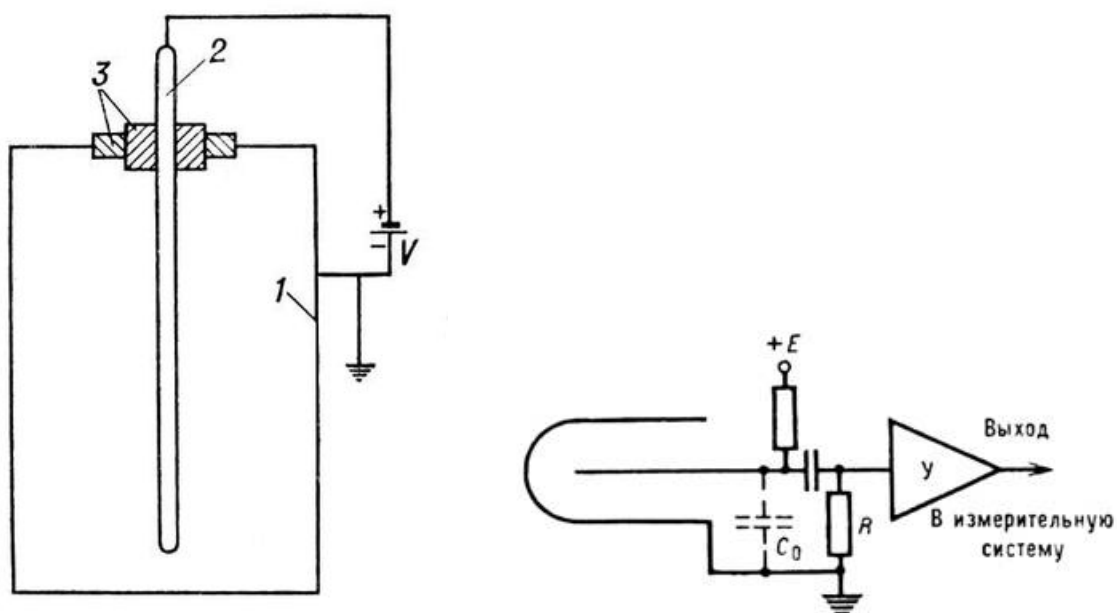


Рисунок 4 - Сечение цилиндрической ионизационной камеры: 1 — цилиндрический корпус камеры, служащий отрицательным электродом; 2 — цилиндрический стержень, служащий положительным электродом; 3 — изоляторы. Справа – обозначение камеры на электрической схеме и типовая схема усилителя сигнала камеры.

В то же время традиционные открытые ионизационные камеры страдают несколькими серьезными недостатками, препятствующими их широкому коммерческому/бытовому применению:

- микрофонный/вибрационный эффект, требующий дорогостоящих специальных мер для его подавления;
- высокое напряжение питания (до 10 кВ);
- большие рабочие объёмы, необходимые для получения хороших энергетических спектров альфа-частиц и высокой чувствительности при низких уровнях альфа-активности;
- малый уровень выходного сигнала;
- низкую скорость счёта, ограничивающую измеряемый уровень альфа-активности сверху.

Поскольку в разрабатываемом устройстве мы ставим задачу измерения интегральной альфа-активности воздуха, то исчезает требование разрешения частиц по энергиям. Фактически камера используется в режиме счётчика альфа-частиц. Это позволяет делать камеру малого объёма, например, всего несколько см³. При этом сильно снижается требуемое рабочее напряжение камеры, в результате этого уменьшается и микрофонный эффект. При уменьшении размеров камер уменьшается также время рассасывания ионного следа в камере, следовательно, и длительность импульса на выходе, и, соответственно, повышается максимальная скорость счёта частиц. Единственный параметр, который существенно ухудшается, это амплитуда выходного сигнала. Но даже и в этом случае она остаётся порядка 1-2 мВ, и современная электроника способна усиливать такие сигналы до любой нужной величины без ухудшения отношения сигнал/шум. Поскольку пробег альфа-частиц, создаваемых радоном и его ДПР в воздухе лежит в диапазоне 4-8 см, то при диаметре цилиндрической камеры около 2 см и высоте около 4 см среднестатистическая частица (со средней энергией 5-6 МэВ) будет иметь средний пробег в камере около 3 см и, соответственно, оставлять в камере в среднем половину своей энергии. Этого вполне достаточно для уверенной регистрации большинства, пролетевших через камеру частиц. Меньший размер приведёт к быстрому уменьшению амплитуды сигнала, а больший размер приведёт к увеличению общих габаритов устройства без существенного выигрыша в качестве сигнала.

Остаётся только один существенный недостаток ионизационной камеры, сильно влияющий на работу прибора в целом – высокая виброчувствительность ионизационной камеры. Для устранения этого недостатка были использованы две идентичные ионизационные камеры, установленные на общем основании (печатной плате) и механически дополнительно связанные отрезком жесткой проволоки путём пайки её к обеим камерам [12]. Поскольку камеры идентичны, то и выходной сигнал с анодов камер при воздействии механической помехи одинаков. Если выходные сигналы камер подать на два различных входа инструментального усилителя (ИУ), то на выходе ИУ произойдёт взаимное вычитание сигналов помехи и практически полная их компенсация. В то же время импульсы от альфа-частиц практически никогда не возникают одновременно в обеих камерах и, соответственно, проходят через ИУ беспрепятственно. Такое решение позволяет в десятки и даже сотни раз снизить влияние механических вибраций на работу камер без сложных мер их подавления. Особенность данного технического решения в том, что импульсы от разных камер имеют разную полярность сигнала на выходе ИУ, поскольку подаются на разные входы ИУ. Это позволяет различить в какой из камер была зарегистрирована данная альфа-частица, что является полезной возможностью во многих практических случаях, например, при относительных измерениях активности образца в сравнении с эталоном. Образец в таком случае устанавливается вблизи одной камеры, а эталон – вблизи второй.

1.4 Совмещение функций ловушки и ионизационной камеры в одной конструкции

Ионизационная камера, традиционно используемая для регистрации альфа-частиц должна иметь очень тонкие электропроводящие стенки, чтобы с одной стороны обеспечить защиту чувствительного объёма камеры от электростатических помех, а с другой стороны не препятствовать альфа-частицам проникать внутрь камеры. Для решения этой задачи используют, как правило, металлизированные тонкие полимерные плёнки, например, майларовые, или тонкие фольги, например, алюминиевые. При этом толщина плёнки измеряется микронами, и конструкция камеры получается очень хрупкой. Кроме того, коммерческая доступность подобных плёнок и фольг ограничена. Предложено альтернативное решение: выполнить наружную стенку камеры из металлической сетки. Сетка прочна, и достаточно хорошо обеспечивает защиту от электростатических и квазистатических помех и в то же время практически не препятствует проникновению альфа-частиц в рабочий объём камеры. Таким образом, конструкция катодов камер (они же выполняют роль внешней стенки камеры-сетки) определилась: это 2 цилиндрические сетки, диаметром около 2 см и высотой около 4 см (рис. 5).

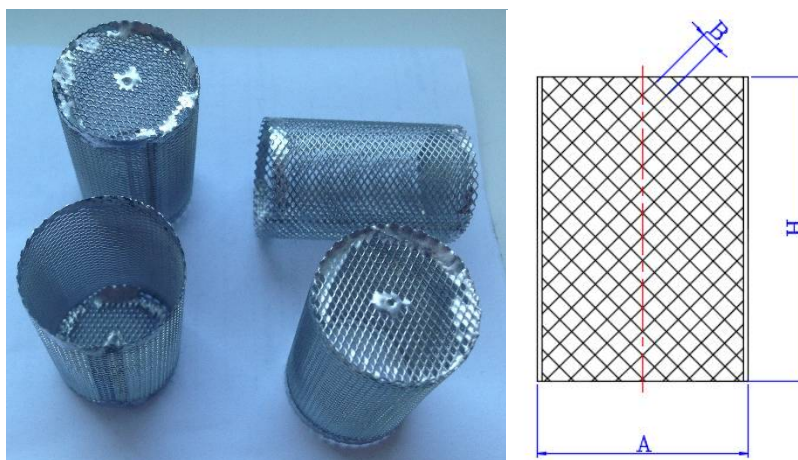


Рисунок 5 - Ионизационные камеры-сетки (макеты слева) и фильтр-сетка Valtec VT050 (справа). Параметры фильтра-сетки $A=25$ мм, $H=41,5$ мм, $B=500$ мкм.

Камеры-сетки были изготовлены из фильтров-сеток VT050 от сантехнических косых фильтров, диаметром $\frac{3}{4}$ дюйма. Аноды же камер представляют из себя отрезки медной проволоки диаметром 1 мм и длиной около 30 мм (рис. 6).

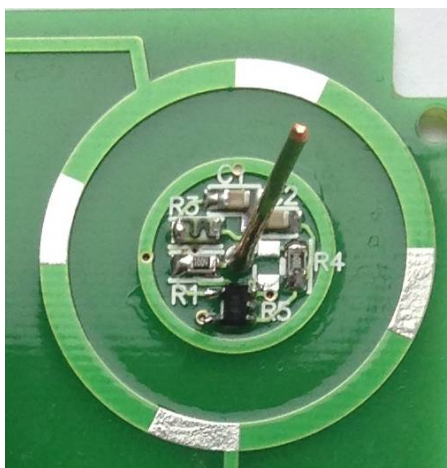


Рисунок 6 - Конструкция анода ионизационной камеры и его монтаж на плате.

Аноды устанавливаются на печатную плату вертикально путём пайки, затем также при помощи пайки в 4-х точках устанавливаются камеры-сетки таким образом, чтобы анод оказался внутри них ровно посередине. Если на катоды, выполняющие роль наружной стенки-сетки камер подать отрицательный высокий потенциал (выше -1000В) относительно «земли» осветительной сети (она же «земля» прибора), а потенциал анода задать вблизи потенциала «земли», то сетка будет выполнять роль эффективной электростатической ловушки ДПР радона и одновременно катода и наружной стенки ионизационной камеры. Сборка из 2-х таких камер, называемая «бикамерой-ловушкой» и была использована в макете разрабатываемого прибора (рис. 7).



Рисунок 7 - Сборка из 2-х камер-ловушек на печатной плате.

1.5 Электроника сенсора-ловушки

Во входной цепи камеры-ловушки использована схема усилителя заряда, как наиболее хорошо зарекомендовавшая себя при работе с ионизационными камерами. Выходной сигнал усилителя заряда практически не зависит от разбросов длин и толщин анодов, от отклонений в размерах сеток, погрешностей монтажа. Емкость обратной связи выбрана 5 пФ как традиционная для небольших ионизационных камер, при этом сопротивление в цепи обратной связи выбрано 110 Мом, чтобы обеспечить минимальную длительность выходного импульса, не приводящую ещё к существенному снижению амплитуды импульса. Последовательно с анодом включен резистор 1 Мом, ограничивающий чувствительность усилителя заряда к высокочастотным наводкам, но ещё не искажающий передний фронт импульса, создаваемого пролётом альфа-частицы в камере. В случае утечки тока по воздуху между катодом и анодом камеры (например, при высокой влажности или вблизи источников ионизации воздуха) этот же резистор служит ограничителем тока, защищающим входные цепи усилителя заряда. Схема электронной части камеры-ловушки приведена на рис. 8.

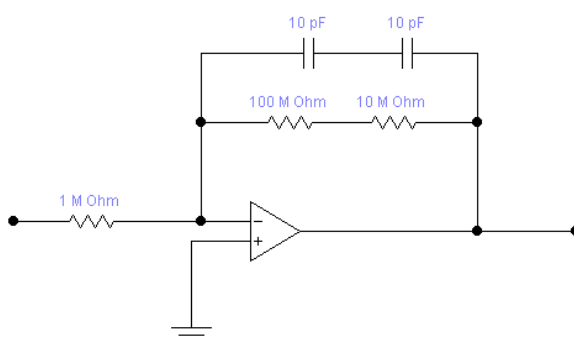


Рисунок 8 - Принципиальная схема усилителей заряда камер-ловушек.

Емкость в цепи обратной связи 5 пФ образована двумя последовательно включенными емкостями по 10 пФ, поскольку эти емкости являются минимальными в стандартном ряду емкостей, имеющем меньшую среднюю стоимость, чем компоненты из расширенных рядов номиналов. Последовательное включение резисторов используется для того, чтобы уменьшить их результирующую паразитную емкость. В качестве операционного усилителя (ОУ) требуется малошумящий усилитель с малыми входными токами и полным размахом выходного напряжения, например, AD8605. Хорошей альтернативой является более дешёвый ОУ производства Microchip MCP6021.

1.6 Принцип действия детектора радона

Действие разрабатываемого детектора радона основано на электростатическом собирании ДПР радона непосредственно на сетку, являющуюся одновременно катодом вышеописанной бикамеры-ловушки с последующей регистрацией импульсов тока в камерах, возникающих в результате ионизации воздушного промежутка камер при пролёте через него альфа частиц, испускаемых (в процессе естественного распада) накопленными на сетках ДПР. Для эффективного собирания ДПР на камерах-ловушках на их катоды подаётся высокое отрицательное напряжение относительно «земли» осветительной сети. Аноды камер при этом поддерживаются при потенциале, близком к потенциалу «земли». Сигналы с выходов усилителей заряда камер подаются на входы инструментального усилителя, выполненного по схеме с одним ОУ. ИУ одновременно усиливает оба сигнала и вычитает их друг из друга, что приводит к глубокому подавлению синфазной помехи и одновременно к усилению полезного (противофазного) сигнала. В результате на выходе ИУ формируются усиленные по амплитуде импульсы напряжения, имеющие ограниченную полосу частот. Таким образом ИУ выполняет также и функцию формирования формы импульсов. Полярность импульса различна для частиц, пролетевших через первую и вторую камеры. Усиленный и сформированный сигнал подаётся на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера (МК). Далее обработка сигнала и регистрация событий распада осуществляются программным способом. Программная обработка включает в себя:

- аналого-цифровое преобразование сигнала в код;
- удаление постоянной составляющей сигнала;
- детектирование сигнала по амплитуде (превращение разнополярных импульсов в однополярные);
- дискриминация импульсов по амплитуде с помощью порога (для отсеки ложных импульсов, вызванных шумами и помехами);
- дискриминация импульсов по длительности (для снижения вероятности ложной тревоги);
- подсчёт импульсов (прошедших обе стадии дискриминации) за заданный интервал времени (например, 1 минуту);
- цифровую фильтрацию (экспоненциальное усреднение) количества импульсов за каждый очередной заданный интервал;
- пересчёт усреднённого количества импульсов за интервал в ЭРОА радона;

- запись на SD-карту подсчитанного количества импульсов, усреднённого и пересчитанного в ЭРОА;
- вывод значения ЭРОА на индикатор и последовательный порт USART для контроля оператором.

1.7 Устройство электронной части детектора радона

В соответствии с принципом действия детектор радона содержит следующие основные блоки и узлы:

- две идентичные импульсные ионизационные камеры-ловушки с усилителями заряда;
- инструментальный усилитель-формирователь разностного сигнала (из сигнала на выходах усилителей заряда);
- микроконтроллер, выполняющий аналого-цифровое преобразование, выделение импульсов, соответствующих альфа-частицам, подсчёт числа событий распада в заданный интервал времени и пересчёт этой величины в величину ЭРОА;
- SD-карту для хранения результатов работы прибора;
- цифровой/графический индикатор;
- блок питания, включающий в себя:
 - импульсный AD/DC преобразователь $\sim 220\text{В}$ в постоянное $+5\text{В}$;
 - линейный стабилизатор $+3.3\text{В}$;
 - умножитель высокого напряжения – выпрямитель;
 - стабилизатор высокого напряжения;
 - фильтр высокого напряжения;
- малогабаритный звукоизлучатель;
- защитные элементы электробезопасности (варистор, сетевой предохранитель, различные токоограничительные сопротивления);
- интерфейс для подключения дополнительных сенсоров (шина I^2C);
- интерфейсы для программирования микроконтроллера и обмена данными с внешними цифровыми устройствами (по шинам SPI и USART);
- интерфейс аналогового сигнала (для подключения контрольно-измерительной аппаратуры);
- интерфейс для подключения органов управления (кнопок, слайдеров и т.п.);
- интерфейс для подключения опциональных светодиодных индикаторов.

Блок-схема устройства приведена на рис. 9.

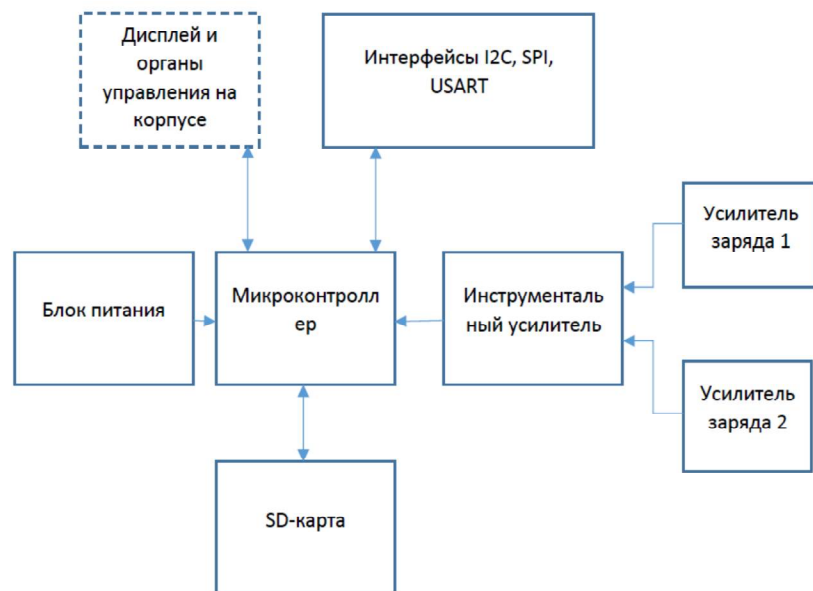


Рисунок 9 Упрощенная блок-схема электронной части устройства.

1.8 Требования к принципиальной схеме устройства

При разработке принципиальной схемы устройства разработчик выполнил ряд требований, вытекающих из принципа действия устройства и особенностей заложенных технических решений, таких как:

- минимизация количества компонент и их габаритных размеров, в соответствии с требованиями ТЗ на общие габариты устройства;
- обеспечение достаточного отношения сигнал/шум в аналоговом сигнале, не менее 36 dB (отношение амплитуды импульса альфа-частицы, прошедшей в камере путь не менее 3 см к среднеквадратичному значению шума);
- обеспечение достаточного усиления аналогового сигнала камер-ловушек для наиболее полного использования динамического диапазона АЦП МК. Общее усиление тракта должно составлять около 10^3 , при этом амплитуда среднестатистического импульса должна быть не менее 0.8В, а максимального – не более 1.6В;
- оптимизация полосы рабочих частот аналогового тракта с целью формирования импульсов, вызванных пролётом альфа-частиц в камерах. По результатам моделирования тракта в САПР NI Multisim оптимальная полоса частот составляет 300-4000 Гц. В этом случае длительность импульса составляет около 3 мс, что позволяет уверенно обеспечить скорость счёта до 100 имп/сек.;
- унификация элементной базы;
- отсутствие дефицитных и дорогостоящих компонент;
- обеспечения оптимальных режимов функционирования компонент и узлов;
- возможности быстрого расширения функционала устройства в процессе его дальнейшего развития;
- соответствия заданным в ТЗ техническим характеристикам устройства;
- удобство программирования, тестирования устройства и обмена данными с ПК в процессе отладки.

С целью обеспечения возможности быстрого расширения функционала устройства в схему были введены несколько разъёмов, содержащих все основные интерфейсы МК: SPI, USART, I²C и несколько портов ввода-вывода, предназначенных для подключения цифрового индикатора, дополнительных сенсоров, органов управления прибором и обмена информации между прибором и ПК, либо другими интеллектуальными устройствами.

Принципиальная схема устройства приведена в Приложении А.

1.9 Выбор элементной базы

При выборе элементной базы разработчик руководствовался требованиями минимизации стоимости, доступности, соответствия заданным техническим характеристикам и долговременной надёжности. Особое внимание уделено повышению степени интеграции основных компонент. В качестве ОУ аналогового тракта выбран прецизионный, малошумящий AD8605 компании Analog Devices. Этот ОУ использован как в усилителях заряда камер-ловушек, так и в инструментальном усилителе. Рекомендуемой более дешевой заменой является ОУ MCP6021 производства компании Microchip. В качестве микроконтроллера устройства выбран Atmega328 компании Atmel, ввиду широкой распространённости, низкой стоимости и достаточности для выполнения поставленных задач. Большое значение при выборе МК имели также соображения удобства программирования, наличия нескольких удобных и бесплатных сред программирования и отладки. В качестве источника питания выбран широко распространённый, недорогой интегральный модуль AD/DC преобразователя HLK-PW01 компании Hi-LINK, выдающий 5В постоянного напряжения с малым уровнем пульсаций. Возможной заменой являются модули TSP-05 компании TEENSTAR ROBOT. С целью снижения уровня помех от осветительной сети в аналоговый тракт устройства, после импульсного AD/DC преобразователя использован дополнительный линейный стабилизатор LM1117DT-3.3/NOPB, выдающий напряжение 3.3В. В умножителе напряжения, формирующем высокое постоянное отрицательное напряжение для питания камер-ловушек, использованы широко распространённые дешёвые выпрямительные диоды 1N4007 с рабочим обратным напряжением до 1000В и конденсаторы Murata 10нФ х 1000В. В стабилизаторе высокого напряжения использованы дешёвые супрессоры PKE440CA (альтернатива SMBJ440A) на напряжение 440В, последовательно включенные в количестве 3 шт., что обеспечивает стабилизацию высокого напряжения на уровне 1320В. При этом устройство в целом остаётся в классе бытового низковольтного оборудования, определённом в рамках соглашений и нормативных документов Таможенного Союза (до 1500В постоянного напряжения). В фильтре высокого напряжения использованы высоковольтные многослойные керамические конденсаторы Murata 0.1мкФ х 1000В в количестве 6 шт., включенные попарно-последовательно в виде 3-х RC-звеньев. Важное значение имеет их низкий ток утечки. Все остальные пассивные компоненты электронной части устройства являются весьма распространёнными, недорогими и коммерчески доступными. Разработчик стремился к максимально широкому использованию SMD-компонент, с целью уменьшения общих габаритов устройства, снижения себестоимости и повышения технологичности сборки.

1.10 Принципиальная схема устройства

Принципиальная схема устройства разработана в САПР PCAD 6.1 и на втором этапе проекта перенесена в Altium Designer с целью повышения совместимости с САПР, используемыми дизайнерами и конструкторами корпусно-механической части прибора. На принципиальной схеме отражены все компоненты электронной платы устройства, включая камеры-ловушки. На схеме не отражены внешние по отношению к электронной плате элементы, такие как дисплей, SD-карта (отражен только держатель карты), кнопка управления, шнур питания, дополнительные опциональные сенсоры и прочие элементы, располагаемые на корпусе, либо вне корпуса прибора, либо соединяемые с электронной платой устройства шлейфами, разъёмами и т.п. Характеристики аналоговой части схемы, представленной на рис. 10, в основном определяют достижимые параметры прибора, связанные с регистрацией альфа-частиц в ионизационных камерах-ловушках, поэтому эту часть схемы рассмотрим более подробно.

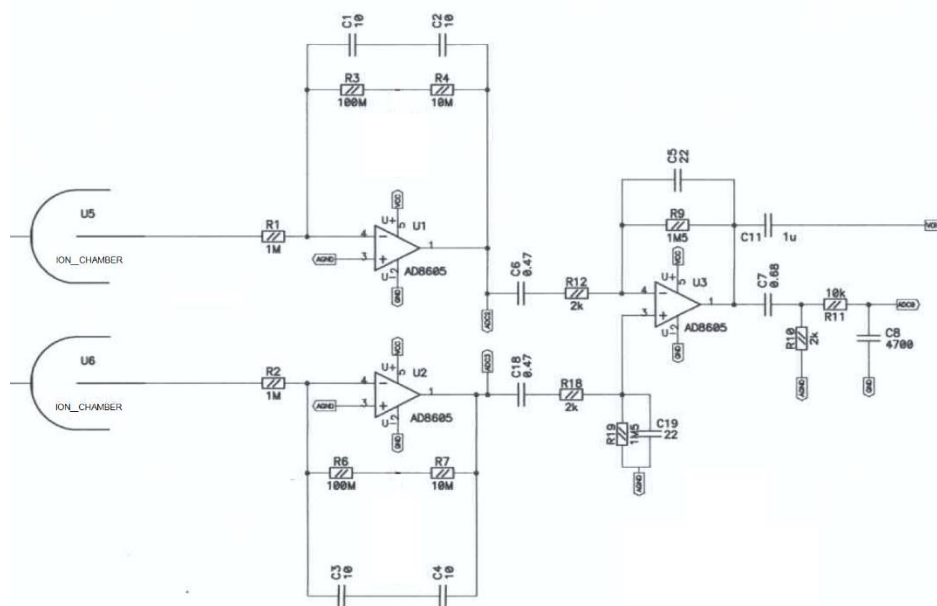


Рисунок 10 - Принципиальная схема аналоговой части устройства.

Усилители заряда выполнены на ОУ U1 и U2 типа AD8605 и являются идентичными. Ионизационный ток в камере, возникающий в момент пролёта альфа-частицы через рабочий объём через резистор R1 поступает на инвертирующий вход U1. В силу наличия емкости C1, C2 в цепи отрицательной обратной связи этот ток вызывает появление напряжения на выходе ОУ, пропорционального заряду, собранному анодом камеры. Сопротивление R1 ограничивает скорость нарастания фронта несколькими микросекундами, но естественная длительность нарастания фронта импульса ограничена скоростью дрейфа носителей заряда (ионов, поскольку электронный ток в воздухе практически отсутствует) в камере и не превышает 100

мкс. Поэтому эта цепь не оказывает влияния на форму сигнала, но снижает чувствительность усилителя заряда к высокочастотным наводкам и шумам [5]. Сопротивление в цепи обратной связи приводит к тому, что напряжение на выходе усилителя заряда после рассасывания ионного следа частицы в камере не остаётся постоянным, а спадает с характерным временем порядка 5 миллисекунд. Поскольку время полного собирания заряда в камере составляет менее 1 мс, то такая постоянная цепи обратной связи УЗ не уменьшает амплитуду импульса, но снижает чувствительность усилителя к низкочастотным шумам и наводкам.

Принципиальная схема всей электронной платы приведена в Приложении А. Полный перечень комплектующих, использованных в принципиальной схеме устройства приведен в Приложении Б.

2 Разработка топологии печатной платы макета

2.1 Топология сенсора-ловушки

Ввиду необходимости оградить электронику и аноды камер от токов утечки, протекающих в основном по поверхности платы и электрических помех, вся электроника усилителя заряда размещена внутри камеры (камера выполняет роль электростатического экрана) и окружена заземленным охранным кольцом, часть которого видна на рис. 11, а полностью его можно увидеть на рис. 6.

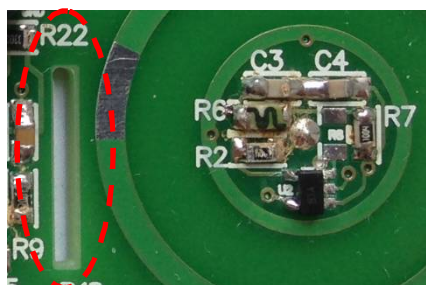


Рисунок 11 - Прорези в плате перед камерами-ловушками и охранное кольцо.

Нижний слой платы представляет собой сплошной «земляной» слой, в котором проходят проводники питания камер и проводники выходного сигнала. Такая топология позволяет обеспечить максимальную помехозащищённость камер-ловушек и их входных цепей. В ходе испытаний ранних макетов выяснилось, что для снижения токов утечки по плате необходимо выполнить прорези в плате между зоной расположения камер-ловушек и остальной электроникой (на рис. 11 такая прорезь обведена пунктиром).

2.2 Специфические требования к печатной плате и монтажу

Ввиду высокого напряжения на умножителе высокого напряжения, фильтрах высокого напряжения и катодах камер и очень высокого (более 100 Мом) входного сопротивления усилителей заряда, токи утечки по плате (как по поверхности, так и внутри) должны быть минимальными. Это предъявляет определенные требования как к топологии, качеству изготовления платы, так и монтажу, и качеству отмывки платы после монтажа. Топология должна исключать возможность электрического пробоя и обеспечивать достаточные технологические зазоры между проводниками с большой разностью потенциалов, кроме того, узлы схемы, являющиеся источниками электрических помех должны быть максимально удалены от камер-ловушек. Все оставшиеся свободными от проводников участки печатной платы должны быть покрыты «земляными» слоями. Технологические отверстия и края платы должны быть удалены от проводников высокого напряжения на достаточное расстояние (не менее 3 мм), во избежание утечек и пробоев на элементы корпуса. С целью обеспечения высокой механической жесткости платы её толщина должна быть 2.0 мм, материал FR-4. Механическая жесткость платы обеспечивает снижение чувствительности аналоговой части устройства к механическим вибрациям. С целью снижения токов утечки, абсорбции влаги из атмосферы и повышения электрической прочности необходимо покрытие платы маской. Количество слоёв платы – два. Это обеспечивает невысокие требования к технологическому оборудованию. Все устанавливаемые компоненты должны располагаться на одной (верхней) стороне платы, что обеспечивает удобство, технологичность и низкую стоимость монтажа. Компоненты необходимо отмаркировать в соответствии с обозначениями на принципиальной схеме для удобства монтажа. Топология слоёв печатной платы приведена в Приложении В. Сборочные чертежи платы приведены в Приложении Г.

3 Разработка сборочных чертежей электронной части макета

Сборочный чертеж электронной части макета разработан в рамках подготовки производственной документации на печатную плату прибора и приведен в Приложении Г. При подготовке сборочной документации были учтены требования подготовки к серийному производству:

- предпочтительность одностороннего монтажа компонент;
- преимущественное использование SMD-компонент;
- компоненты, монтируемые в отверстия, располагаются в одной области платы;
- обеспечение необходимых технологических зазоров между компонентами, позволяющие осуществлять их автоматический монтаж;
- требования автоматической пайки компонент и минимизации ручных сборочных операций;
- требования к автоматическому контролю качества сборки.

4 Разработка алгоритмов программы для макета

4.1 Алгоритм работы устройства в целом

Исходя из принципа действия прибора и требований ТЗ был разработан алгоритм работы прибора, реализованный в ПО прибора. После подачи питания на прибор алгоритм стартует, совершая подготовительные действия: настройка различных встроенных узлов микроконтроллера, контроль напряжения сети, контроль наличия заземления в сети. Если условия питания для работы прибора допустимы, то алгоритм ожидает окончания заряда высоковольтной части блока питания (примерно 15 секунд), после чего начинается основная фаза работы. В основной фазе прибор непрерывно анализирует поступающий на вход АЦП МК аналоговый сигнал с выхода ИУ, с целью обнаружения импульсов, вызванных пролётом альфа-частиц через камеру. Количество зарегистрированных импульсов подсчитывается за минуту. Далее полученное число умножается на калибровочный коэффициент, переводящий импульсы в минуту в стандартные единицы измерения активности, например, Бк/м³, или пКи/л. Это число (в стандартных единицах) подвергается динамическому экспоненциальному сглаживанию для уменьшения дисперсии показаний и ежеминутно записывается на SD-карту, выводится в последовательный порт для отладки на ПК, и отображается на цифровом индикаторе (если индикатор подключен). Алгоритм может быть прерван поступлением сигнала прерывания, например, при нажатии управляющих кнопок. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 12

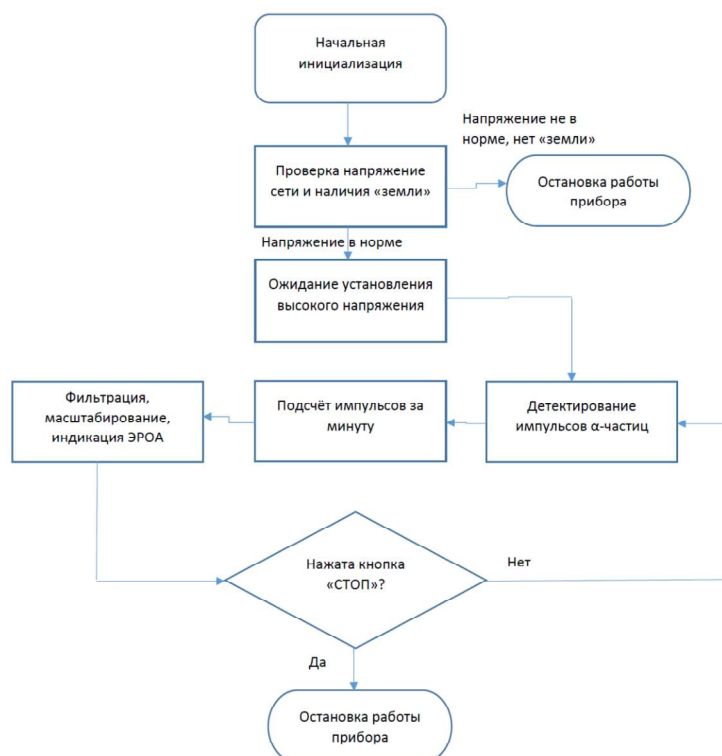


Рисунок 12 - Блок-схема общего алгоритма работы устройства.

4.2 Алгоритм детектирования импульсов альфа-частиц

От работы алгоритма детектирования импульсов зависят такие параметры устройства как чувствительность и помехоустойчивость. От алгоритма требуется низкая вероятность пропуска импульса от альфа-частиц и низкая же вероятность ложного обнаружения импульса. Ложное обнаружение может вызываться как шумом электроники, так и различными помехами механической или электрической природы. Достижение этих противоречивых требований приводит к необходимости разработки специализированных алгоритмов робастного обнаружения. Амплитуда импульса должна превышать некий порог, расположенный выше уровня шума электроники. Однако помехи, например, от осветительной сети или механических вибраций также могут превышать этот порог. Увеличение порога приведёт к снижению чувствительности прибора, поскольку распределение амплитуд импульсов от альфа-частиц является очень «размытым» и значительная часть импульсов имеет невысокие амплитуды. Однако все импульсы от альфа-частиц являются близкими по форме и сильно отличаются от импульсов электрических или механических помех. На данном этапе разработчик ограничился использованием только одного параметра формы – длительности импульса. То есть к амплитудному дискриминатору был добавлен дискриминатор длительности. Это привело к повышению помехоустойчивости устройства при сохранении его чувствительности. На следующем этапе желательно доработать этот алгоритм с целью ещё больше повысить чувствительность и помехоустойчивость.

Работа алгоритма детектирования начинается с оцифровки аналогового сигнала, поступающего с выхода ИУ. Оцифровка производится встроенным АЦП МК с разрядностью 10 бит. Частота оцифровки выбрана 8 кГц, поскольку максимальные частоты в спектре импульса не превышают 4 кГц, более высокие частоты срезаны в ИУ, выполняющим также функции формирователя импульсов. Далее производится устранение постоянной составляющей из оцифрованного сигнала. Отсчёты АЦП находятся в диапазоне 0-1023 со средним 511, соответственно, в самом простом случае требуется вычесть 511. Однако разработчик выбрал использование для этой цели экспоненциального фильтра верхних частот (ФВЧ) [5] с частотой среза около 200 Гц. Он позволяет не только удалить постоянную составляющую, но и подавить низкочастотную помеху (фон сети 50 Гц и его гармоники 100 и 150 Гц, а также низкочастотные шумы механической природы). После устранения постоянной составляющей осуществляется взятие модуля от получившегося двуполярного сигнала. Это необходимо, чтобы унифицировать обработку импульсов от обеих камер, имеющих противоположную полярность на выходе ИУ. Затем проверяется превышение модулем заданного порога обнаружения. В случае такого превышения начинается оценка длительности импульса. Если импульс не

закончился в течении заданного интервала времени, либо, наоборот, закончился слишком быстро – этот импульс не считается импульсом от альфа-частицы и не регистрируется. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 13.

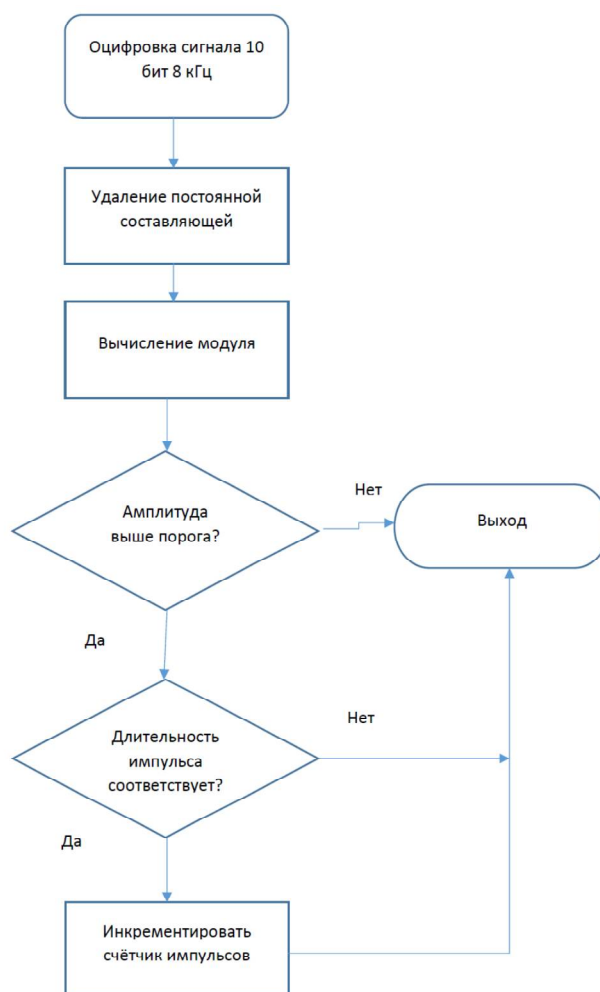


Рисунок 13 - Блок-схема алгоритма детектирования импульсов.

5 Разработка программы для макета

Программное обеспечение устройства разрабатывалось в средах AtmelStudio 6.2 и Arduino IDE 13.1 с широким использованием готовых библиотек. Например, работа с SD-картой, портом USART, шиной I²C, памятью EEPROM, дисплеем, звукоизлучателем и т.п. организована исключительно через стандартные библиотечные функции. В то время как работа с АЦП в процессе детектирования импульсов потребовала прямого обращения к регистрам МК без использования готовых библиотек. Отладка таких аппаратно-зависимых уникальных участков кода производилась в среде AtmelStudio, которая предоставляет разработчику широкие средства отладки. В то время как общая сборка кода осуществлялась в среде Arduino IDE, которая максимально удобна для быстрой интеграции собственного кода и заимствованных готовых библиотек. Такая «гибридная» технология разработки ПО позволила существенно сократить время разработки, не жертвуя при этом качеством разработки критических участков кода.

Далее приведен фрагмент кода, реализующий детектирование импульсов:

```
//Детектирование и обработка альфа-событий заданное время
void DETECTING(unsigned int mil) { //Вызвать детектор импульсов частиц заданное число раз (т.е. миллисекунд)
  for (unsigned int j=0; j<mil*8; j++) { //В переменной result уже лежит первый отсчёт импульса
    if(DETECTOR()) { //Если скачок напряжения на АЦП больше порога, то это частица
      delayMicroseconds(3000); //Ждём 3 мс, когда импульс частицы закончится
      for (byte i=56; i>0; i--) DETECTOR(); //Ничего не регистрировать 7 мс после импульса, но следить за дисперсией
      if (Sigma<1*SIG_POROG) { //Если после регистрации частицы сигнал успокоился, то зачёт частицы
        score++; //Увеличить счётчик частиц
        digitalWrite(LED, 1-digitalRead(LED)); //Переключили цвет, т.е. запомнили факт альфа-события
        if (SOUND_ON) tone(SOUND,1000,10); //Издать щелчок, если звук разрешен
      }
    }
  }
}

//Экспоненциальный фильтр
int ifilter(int x) {
  static int y = 0;
  static long z = 0;
  z+=(x-y);
  return (y = (Nb * z) >> kb);
}

//Экспоненциальный фильтр 1
int ifilter1(int x) {
  static int y = 0;
  static long z = 0;
  z+=(x-y);
  return (y = (32 * z) >> kb);
}

//Детектор альфа-событий
boolean DETECTOR () {
  int x = ((ADCL|ADCH << 8)-512); //Постоянная оцифровка и детектирование сигнала
  x = abs(x-ifilter1(x)); //Отрезаем НЧ (ниже 200 Гц) и берём модуль
  bitWrite(ADCSRA, ADSC, 1); //Запускаем следующее преобразование установкой бита 6 (=ADSC) в ADCSRA
  Sigma=ifilter(x); //Вычисляем дисперсию сигнала с шумом
  delayMicroseconds(100); //Задержка до конца преобразования АЦП
  return (CORR_POROG<x && Sigma<SIG_POROG); //Возвращаем факт превышения абсолютного порога
}
```

Исходный текст программы действующего макета устройства полностью приведен в Приложении Д.

6 Разработка эскиза и конструкторской документации корпуса макета

6.1 Выбор дизайн-концепта

На втором этапе проведения работ было разработано техническое задание для соисполнителя ИП Вострикова А.М., выполняющего работы по техническому дизайну корпусно-механической части прибора. При этом в техническом задании были учтены недостатки, выявленные на первом этапе и предложены способы их устранения. В частности, проектируемая корпусно-механическая часть прибора должна содержать аэрозольный фильтр, препятствующий проникновению крупных аэрозольных частиц внутрь прибора и в то же время не препятствующий проникновению мелкодисперсной фракции и свободных атомов ДПР радона. Были учтены требования технической эстетики и эргономики, типовые для бытовых приборов аналогичного класса, таких, как например, погодные станции и т.п. В ходе проработки и согласования Технического задания было установлено, что предполагаемую высоту корпуса прибора необходимо уменьшить, а площадь воздухозаборных отверстий необходимо максимально увеличить, обеспечив при этом безопасность устройства (например, невозможность случайного проникновения пальца в отверстие, даже детского). Кроме того, Востриков А.М. предложил использовать в качестве индикатора прибора графический дисплей достаточно большого размера, для того, чтобы можно было выводить на экран сразу несколько различных физических величин, измеряемых прибором и тем самым обеспечить свободное дальнейшее развитие концепции устройства. Также с целью удобства использования, транспортировки и упаковки прибора было предложено использовать разъёмное соединение сетевого шнура. Эскиз, разработанный в результате эскизного этапа и выбранный за основу, приведен на рисунке 14.



Рисунок 14 - Рабочая концепция дизайна корпуса устройства.

Весь спектр предложенных на данном этапе дизайн-концептов корпуса прибора приведен в Приложении Е.

6.2 Разработка макета по выбранному дизайн-концепту

По выбранному дизайн-концепту макета была разработана эскизная конструкторская документация корпуса макета (Приложение Ж). При разработке были учтены требования как соответствия дизайн-концепту так и легкости изготовления и модификации. В качестве базового материалы был выбран ABS-пластик, поскольку он хорошо подходит как для технологий литья, так и для механической обработки на станках с ЧПУ. Фрагмент эскизной документации приведен на рис. 15.

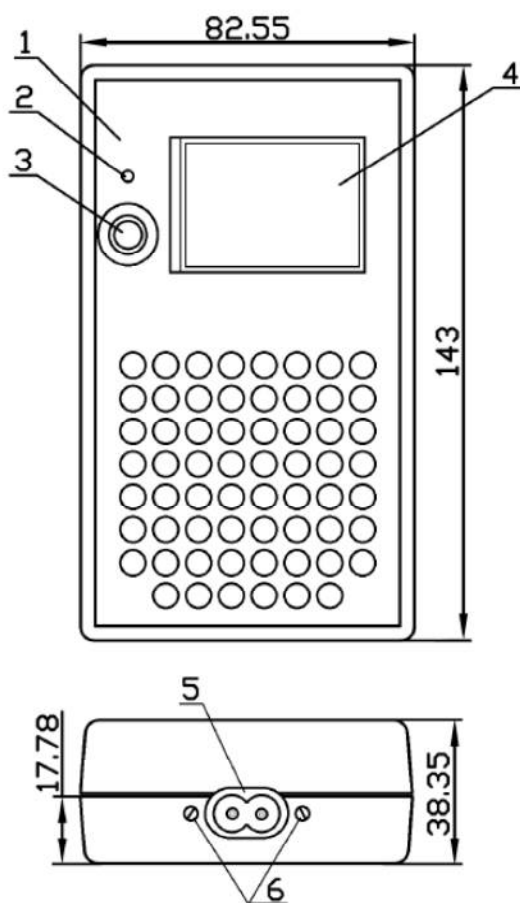


Рисунок 15 - Эскиз корпуса макета под изготовление на стенке с ЧПУ.

7 Доработка топологии печатной платы и сборочных чертежей

7.1 Формирование требований к доработке

По результатам разработки корпуса макета и результатам лабораторных исследований электронной части прибора была произведена доработка печатной платы и сборочных чертежей.

На первом же этапе разработки дизайна корпуса были выявлены требования к электронной части прибора, заставляющие внести определенные изменения в первоначальную конструкцию. Этими требованиями являются:

- переход на двухпроводную схему питания от осветительной сети;
- повышение стабильности напряжения на ионизационных камерах-сетках;
- повышение устойчивости конструкции к отклонениям в технологии производства плат;
- использование разъёмного соединения в схеме сетевого питания;
- использование графического дисплея достаточно высокого разрешения (160x128 точек);
- снижение максимальной высоты электронной части устройства до 25 мм.

Переход на двухпроводную схему питания был выполнен путём электрического соединения «нулевого» провода сети и «земли» прибора в топологии платы. Для повышения стабильности напряжения на ионизационных камерах-сетках в схему прибора были введены стабилизаторы VD8-10.

В целях повышения устойчивости конструкции к отклонениям в технологии производства плат были введены прорези в платах между ионизационными камерами и остальной частью платы, а также введены множественные металлизированные переходные отверстия между силовой частью платы (с напряжениями сети 220В) и сигнальной частью, выполняющие роль поперечного электрического экрана, блокирующего как токи утечки с силовой части, так и экранирование электрического поля

Доработанные чертежи приведены в Приложениях. Приложение И – доработанная схема электрическая принципиальная, Приложение К – откорректированный перечень компонентов и материалов, Приложение Л – доработанный чертеж топологический печатной платы, Приложение М доработанный сборочный чертеж. Трёхмерная модель электронной платы приведена в Приложении Н.

Разъёмное соединение не потребовало никаких изменений в конструкции электронной части. Использование графического дисплея также не вызвало затруднений, поскольку большинство таких дисплеев имеет интерфейс SPI или USART, уже установленные на печатной

плате прибора и требуется только доработка соответствующего модуля программного обеспечения с целью вывода информации на конкретный дисплей.

Самым трудновыполнимым требованием технической эстетики и дизайна явилось требование существенного снижения высоты корпуса устройства. Расчёты, выполненные инженером-конструктором Востриковым А.М. показали, что это возможно, если понизить высоту камер до 25 мм (против 37 мм используемых ранее). Поскольку снижение высоты камер приводит к уменьшению их чувствительности к ДПР радона, потребовались меры, повышающие эффективность камер ловушек, несмотря на снижение их высоты. Фактически, это требование привело к инновационной доработке используемых камер-ловушек.

7.2 Выявленные на 1-м этапе работ недостатки и способы их устранения

В ходе работ первого этапа были выявлены следующие недостатки макета:

- остаточная чувствительность к механическим вибрациям. Для её дальнейшего снижения требуется улучшить качество исполнения камер и анодов с тем, чтобы сделать их одинаковыми в обоих каналах, это приведёт к улучшению подавления синфазных помех. Кроме того, при установке платы в разрабатываемый корпус необходимо предусмотреть дешёвые и эффективные меры по механическому демпфированию плат и виброизоляции от корпуса. А также сам корпус необходимо разрабатывать с учётом задачи по снижению виброчувствительности прибора в целом. Эти требования были учтены в ТЗ на разработку корпусно-механической части прибора. Кроме того, использована дополнительная фиксация анодов камер вблизи места пайки термоклеем. Эта мера существенно снижает чувствительность камер к механическим вибрациям и дополнительно повышает их ударопрочность.

- чувствительность прибора к крупным (более 10 мкм) частицам пыли. Попадание такой частицы вызывает ложные срабатывания камер. Во избежание этого явления следует защитить электронику (прежде всего камеры-ловушки) от попадания крупнодисперсной пыли путём использования в разрабатываемом на 2-м этапе корпусе специального аэрозольного фильтра. Требование учтено в ТЗ на разработку корпуса. В качестве аэрозольного фильтра предложено использование наружного слоя стандартной 3-х слойной медицинской маски, показавшего высокую эффективность защиты от крупных аэрозолей. В то же время мелкие аэрозоли, содержащие ассоциированные частицы ДПР радона почти беспрепятственно проникают через такой фильтр к камерам-ловушкам.

- чувствительность прибора к аэрозолям в воздухе (например, возникающим в процессе дыхания человека). В малом количестве вызывают ложные срабатывания, а в большом приводят к временному прекращению счёта частиц. Во избежание этого явления следует защитить электронику (прежде всего камеры-ловушки) от попадания жидких аэрозолей путём использования в разрабатываемом на 2-м этапе корпусе специального аэрозольного фильтра, дополнительно придав ему свойства гидрофобности. Поскольку предложенный аэрозольный фильтр (наружный слой медицинской маски) является гидрофобным, то данное требование выполняется автоматически.

- влияние токов утечки по плате на напряжение питания камер. Устраняется контролем печатной платы при производстве и тщательной отмычкой платы после монтажа компонент. Возможно также дальнейшее совершенствование топологии платы. Было также изучено влияние покрытия готовых плат лаками URETHAN-71 и PLASTIC. Оба лака показали хороший результат, существенно понизились токи утечки, снизилась чувствительность плат к влажности.

Таким образом можно рекомендовать использование подобных лаков в технологии производства.

- несовершенство алгоритма регистрации импульсов от альфа-частиц в МК, приводящее к значительному проценту пропусков импульсов от альфа-частиц (до 40%), что вызывает снижение общей чувствительности устройства к радону. Необходимо было на следующем этапе провести исследования целесообразности использования методов оптимальной цифровой фильтрации сигналов перед детектированием и усовершенствовать технологию самого детектирования импульсов. Методы оптимальной фильтрации были разработаны и опробованы, однако продемонстрировали лишь небольшое увеличение эффективности регистрации, что связано с уже имеющейся квазиоптимальностью аналоговых фильтров тракта обработки сигнала. Частицы, пролетевшие далеко от анода, порождали (при изначальной конструкции анодов камер) слишком слабый сигнал. Указанный недостаток на втором этапе разработки был устранён модификацией конструкции анодов ионизационных камер. Было предложено выполнять аноды камер в виде многопроволочной конструкции, что повысило эффективность регистрации альфа-частиц практически до 90% и позволило снизить высоту камер до 25 мм при сохранении чувствительности. На данное решение подана заявка на полезную модель (Приложение П).

7.3 Разработка модифицированного сенсора-ловушки

Поскольку эффективность регистрации альфа-частиц камерами-ловушками, установленная на 1-м этапе выполнения проекта составила 60%, то есть из 100 частиц регистрируется 60 штук, то это является ресурсом для снижения высоты камер. Анализ записей сигналов от альфа-частиц лабораторного источника показал, что не регистрируются частицы, пролетевшие на расстоянии более 8 миллиметров от анода параллельно ему, а также частицы, прошедшие вблизи стенок камеры под различными углами и частицы, имеющие короткий (менее 1 см) трек внутри камер. Было выявлено техническое противоречие: с одной стороны, аноды камер должны быть достаточно далеко от стенок камер, для того, чтобы обеспечивать достаточно длинный средний трек частицы в камере. А с другой стороны аноды должны быть расположены близко к стенкам (около 5 мм), для того, чтобы даже частицы, прошедшие вблизи стенок, были бы зарегистрированы. Решением этого противоречия явилась концепция многонитевых анодов, представляющих из себя центральную проволоку и несколько, механически и электрически связанных с ней дополнительных боковых проволок, проходящих гораздо ближе к стенкам камеры, но в силу малого диаметра не изменяющих рабочий объем камер и не препятствующих движению альфа-частиц в камерах. Макеты таких анодов были изготовлены и испытаны в составе заниженных по высоте камер-ловушек (рис. 16).

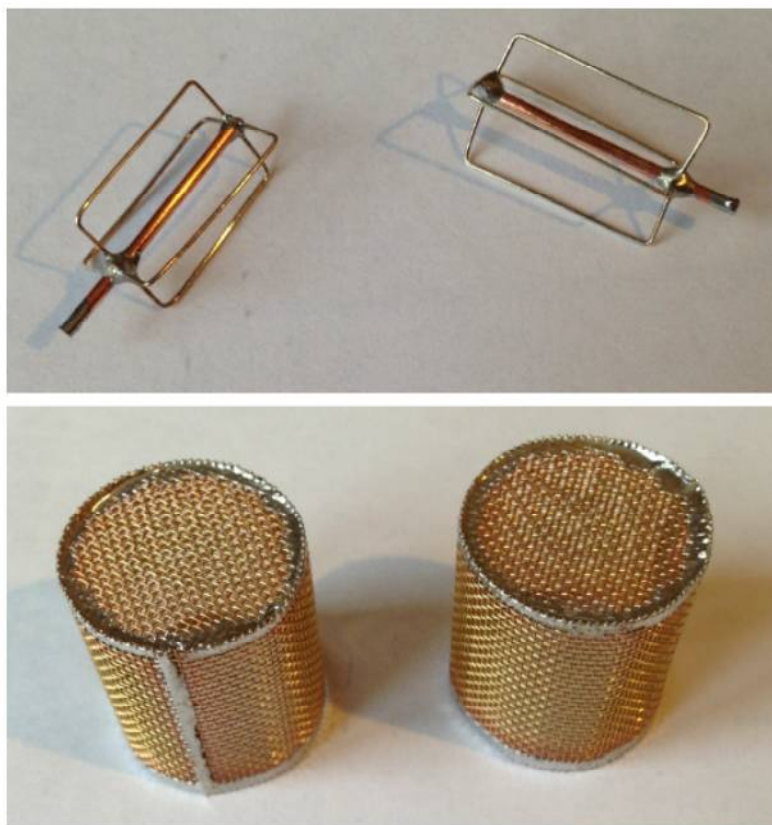


Рисунок 16 - Многонитевые аноды (вверху) и камеры-ловушки пониженной высоты (внизу).

Измерения с использованием лабораторного источника альфа-частиц показали, что эффективность заниженных камер-ловушек с инновационными многонитевыми анодами повысилась до 90%, что позволило рассчитывать на сохранение чувствительности прибора к ДПР радона, несмотря на снижение высоты камер и самих анодов. По результатам данного этапа работ была подана заявка на полезную модель камер и прибора, с использованием таких камер (Приложение П).

7.4 Внедрение дополнительного набора сенсоров и модулей в прибор

Поскольку в конструкции прибора изначально закладывались возможности расширения функционала путём подключения набора различных дополнительных сенсоров, то с целью проверки этого положения были:

- выбраны дополнительные сенсоры;
- изготовлены действующие макеты электронной части прибора с данными сенсорами.

В качестве дополнительных сенсоров были использованы:

- МЭМС-сенсор BME280 компании Bosh Sensors (однокристальная метеостанция, содержащая высокоточный атмосферный барометр, датчик влажности и термометр и выдающая данные в цифровой форме по интерфейсу I²C).

- оптический сенсор углекислого газа (CO₂) MH-19, имеющий как однопроводной ШИМ-выход, так и цифровой интерфейс USART. Оба интерфейса обеспечивают легкое подключение к схеме прибора. В макете был выбран интерфейс ШИМ, как наиболее простой.

- счётчик Гейгера СБМ-20-1 отечественного производства, позволяющий осуществлять непрерывный мониторинг гамма-фона. Данный счётчик был запитан от умножителя напряжения, присутствующего в приборе и подключен к цифровому порту микроконтроллера, обеспечивающему регистрацию импульсов счётчика по аппаратным прерываниям.

Кроме того, для целей непрерывного дистанционного получения данных из приборов (в режиме реального времени) был также подключен широко распространённый модуль WiFi ESP8266-07, передающий показания прибора непосредственно на сервер IoT (интернета вещей). Такая модификация позволила оперативно наблюдать за работой прибора во время отладки, калибровки и испытаний, что существенно экономит время и снижает себестоимость данных операций. Дополнительные сенсоры и модули приведены на рис. 17.

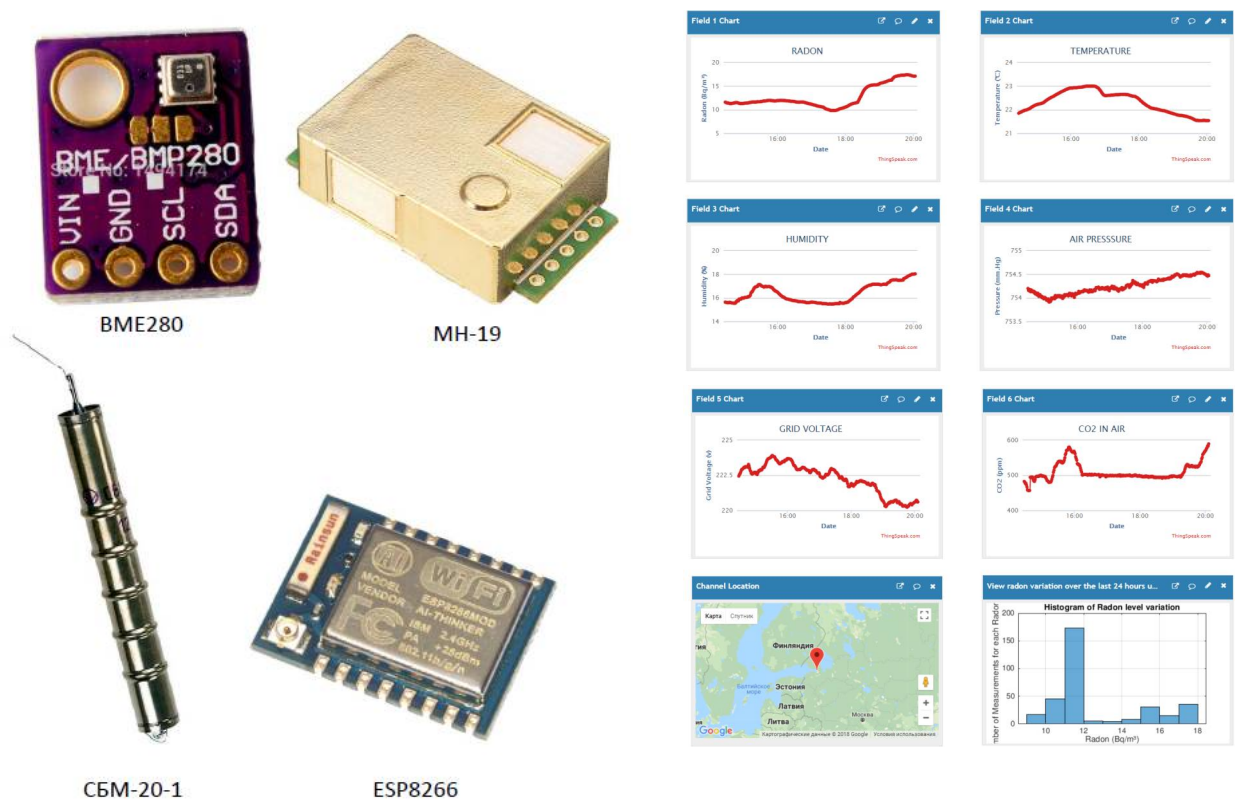


Рисунок 17 - Дополнительные сенсоры и модули, установленные в действующем макете прибора и пример представления данных в IoT.

8 Изготовление и сборка электронных плат

Электронные печатные платы были изготовлены в ООО «Резонит» по разработанной документации из материала FR-4 толщиной 2 мм. После стадии подготовки производства и изготовления первой партии образцов были выявлены технические недостатки. Наиболее серьёзным недостатком явилась некачественная отмывка плат перед нанесением маски, что приводило к недопустимо большим токам утечки по плате и к нарушениям в работе ионизационных камер.

После повторного изготовления по уточнённым требованиям платы прошли технический контроль и были признаны пригодными для сборки макетов. Образец платы показан на рис. 18.

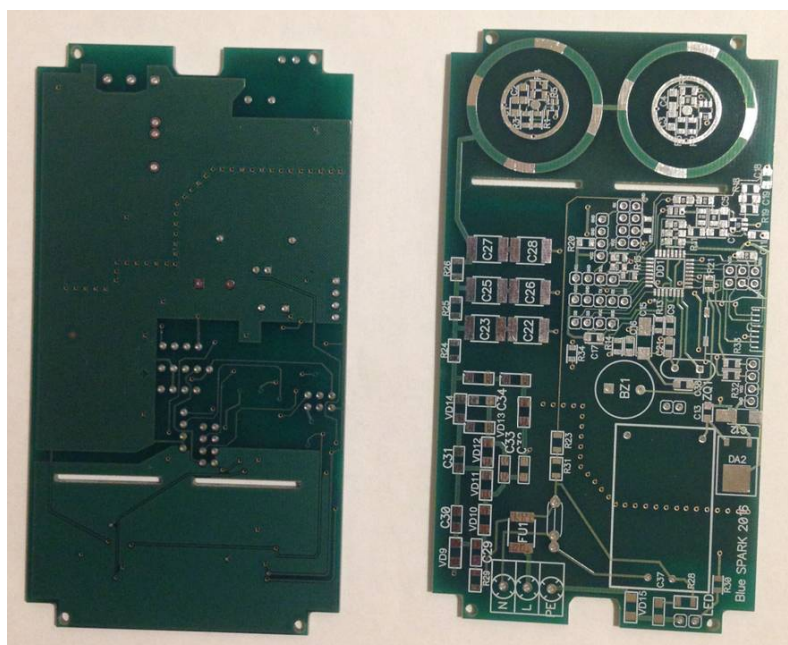


Рисунок 18 - Изготовленные печатные платы приборов.

Сборка плат макетов осуществлялась собственными силами. Плата с электронными компонентами показана на рис. 19.



Рисунок 19 - Собранная электронная плата прибора.

9 Изготовление корпусов макетов

По выбранному за основу дизайн-концепту корпуса были разработаны эскизы и изготовлен макет корпуса из ABS-пластика, путём доработки заготовки корпуса на станке с ЧПУ (рис. 20).

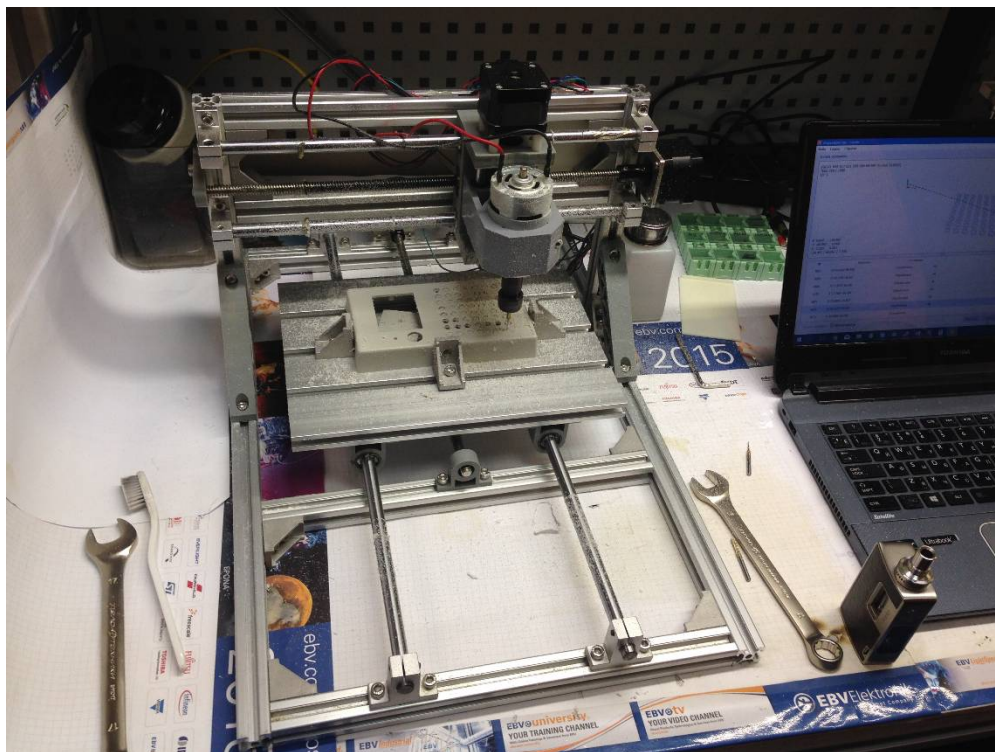


Рисунок 20 - Станок с ЧПУ использованный для изготовления макета корпуса и рабочее место оператора.

Выявленные при этом особенности и недочёты конструкции были обобщены и переданы Вострикову А.М. для дальнейшей доработки рабочих чертежей корпуса. Так, в частности, было выявлено, что широко распространенные на рынке недорогие графические TFT-дисплеи с рабочей диагональю 1.8-2.0 дюйма имеют ряд особенностей, требующих более широкого посадочного «окна» в лицевой панели корпуса, чем рабочая часть их экранов. Был также уточнен целый ряд размеров и расположение органов управления. В результате проделанной работы были изготовлены 3 корпуса, пригодных для последующей сборки опытных образцов макетов прибора (рис. 21).



Рисунок 21 - Макет корпуса, изготовленный для сборки опытных образцов приборов и последующих испытаний.

10 Сборка образцов макетов

Сборка действующих макетов прибора была осуществлена в лабораторных условиях путём размещения действующих макетов электронной части устройства в макетах корпусно-механической части. При этом были предприняты следующие меры, улучшающие характеристики устройства и необходимые при будущей разработке технологии серийного производства:

- установка в нижней части корпуса с внутренней стороны виброгасителя (использован листовой самоклеящийся автомобильный виброгаситель, вырезанный из листа по форме нижней части корпуса);
- фиксация электронных плат прибора термоклеем, снижающим передачу вибраций от корпуса к электронной плате;
- фиксация дополнительных сенсоров и модулей термоклеем для обеспечения ударопрочности конструкции;
- фиксация термоклеем разъёмных электрических соединений между установочными элементами на корпусе и электронной платой;
- установка антивандальной кнопки управления работой прибора;
- установка в верхней внутренней части корпуса (под воздухозаборными отверстиями) аэрозольных фильтров, вырезанных из наружного слоя стандартной медицинской трехслойной маски. Аэрозольный фильтр установлен на клей, отработана также технология его установки на двухсторонний скотч;
- верхняя и нижняя половины корпуса скрепляются шурупами и снабжаются наклейками на лицевую панель, выполненными из прозрачной самоклеящейся плёнки, на которую лазерным принтером нанесены необходимые надписи и изображения.

Внешний вид электронной платы и готового макета приведен на рис. 22

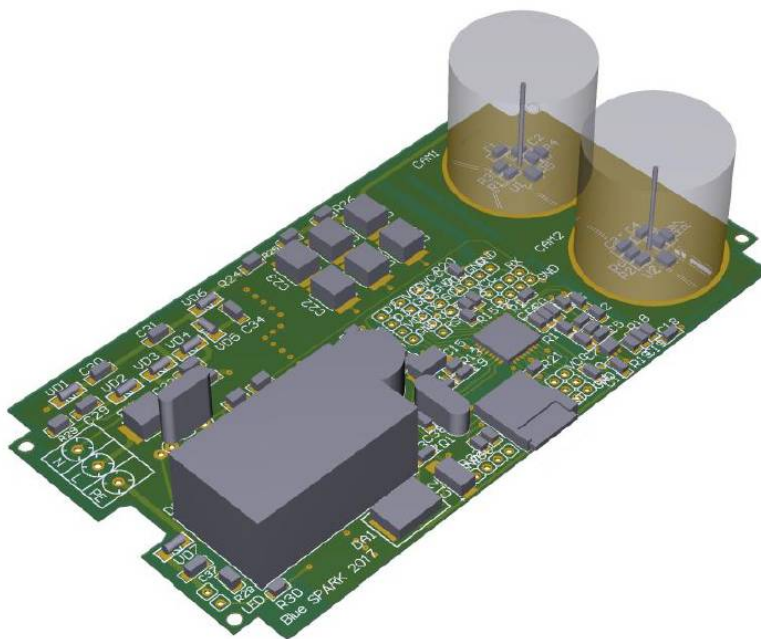


Рисунок 22 - Внешний вид полнофункционального макета и электронной платы с заниженными камерами.

Себестоимость макета детектора радона образуется из нескольких составляющих:

- C_k , стоимость компонентов и материалов (1858 рублей в соответствии с Приложением К);
- $C_{сп}$, стоимость сборки электронной платы (250 рублей);
- $C_{дк}$, стоимость доработки корпуса в соответствии с чертежами (200 рублей);
- $C_{сб}$, стоимость сборки макета (100 рублей).

Таким образом,

Себестоимость = $C_k + C_{сп} + C_{дк} + C_{сб} = 1858 + 250 + 200 + 100 = 2408$ рублей (42 доллара США).

11 Отладка образцов макетов, в т.ч. программы

Для отладки электроники и программного обеспечения макетов был изготовлен модуль-переходник, представляющий собой стандартный переходник TTL-RS232 -> USB, производства компании DFROBOT, дооборудованный линией программного сброса. С его помощью практически весь цикл программирования и отладки осуществлялись на ПЭВМ. Сигнальный аналоговый выход соединялся с аудио входом ПЭВМ, что позволило при отладке применять программный осциллограф SoundcardScope.

На первой стадии отладки было проверено функционирование аналоговой части прибора с помощью программного осциллографа и лабораторного источника слабого альфа-излучения. Анализ оцифрованных импульсов от альфа-частиц позволил уточнить номиналы ряда пассивных компонент аналогового тракта, а также осуществить обоснованную установку порогов дискриминации импульсов в программе

На второй стадии отладки была осуществлена комплексная отладка с дополнительными датчиками, дисплеем, модулем WiFi.

Было установлено следующее:

- датчик CO2 и WiFi модуль создают достаточно большую помеху в аналоговом тракте. Причиной являлся высокий (до 200 мА) импульсный потребляемый ток этих модулей. Помеха возникала в «земляной» линии питания. После переноса точки подключения непосредственно к выходу блока сетевого питания проблема была устранена.

- опциональный счётчик Гейгера производил большую импульсную помеху во время регистрации гамма-квантов, вызывавшую ложные срабатывания алгоритма детектирования альфа-частиц. Проблема была устранена изменением расположения счётчика СБМ-20-1 таким образом, чтобы анод был максимально удалён от ионизационных камер.

- в процессе отладки программного обеспечения прибора потребовалась отдельная оптимизация кода с целью снижения требований к ОЗУ и ПЗУ устройства. После оптимизации освобождено 40% ОЗУ и 25% ПЗУ устройства, что оставляет достаточные ресурсы для дальнейшего развития ПО.

Текст отлаженной программы приведен в Приложении Р.

12 Поверка образцов макетов

12.1 Тестирование макета электронной платы устройства

Макеты электронной платы устройства собраны на разработанной в ООО «Розет» печатной плате в соответствии с разработанной принципиальной схемой и монтажной схемой на платах, изготовленных ООО «Резонит». Фотографии электронных плат макетов представлены на рис. 23.

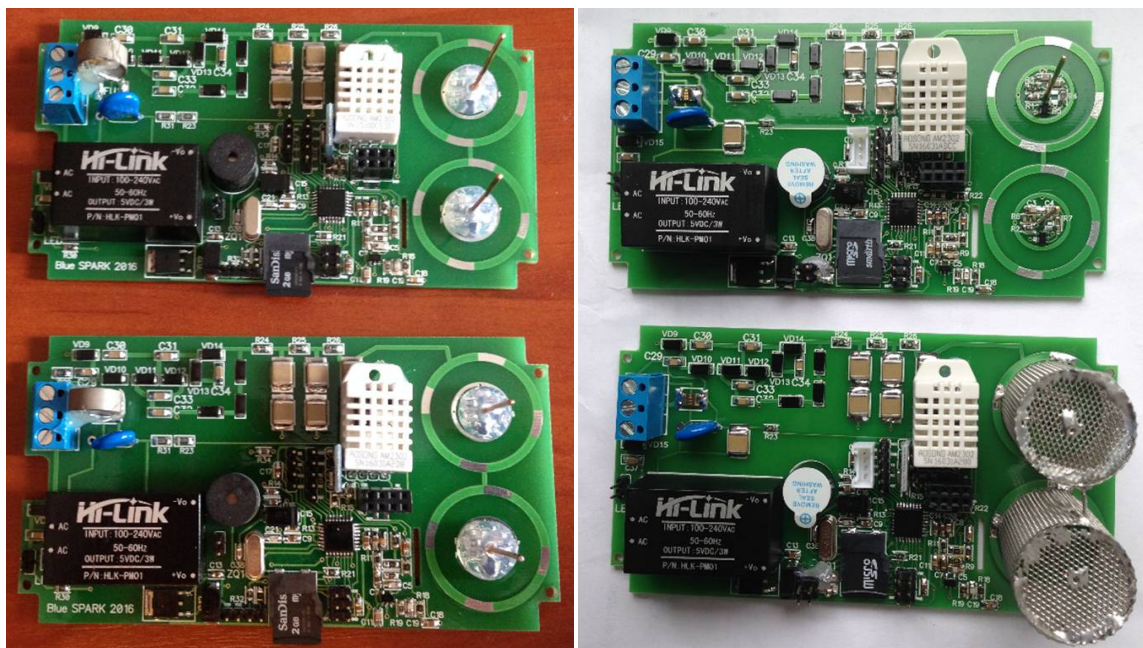


Рисунок 23 - Макеты электроники устройства на печатной плате.

В левой части представлены электронные платы без камер-ловушек, справа – с установленными камерами-ловушками. Питание макетов осуществлялось от осветительной сети переменного тока, имеющей реальное заземление. «Земля» макетов электрически соединена с «землей» осветительной сети.

12.2 Тестирование электроники устройства в режиме регистрации альфа-частиц искусственного источника

При тестировании электронной платы устройства с помощью искусственного источника альфа-частиц использовалась следующая методика:

Использован низко активный источник альфа-частиц, подносимый непосредственно к поверхности камер-ловушек (рис. 24).



Рисунок 24 - Низкоактивный источник альфа-частиц, использованный для испытаний.

Аналоговый сигнал со входа АЦП МК с помощью технологического интерфейса устройства был выведен на осциллограф и компьютер (примеры на рис. 25). Экспериментально исследовались форма и амплитуда импульсов, возникающих на выходе аналогового тракта при попадании альфа-частиц внутрь камер-ловушек и сравнивалась с импульсом, полученным путём математического моделирования камер аналогового электронного тракта устройства в САПР NI Multisim (результаты приведены на рис. 25)

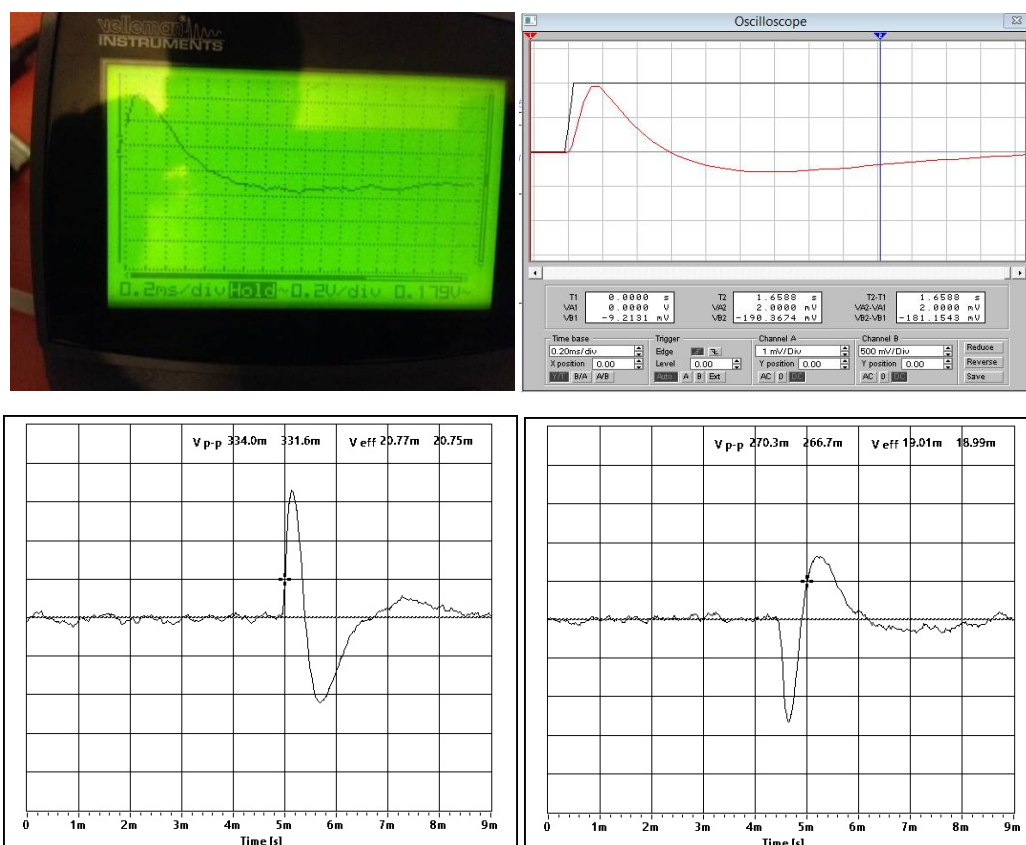


Рисунок 25 - Экспериментальный (слева сверху и оба внизу) и модельный (справа сверху) импульсы от альфа-частиц. По горизонтали время, по вертикали – амплитуда.

Исследовалась стабильность счёта прибора при неподвижном источнике альфа-частиц и сравнивалась с известной теоретической погрешностью, обусловленной стохастической природой альфа-распада. Установлена Пуассоновская природа регистрируемого потока событий, соответствующая современным представлениям о статистике распада изотопов.

Измерялась максимальная загрузочная способность прибора при счёте больших потоков альфа-частиц. Для этой цели использовался более сильный источник излучения. Максимальная загрузка камер оценена на уровне 100 импульсов в минуту. При более высоких загрузках альфа-события сливаются в одно и рост показаний прибора вначале останавливается, затем счёт полностью прекращается. Столь высокие загрузки крайне маловероятны в предполагаемых условиях эксплуатации, однако с целью обеспечения возможности измерять более высокие уровни излучения в схеме устройства имеются два интегральных канала измерения постоянного уровня на выходе ионизационных камер. Эти каналы дают возможность использовать прибор в режиме интегрирования тока камер практически при любых уровнях загрузки.

Испытания показали, что более половины альфа-частиц (60%), испущенных источником, уверенно регистрируются прибором и соответствуют литературным данным [9]. Форма и амплитуда реальных импульсов при этом полностью соответствуют расчётной модели. Погрешность счёта частиц прибором полностью определяется естественной статистической погрешностью, обусловленной стохастической природой альфа-распада.

12.3 Тестирование электроники устройства в режиме накопления ДПР радона

При тестировании электроники в режиме накопления и регистрации ДПР радона устройства были установлены в одном помещении с прибором SIRAD 106N [14], в помещении были плотно закрыты окна и двери и произведена синхронная запись показаний приборов в течении суток. В закрытом помещении происходит постепенное накопление радона и его ДПР, соответственно, можно осуществить грубую калибровку макетов [7,8,9,10]. Сравнение показаний промышленно выпускаемого прибора и испытываемых образцов показало, что уровень корреляции показаний приборов более 0.9, т.е. приборы измеряют один и тот же физический параметр среды. По результатам этих испытаний проведена предварительная калибровка макетов и оценена их чувствительность к радону. Она оказалась порядка 10 импульсов в минуту на 100 Бк/м^3 , что в десятки раз превышает аналогичный показатель отечественного прибора SIRAD-106N и в 8 раз превышает показатель корейского конкурента RadonEye. Результаты испытаний были обработаны в среде Matlab R13 и приведены на рис. 26.

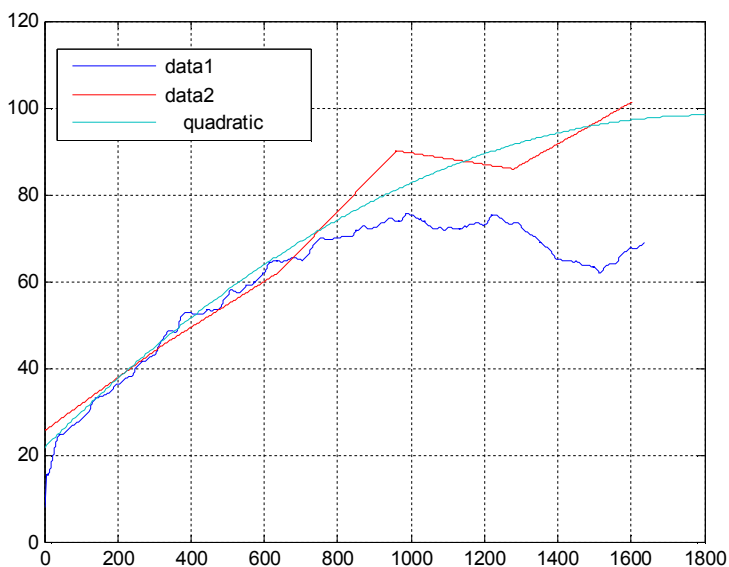


Рисунок 26 - Сравнительные испытания макетов (синий график) и серийного прибора SIRAD-106N (красный график). По горизонтали время в мин., по вертикали ЭРОА радона.

С целью выяснения повторяемости характеристик от прибора к прибору были проведены одновременные длительные испытания двух макетов по вышеописанной методике, с той разницей, что помещение не подготавливалось специально, а находилось в естественных условиях [7,8,9,10]. Эксперимент продолжался 26 дней. Результаты приведены на рис. 27.

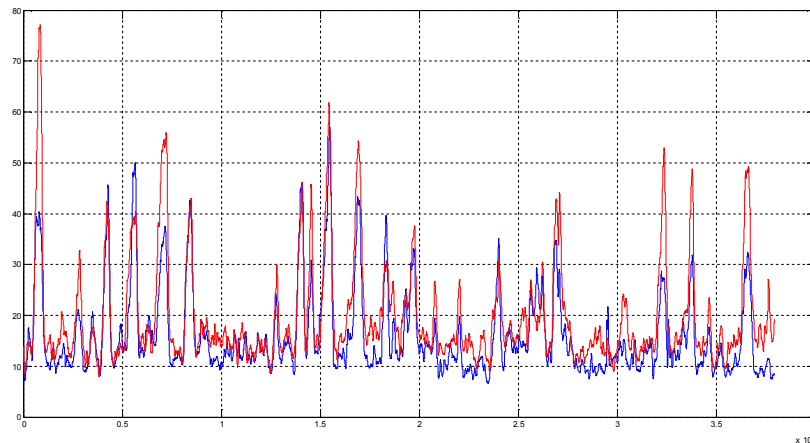


Рисунок 27 - Совместная работа 2-х макетов в реальных условиях 26 дней. Коэффициент взаимной корреляции показаний 0.9. Пики на графиках - это периоды, когда окна были закрыты, в основном в ночное время. По горизонтали время, по вертикали – ЭРОА радона.

Таким образом экспериментально была установлена хорошая повторяемость устройств от образца к образцу и соответствие показаний имеющимся литературным данным [6,7,8,9,10] о поведении концентрации радона в помещениях.

12.4 Калибровка макета

После сборки макета устройства была осуществлена его калибровка в сборе. Поскольку принцип действия разработанного прибора существенно отличается от принципа действия имеющихся отечественных и зарубежных аналогов, то возникает задача разработки адекватной методики его калибровки. Основное отличие данного устройства от аналогов в том, что он активно собирает ДПР радона из большого объёма окружающего воздуха (рабочий объём электростатического поля, эффективно собирающего ДПР из объёма воздуха порядка 1 м^3). Этот объём в результате работы открытой электростатической ловушки прибора обедняется продуктами распада, но вместо собранных прибором ДПР из окружающего воздуха поступают новые за счёт диффузии и разности парциальных давлений. Таким образом в формировании измерений участвует не только достаточно большой объём активного электростатического поля прибора, но и прилегающие к нему объёмы воздуха. В помещениях объемом свыше 10 м^3 поступление ДПР на ловушку прибора практически не отличается от работы в неограниченном объёме. Однако в малых помещениях и при отсутствии воздухообмена помещения с окружающей средой, прибор быстро обедняет весь воздух и начинает занижать показания. В то же время большинство доступных на рынке приборов (не использующих активную прокачку воздуха) содержат лишь небольшую (несколько см^3) измерительную камеру. В этом объёме они и анализируют активность воздуха тем или иным способом. При этом окружающий такие приборы воздух практически не обедняется по радону и его ДПР, даже если объём рабочего помещения весьма мал. Большинство методик калибровки радиометров и мониторов радона предполагает использование так называемой «радоновой камеры» [13]. Это герметизированное помещение (бокс, камера) с небольшим (менее 1 м^3) объёмом в который вводится обогащенный радоном осушенный и очищенный от аэрозолей воздух (рис. 28). Внутри камеры устанавливается вентилятор для равномерного перемешивания воздуха и обеспечения однородности концентрации радона по пространству. В камере размещаются также сенсоры температуры, влажности, давления для контроля условий проведения измерений. Для калибровки активных профессиональных приборов существуют и большие (рис. 28) радоновые комнаты (с объёмом около 15 м^3), однако их создание и эксплуатация очень дороги и такие системы имеются только в очень небольшом количестве. Таким образом возникает противоречие: малые радоновые боксы доступны, но не обеспечивают нормальной работы данного прибора, большие радоновые комнаты обеспечивают, но, фактически, недоступны.

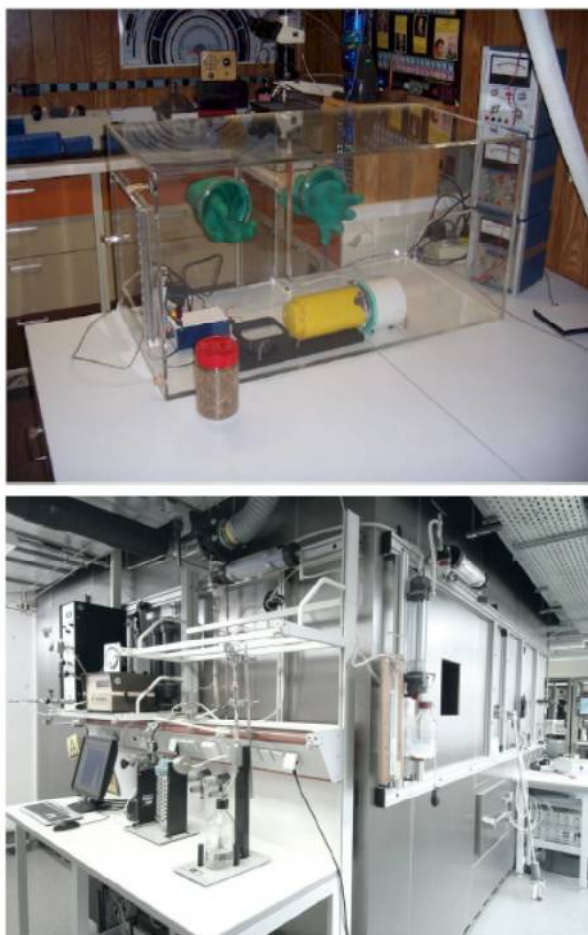


Рисунок 28 - Малый радоновый бокс (вверху) и большая радоновая комната (внизу).

Для разрешения указанного противоречия типовая методика проведения калибровки радиометров и мониторов радона была модифицирована следующим образом: калибровочные измерения производятся в малом радоновом боксе (рис. 29) по типовой методике, но показания разработанного прибора умножаются на коэффициент $K = V_{эф} / V_б$, где $V_б$ – объём воздуха в боксе, а $V_{эф}$ – эффективный объём воздуха, обедняемый прибором при работе в больших помещениях. Для действующего макета прибора $V_{эф}$ составляет 0.81 м^3 . Кроме того, обогащенный радоном воздух, подаваемый в бокс должен находиться в равновесии со своими продуктами распада. Для этого используется специфический генератор радона, полностью безопасный. Генератор представляет из себя пластиковую герметичную емкость, заполненную гранитной крошкой, используемой городскими дорожными службами как протевоналедевый агент (рис. 29).



Рисунок 29 - Конструкция калибровочной установки с генератором, фильтром и боксом.

Гранит – природный материал, отличающийся повышенным содержанием урана, радия, тория и, как следствие, постоянно выделяющий определенное количество газа радона. Большая поверхность гранитной крошки способствует свободной эксхалляции радона из микропор гранита в воздух. После 2-х недельной выдержки в емкости полностью устанавливается равновесие между выделяющимся радоном и его продуктами распада. С этого момента описанный генератор радона пригоден для работы. В зависимости от категории гранита концентрация радона в воздухе генератора может составлять от нескольких сотен, до десятков тысяч Бк/м³. В построенной калибровочной установке активность воздуха в генераторе составляла в среднем 4500 Бк/м³.

Таким образом, калибровочная установка состоит из:

- безопасного генератора равновесного радона (оранжевый пластиковый бокс, содержащий гранитную крошку и зарешеченные мелкой сеткой отверстия в нижней части бокса, для выхода радона);

- аэрозольного фильтра-осушителя, расположенного в отделении верхней крышки радонового бокса (синяя часть нижнего бокса). Фильтр-осушитель состоит из осушённого силикагеля, помещенного в медицинскую 3-х слойную маску, эффективно останавливающую аэрозоли. Через отверстия в нижней части отделения обеспыленный и осушенный радон поступает в нижний бокс под действием естественной гравитации.
- измерительного бокса (нижняя, полупрозрачная часть установки), где размещен ввод сетевого напряжения, вентилятор для перемешивания воздуха до однородности концентрации радона, и приборы: калибруемый и эталонный. В качестве эталонного прибора были использованы SIRAD 106N [14] и RADEX MR107 [15]. Второй предпочтительнее, ввиду более низкого порога регистрации радона (30 Бк/м^3) и наличия датчиков температуры и влажности.

Все соединения между компонентами установки выполнены герметичными, с использованием клея-герметика «Вибросил».

Работа установки при калибровке макета происходит следующим образом: после установления равновесия в генераторе радона, в нижний бокс помещаются калибруемый и эталонный приборы, включаются приборы и вентилятор, снимается предохранительная лента с отверстий фильтра-осушителя, выходящих в нижний (измерительный) бокс, и верхняя часть установки (генератор с фильтром) устанавливается на нижнюю. Начинается натекание радона из генератора в измерительный бокс. Таким образом, концентрация радона в измерительном боксе начинает нарастать. Диффузия происходит медленно, поэтому процесс нарастания концентрации радона может продолжаться до 2-х недель и более. Всё это время может осуществляться непрерывный мониторинг параметров среды в измерительном боксе. Это даёт возможность установить не только коэффициент пересчёта показаний калибруемого прибора к реальным значениям концентрации радона, но и установить наличие корреляции между показаниями приборов. На начальном участке работы установки (первые несколько дней) характер нарастания концентрации радона близок к линейному, что удобно для проведения измерений.

На данной установке были выполнены калибровочные измерения, которые установили высокую корреляцию (около 0.9) между показаниями эталонного прибора и калибруемого макета и позволили вычислить калибровочный коэффициент $M=R/N$ (где R – показания эталонного прибора, а N – число зарегистрированных макетом альфа-распадов в час), переводящий альфа-события, зарегистрированные макетом за час в Бк/м^3 . Результаты калибровочных измерений приведены на рис. 30.

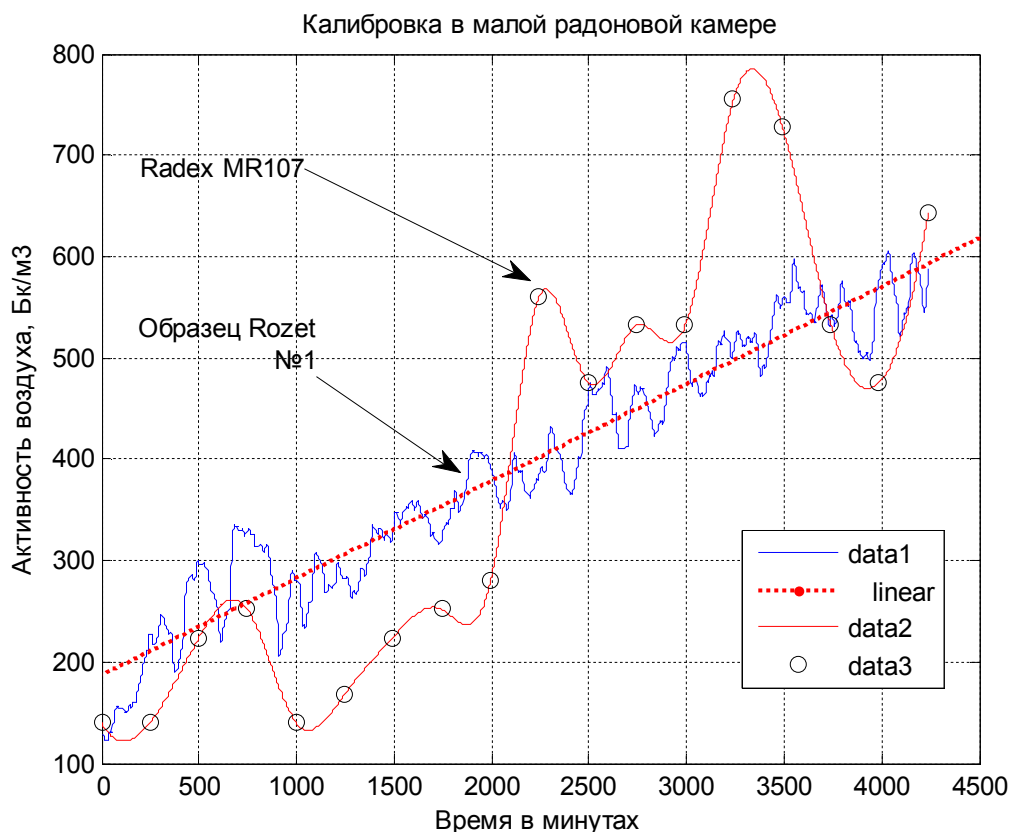


Рисунок 30 - Калибровочные измерения макета в радоновой камере (синим цветом – показания макета, красным – интерполированные показания эталона, черными кружками – фактические показания эталона, штрихом – аппроксимирующая прямая).

В ходе калибровки было установлено следующее:

- калибровочный коэффициент (в боксе) $M=4.86$;
- коэффициент корреляции между показаниями макета и эталона $r=0.87$;
- среднеквадратичное отклонение показаний макета от аппроксимирующей прямой 8.1%;
- среднеквадратичное отклонение эталона (RADEX MR107) 26%;
- периодичность выдачи показаний макета – 1 минута;
- периодичность выдачи показаний эталона – 4 часа;
- условия в камере: средняя влажность $40\% \pm 5\%$, температура $18 \pm 1^\circ\text{C}$, атмосферное давление 758 ± 10 мм. рт. ст.

Поскольку проведенная калибровка продемонстрировала более высокую разрешающую способность исследуемого прибора по сравнению с контрольным, то измерения были проведены повторно, но уже при более высоких концентрациях радона в камере. Более высокая концентрация обеспечивает снижение статистической погрешности как эталонного, так и калибруемого приборов и позволяет точнее определить калибровочные коэффициенты. Результат такой повторной калибровки приведен на рис. 31. При этом было установлено, что статистическая погрешность измерений эталонного прибора RADE MR107 снизилась до 12%, а

у калибруемого макета прибора осталась примерно на том же уровне – 10%. Коэффициент корреляции показаний прибора в этом случае составил 0.93.

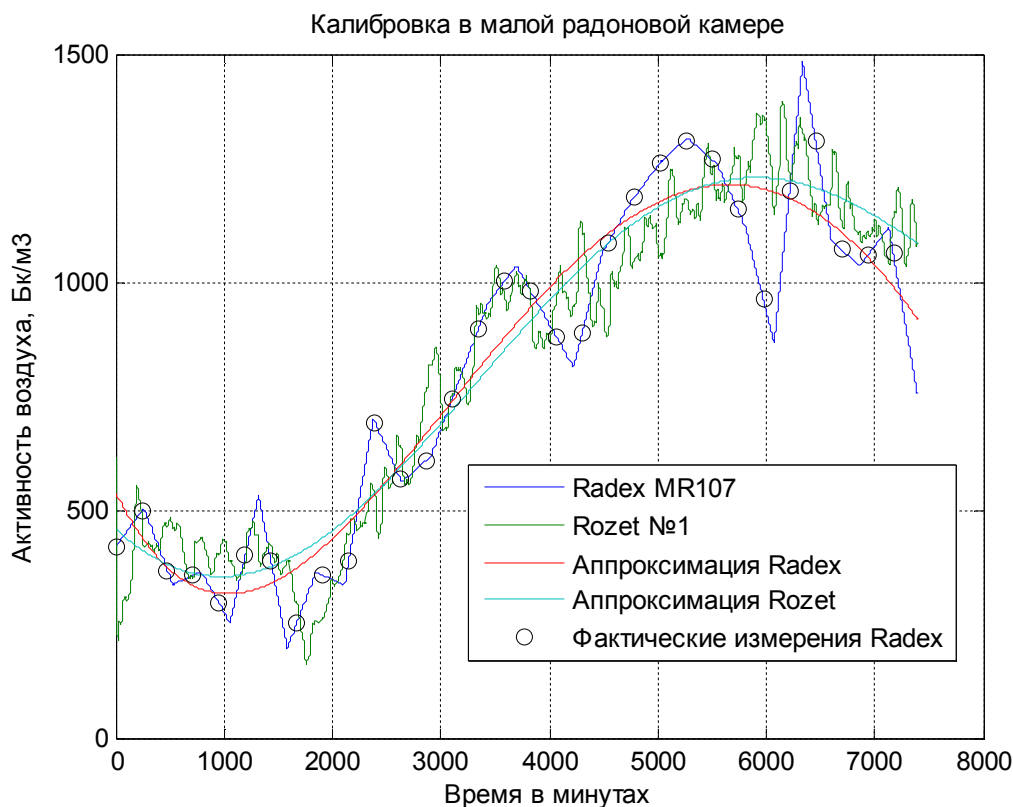


Рисунок 31 - Более длительные (5 суток) калибровочные измерения макета в радоновой камере при более высоких концентрациях радона.

Результаты калибровки указывают на более высокую разрешающую способность макета по сравнению с эталоном при низких уровнях радона (до 1000 Бк/м^3), а также демонстрируют малое время выдачи очередных показаний макетом (1 минута).

Результаты калибровки в малом радоновом боксе позволяют вычислить (с учётом фактического объёма воздуха в боксе $30 \times 20 \times 35 \text{ см} = 0.021 \text{ м}^3$) калибровочный коэффициент для открытого воздуха и больших помещений, который составил $L = M/K = 4.86 / (0.81 / 0.021) = 0.126$. Таким образом, для получения показаний макета в Бк/м^3 на открытом воздухе и в больших помещениях следует умножать число зарегистрированных прибором альфа-событий в час на коэффициент $L = 0.126$.

12.5 Поверочные испытания образцов макетов

С целью проверки уже откалиброванного в малой радоновой камере макетного образца необходимо было произвести поверочные испытания в реальном помещении большого размера. В качестве большой радоновой комнаты было использовано бытовое помещение объёмом 45 м³, в монолитном доме, в котором изначально имелся несколько повышенный уровень фоновой радиации (по гамма-фону от 20 до 30 мкР/час). Причиной повышенного фона является наполнитель бетона, в состав которого частично входили граниты 2-й, 3-й категории, с повышенным содержанием радионуклидов. При проведении поверочных испытаний данная комната была загерметизирована (пластиковые окна, двери с герметизирующими прокладками) на период более 10 дней. При этом в комнате находились и работали образцы макетов, эталонный прибор RADEX MR-107 и бытовой вентилятор, обеспечивающий равномерное непрерывное перемешивание воздуха. Размещение приборов было произведено в соответствии со стандартными рекомендациями (рис. 32) в точках (8) и (1) соответственно, на расстоянии более 2-х метров друг от друга.

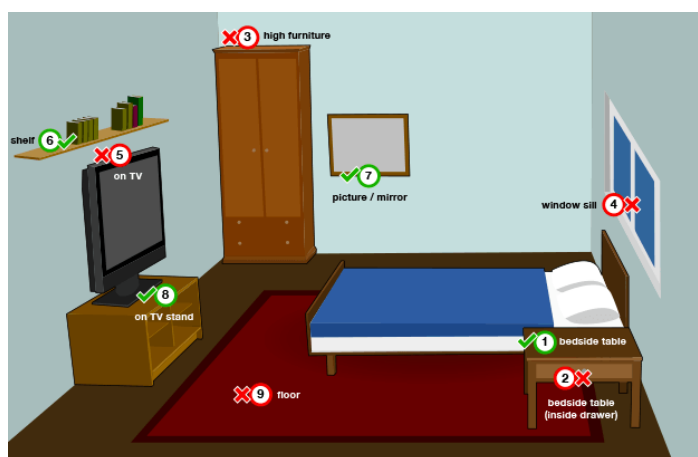


Рисунок 32 - Рекомендованное стандартное размещение приборов при измерениях в бытовых помещениях.

Условия в помещении контролировались дистанционно, через сервер ThingSpeak, график данных с которого приведен на рис. 33.



Рисунок 33 - Показания макета во время поверочных испытаний в комнате.

Результаты поверочных испытаний:

- средний уровень радона за 10 суток по эталону RADEX MR-107 составил 42.8 Бк/м³ при среднеквадратичной случайной ошибке среднего 9.23%;
- средний уровень радона за 10 суток по макету Rozet №1 составил 34.2 Бк/м³ при среднеквадратичной случайной ошибке среднего 2.57%, по макету Rozet №2 – 33.8 Бк/м³ при среднеквадратичной случайной ошибке среднего 2.48%;
- систематическая погрешность макета Rozet №1 составила 20%, Rozet №2 – 21%;
- суммарная погрешность (систематическая плюс случайная) макета составила 22.6% и 23,5%;
- масса прибора макета Rozet №1 (без сетевого шнура) составила 245 г., масса прибора макета Rozet №2 (без сетевого шнура) составила 244 г. по результатам взвешивания на электронных весах DH2-000060 с погрешностью 1 г.

Условия во время испытаний:

- средняя температура $23 \pm 1^\circ\text{C}$;
- средняя влажность $23 \pm 2\%$;
- среднее атмосферное давление 765 ± 10 мм. рт. ст.

Таким образом, поскольку для бытовых радиометров и мониторов радона вполне допустимой считается погрешность 30%, разработанный прибор пригоден для выполнения заявленной основной функции. При совершенствовании процедуры калибровки возможно многократное снижение погрешности (главным образом, её систематической составляющей), что позволит использовать данный прибор в качестве профессионального монитора радона.

Перспективность электростатических методов сбора ДПР радона в сравнении с методами принудительной прокачки воздуха через фильтры обоснована в работе [10].

Диапазон измерения объемной активности радона оценен теоретически. Верхний предел измерений обусловлен «мертвым временем» счётчика альфа-частиц, которое составляет 10 мс. Это время обусловлено программным обеспечением прибора и превышает физическое мертвое время ионизационной бикамеры, которое определяется по осциллограмме импульса от альфа-частиц (рис. 25) и составляет 5 мс. Мертвое время прибора $\tau = 10$ мс является продлевающимся. При таком мертвом времени предельная скорость счёта (при принятых потерях 20%) составляет $r = 1/2\tau = 50$ событий в секунду (рис. 34). Поскольку при имеющейся (экспериментально измеренной) чувствительности прибора 1 событие в минуту возникает при ОА радона 10 Бк/м^3 , то 50 событий в секунду возникнет при $A = 60 \cdot 10 \cdot 50 = 30000 \text{ Бк/м}^3$. Соответственно, принимая верхний предел измеряемой активности $10\,000 \text{ Бк/м}^3$, мы ожидаем дополнительную погрешность, вызванную высокой загрузкой камеры не более 10%.

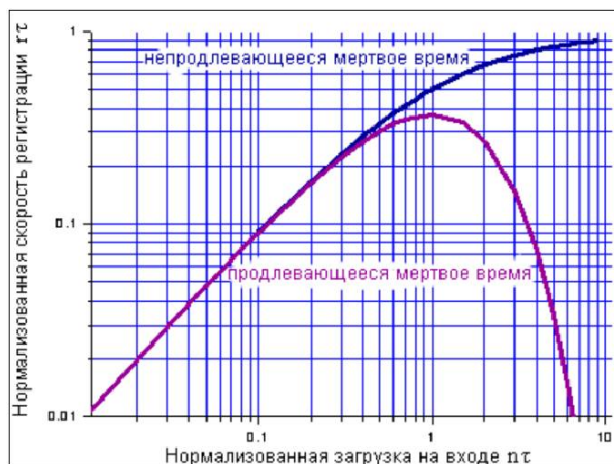


Рисунок 34. Зависимость скорости регистрации от загрузки счётчика частиц

Нижний предел измерений обусловлен Пуассоновской статистикой альфа-распадов, чувствительностью прибора и временем интегрирования оценки. При уровне ОА радона 1 Бк/м^3 , прибор (при экспериментально измеренной чувствительности) будет регистрировать в среднем 1 событие за 10 минут. Поскольку относительное среднеквадратичное отклонение Пуассоновского процесса от среднего значения обратно пропорционально корню квадратному из числа событий $1/\sqrt{N}$, то 30% -му отклонению соответствует 10 событий. Такое количество событий при уровне радона 1 Бк/м^3 набирается в среднем за 100 минут. В программном обеспечении прибора осуществляется автоматически управляемое экспоненциальное усреднение измерений. При уровнях ниже 5 Бк/м^3 постоянная времени экспоненциального фильтра составляет 120 минут, что позволяет обеспечить статистическую погрешность $<30\%$ вплоть до уровня 1 Бк/м^3 . Таким образом, нижний предел чувствительности определен как 1 Бк/м^3 .

Допустимая влажность определялась экспериментально с использованием установки рис. 29. При этом находящийся в генераторе радона гранитный щебень увлажнялся водой, после чего начиналось увеличение влажности воздуха в нижней измерительной камере. При относительной влажности 73% наступил отказ эталонного прибора SIRAD-MR106N (прекращение счёта альфа-частиц), испытуемый же образец разработанного прибора не показал никаких особенностей поведения вплоть до влажности 87%. Более высокого уровня влажности достичь не удалось. Таким образом, работоспособность прибора при влажностях до 80% подтвердилась экспериментально.

Гарантийный срок эксплуатации оценивался экспериментально по длительной (13 месяцев) эксплуатации отдельно изготовленного макета в нормальных климатических условиях в отапливаемом помещении. Макет был постоянно включен всё это время и передавал данные на сервер ThinkSpeak. За весь срок экспериментальной эксплуатации не было зафиксировано ни одного отказа макета. Также в течение 6 месяцев проводилась непрерывная эксплуатация ещё 2-х макетов, из которых также ни один не отказал. Эти данные позволяют рекомендовать гарантийный срок эксплуатации 24 месяца. Был зафиксирован систематический дрейф показаний прибора в сторону увеличения после продолжительной непрерывной работы. Дрейф показаний после годичной эксплуатации составил $+4 \text{ Бк/м}^3$, что обусловлено постепенным накоплением долгоживущих ДПР радона (в основном, Pb-210) на элементах прибора.

Для оценки срока сохраняемости приборов при складском хранении было произведено экспериментальное хранение 50 макетов прибора в нормальных условиях, т.е. был использован метод непосредственного хранения [16]. После 9-ти месячного хранения все приборы были проверены на работоспособность. Из 50 приборов отказало после хранения 2. Таким образом, срок сохраняемости при потерях на хранение 20% можно оценить 3,5 лет, т.е. 42 месяца.

Средний срок службы оценивается исходя из надежности и сохраняемости компонент прибора, приведенных в Перечне компонент и материалов (Приложение К). Поскольку прибор ремонтпригоден по конструкции, то выход из строя единичного компонента или узла и его последующая замена не сокращает срок службы прибора. Эксплуатация прибора становится нецелесообразной только при массовых отказах компонент, а таковых, исходя из Перечня компонент можно ожидать через 10 лет эксплуатации. Однако, следует учесть, что быстрое обновление элементной базы и технологий делает прибор 5-ти летней давности морально устаревшим. Ввиду этого рекомендованное значение для срока службы прибора составляет 5 лет.

Протокол и акт поверочных испытаний приведены в приложениях С и Т, соответственно.

По результатам калибровки и поверочных испытаний фактически достигнуты следующие показатели разработанного прибора (см. Таблицу 1).

Таблица 1.

Перечень достигнутых технических характеристик прибора

| Номер показателя | Показатель | По ТЗ | Фактически | Конкурент RADEX MR107 | Примечание |
|------------------|--|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------|
| 1. | Габаритные размеры | 150x100x50 | 140x80x40 | 154x80x50 | Достигнут |
| 2. | Масса | 400 г. (не более) | 245 г. | 236 г. | Достигнут |
| 3. | Время экспозиции | 15 минут | 10 минут | 4 часа | Достигнут |
| 4. | Погрешность основная | | 22.6% | <30% | Не задан |
| 5. | Электробезопасность | Для бытовых приборов | Для бытовых приборов | Для бытовых приборов | Достигнут |
| 6. | Микрофонный эффект | Должен быть подавлен | Подавлен | Отсутствует | Достигнут |
| 7. | Потребляемая от сети мощность | | 2 Вт | 2 Вт | Не задан |
| 8. | Чувствительность датчика по радону (альфа-частиц в минуту на 100 Бк/м ³) | | 15 | 0.3 | Не задан |
| 9. | Диапазон измерения объемной активности радона | 1-10000 Бк/м ³ | 1-10000 Бк/м ³ | 30-10000 Бк/м ³ | Достигнут |
| 10. | Допустимая относительная влажность воздуха при температуре 25 град С | 80% | 87% | 72% | Достигнут |

| Номер показателя | Показатель | По ТЗ | Фактически | Конкурент RADEX MR107 | Примечание |
|------------------|----------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|------------|
| 11. | Себестоимость | 1800-3000 рублей | 2408 рублей | 5700 рублей | Достигнут |
| 12. | Гарантийный срок эксплуатации | 24 месяца | 24 месяца | | Достигнут |
| 13. | Гарантийный срок хранения | 36 месяцев | 42 месяцев | | Достигнут |
| 14. | Средний срок службы | Не менее 5 лет | Не менее 5 лет | | Достигнут |

Обоснование себестоимости макета детектора радона приведено в Главе 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, задачи разработки выполнены, недостатки, выявленные на 1-м этапе разработки успешно устранены на 2-м этапе. Разработана электронная схема устройства, разработана топология печатной платы устройства, разработана и усовершенствована инновационная конструкция камер-ловушек и система их питания, разработано программное обеспечение устройства, разработан дизайн-концепт корпуса, изготовлены макеты корпусов и собраны полнофункциональные макеты устройств. Макет устройства испытан и показал хорошие результаты, соответствующие требованиям Технического задания, а по некоторым параметрам превзошёл их. Чувствительность устройства к ДПР радона уточнена в ходе испытаний и измерена на уровне 15 импульсов в минуту на 100 Бк/м^3 . Этот основной показатель в 12 раз лучше, чем у ближайшего зарубежного конкурента RadonEye (1.35 импульсов в минуту на 100 Бк/м^3), разработанного шведской компанией Radon FTLab и производимого в Ю. Корее. Отечественные конкуренты, такие как бытовые детекторы-мониторы радона SIRAD MR-106N и RADEX MR-107 отстают по этому параметру приблизительно в 50 раз. Фактическая чувствительность прибора соответствует профессиональным приборам, таким как RAD7 британской компании DurrIDGE (13 импульсов в минуту на 100 Бк/м^3). Себестоимость электронной платы устройства вместе с монтажом не превысила 2108 рублей. Себестоимость всего устройства с учётом подготовки корпуса и сборки оценивается в 2408 рублей (при мелкосерийном производстве). Области применения устройства могут являться:

- в быту: персональный мониторинг радона в жилых и нежилых помещениях,
- в экологии: экологический мониторинг радоновых загрязнений воздуха в городах и населенных пунктах,
- в строительстве: при исследовании эманационной способности различных строительных материалов,
- в промышленности: для контроля радионуклидной загрязнённости воздуха в чистых и особо чистых помещениях,
- в фундаментальной физике: для мониторинга работы противорадоновых систем, использующихся в низкофоновых физических лабораториях.

Оценка эффективности проведенной работы основывается на следующих критериях:

- актуальность НИР: высокая, поскольку направлена на решение радоновой проблемы, одной из важнейших проблем радиоэкологии;

- научная новизна исследования: разработанная технология по данным литературного и патентного поиска не имеет на сегодняшний день аналогов в мире и демонстрирует существенный прирост чувствительности инновационного сенсора к ДПР радона;

- применяемый инструментарий исследования: включает в себя литературные обзоры, патентный поиск, обзор рынка, математический анализ, инженерное проектирование, экспериментальные исследования;

- затраты на проведение исследования: невысоки, общая оценка себестоимости разработки 2.5 млн. рублей, оценочная стоимость внедрения в серийное производство составляет 10 млн. руб, прогнозируемый эффект (оценка технико-экономической эффективности внедрения) зависит от объемов внедрения, на рынке бытового оборудования он оценивается 10 млн. руб. в год, оценка эффекта от внедрения на других сегментах рынка не производилась;

- возможность использования результатов исследования для внедрения в хозяйственную практику высокая, сферы возможного применения от бытовой техники до передовых научных исследований в области фундаментальной физики, например, низкофоновых лабораторий.

Оценка научно-технического уровня выполненной НИОКР в сравнении с лучшими достижениями в данной области показывает, что в ходе работы получен ряд инновационных патентоспособных решений, создан новый физический принцип сенсора продуктов распада радона, достигнуто улучшение чувствительности детектора ДПР радона в 10-12 раз по сравнению с лучшими образцами конкурентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Уткин В. И. «Радоновая проблема в экологии». // Соросовский образовательный журнал. Том 3 №6, 2000, с.73-80
2. Сулейманов Е.В., Коршунов А.О., «Радиоактивность в окружающей среде. Радиационный фон внутри помещений» // Учебное пособие. Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского.
3. Norafatin Khalid, Amran Ab Majid, Redzuwan Yahaya, Muhammad Samudi Yasir, Faizal Mohamed. « Construction of radon chamber for determination of radon emanation using continuous radon monitor » // The Malaysian Journal of Analytical Sciences, Vol 18 No 3, 2014, с. 618 – 628
4. Бойко В.И., Жерин И.И., Каратаев В.Д., Недбайло Ю.В., Силаев М.Е. «Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов». Учебное пособие. Под общей редакцией Бойко В.И., Силаева М.Е. // УДК 539.17; 621.039
5. Толстунов В.А, Степанец П.В. «Нелинейный усредняющий фильтр с экспоненциальным преобразованием» // Доклады ТСУРа, № 2 (20), декабрь 2009, с.43-47, УДК 004.67
6. Афонин А. А., автореферат диссертации «Методы определения изотопов радона и их реализация в измерительном комплексе, использующая электроосаждение дочерних продуктов, для оценки факторов радиационной опасности». // Москва, МИФИ, 2013.
7. Venoso Gennaro, «Development of calibration techniques for active and passive radon detectors» // докторская диссертация, Università degli Studi di Napoli “Federico II”, Неаполь, 2007.
8. Patricia Blanco-Rodríguez, Luis Alfonso Fernández-Serantes, Alberto Otero-Pazos, José Luis Calvo-Rolle, Francisco Javier de Cos Juez « Radon Mitigation Approach in a Laboratory Measurement Room». //MDPI journal, Sensors 2017, 17, 1090; doi:10.3390/s17051090, 2017
9. Caresana M., Garlati L., Murtas F., Romano S., Severinoc C.T., Silaric M. «Real-time measurements of radon activity with the Timepix-based RADONLITE and RADONPIX detectors» // CERN, 2014, doi:10.1088/1748-0221/9/11/P11023
10. Bacon M.E., «A comparison of electrostatic and filtered air collection of radon progeny» // Eur. J. Phys. 25 (2004) 239–248, doi: 10.1088/0143-0807/25/2/010
11. Затулов С., Миронов А., Плоткин И., Твердов И., «Подавление помех в цепях электропитания» // М. 2015, ООО «Александр Электрик»

12. Мисюченко И., «Устройство для определения содержания радионуклидов в воздухе»
//Заявка на изобретение RU 2016 124 148 А Дата подачи заявки: 17.06.2016, Дата публикации заявки: 22.12.2017 Бюл. №36
13. Романчук Н.В., Лобач Д.И., Уголев И.И., Савицкая Е.И., Соколовский А.С. «О разработке средств и техники метрологической поддержки радоновых исследований в Беларуси». Международный экологический университет им. АМ- Сахарова, Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь. BY0200118
14. Детектор-индикатор радона SIRAD MR-106/SIRAD MR-106N. Руководство по эксплуатации, компания SinmoR
15. Детектор-индикатор радона RADEX MR-107. Руководство по эксплуатации, компания Quarta-Rad.
16. ГОСТ 21493-76. Изделия электронной техники. Требования по сохраняемости и методы испытаний. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1994.

Приложение А Принципиальная схема устройства

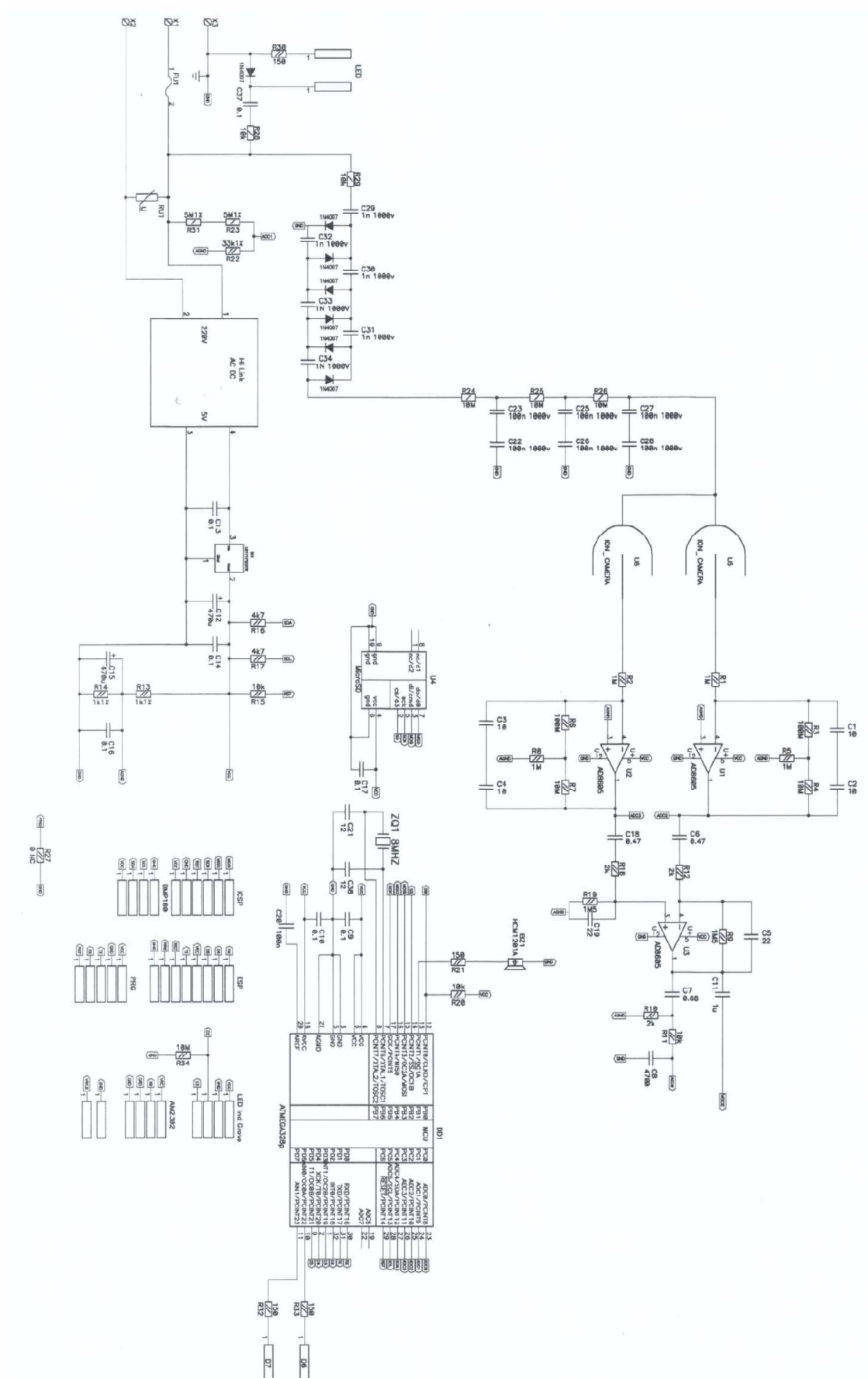


Рисунок А.1 - Принципиальная схема устройства

Приложение Б

Перечень компонентов и материалов электронной платы

Таблица Б.1.

Перечень компонентов и материалов электронной платы

| Номер | Обозначение по схеме | Расшифровка | Наименование, номинал | Корпус | Количество | Цена, руб. |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|----------------|------------|------------|
| 1 | VD1 - VD7 | Диод SMD | 1N4007 1000V 1A | DO-41 | 7 | 1 |
| 2 | U1, U2, U3 | Операционный усилитель | AD8605 | SOT23-5 | 3 | 50 |
| 3 | DD1 | Микропроцессор | ATMEGA328_20AI | TQFP32 | 1 | 80 |
| 4 | RU1 | Варистор | B72520 250/390B 17 кДж | | 1 | 5 |
| 5 | C9, C10, C13, C14, C16, C17 | Конденсатор SMD | CC0805 0.1 мкФ 5% | O805 | 6 | 1 |
| 6 | C7 | Конденсатор SMD | CC0805 0.68 мкФ 5% | O805 | 1 | 1 |
| 7 | C11 | Конденсатор SMD | CC0805 1 мкФ 10% | O805 | 1 | 1 |
| 8 | C1, C2, C3, C4 | Конденсатор SMD | CC0805 10 пФ 5% | O805 | 4 | 1 |
| 9 | C21, C38 | Конденсатор SMD | CC0805 12 пФ 5% | O805 | 2 | 1 |
| 10 | C5, C19 | Конденсатор SMD | CC0805 22 пФ 5% | O805 | 2 | 1 |
| 11 | C20 | Конденсатор SMD | CC0805 100нФ 5% | O805 | 1 | 1 |
| 12 | C8 | Конденсатор SMD | CC0805 4700 пФ 5% | O805 | 1 | 1 |
| 13 | C37 | Конденсатор SMD | CC0805 0.01 мкФ x 1000B 10% | O1206 | 1 | 4 |
| 14 | C29 - C34 | Конденсатор SMD | CC0805 10нФ x 1000B 10% | O1812 | 6 | 10 |
| 15 | C22, C23, C25 – C28 | Конденсатор SMD | CC0805 0.1 мкФ x 1000B 10% | O2220 | 6 | 25 |
| 16 | FU1 | Предохранитель | 0.25A 250B | 1206 | 1 | 5 |
| 17 | HB_SD | Держатель SD | Micro SD socket | | 1 | 40 |
| 18 | BZ1 | Звукоизлучатель | HCM1206A | | 1 | 30 |
| 19 | U5, U6 | Ионизационная камера | Сетка-фильтр 3/4 дюйма, обработанная | | 2 | 18 |
| 20 | DA1 | Стабилизатор напряжения 3.3 В | LM1117DT-3.3/NOPB | TO-252 / D-PAK | 1 | 120 |
| 21 | X11 - X47 | Контакты | PLS-PIN | PLS-PIN | 37 | 1 |
| 22 | ZQ1 | Кварцевый резонатор 8 МГц | QUARTZ 8 MHz | HC-49 | 1 | 7 |
| 23 | C12, C15 | Конденсаторы полимерные эл. | 470 мкФ 4В 20% | POLYMER-C | 2 | 33 |
| 24 | R27 | Перемычка 0R | 0R (NC в базовой версии) | R0805 | 1 | 1 |
| 25 | R13, R14 | Резистор SMD | 1 K 1% | R0805 | 2 | 1 |
| 26 | R1, R2, R5, R8 | Резистор SMD | 1 M 1% | R0805 | 4 | 1 |
| 27 | R9, R19 | Резистор SMD | 1M5 1% | R0805 | 2 | 1 |
| 28 | R10, R12, R18 | Резистор SMD | 2 K 1% | R0805 | 3 | 1 |
| 29 | R16, R17 | Резистор SMD | 4K7 1% | R0805 | 2 | 1 |
| 30 | R11, R15, R20 | Резистор SMD | 10 K 1% | R0805 | 3 | 1 |
| 31 | R4, R7, R34 | Резистор SMD | 10 M 1% | R0805 | 3 | 1 |
| 32 | R22 | Резистор SMD | 33 K 1% | R0805 | 1 | 1 |
| 33 | R3, R6 | Резистор SMD | 100 M 1% (допустимо 5%) | R0805 | 2 | 10 |
| 34 | R21, R32, R33 | Резистор SMD | 150 Ом 5% | R0805 | 3 | 1 |
| 35 | R30 | Резистор SMD | 2 кОм 5% | R0805 | 1 | 1 |
| 36 | R23, R31 | Резистор SMD | 5M1 250 В 1% | R1206 | 2 | 2 |
| 37 | R28, R29 | Резистор SMD | 10K 250 В 5% | R1206 | 2 | 2 |

Продолжение Таблицы Б.1.

| Номер | Обозначение по схеме | Расшифровка | Наименование, номинал | Корпус | Количество | Цена, руб. |
|-------|----------------------|----------------------------|-----------------------|--------|------------|------------|
| 38 | R24 - R26 | Резистор SMD | 10M 250 В 5% | R1206 | 3 | 2 |
| 39 | VD8 | Супрессоры 440В | РКЕ440СА | DO-11 | 3 | 5 |
| 40 | KL1 | Клемма 3-х контактная 250В | DMB-4770-T3 | | 1 | 10 |

Приложение В
Чертеж топологический печатной платы

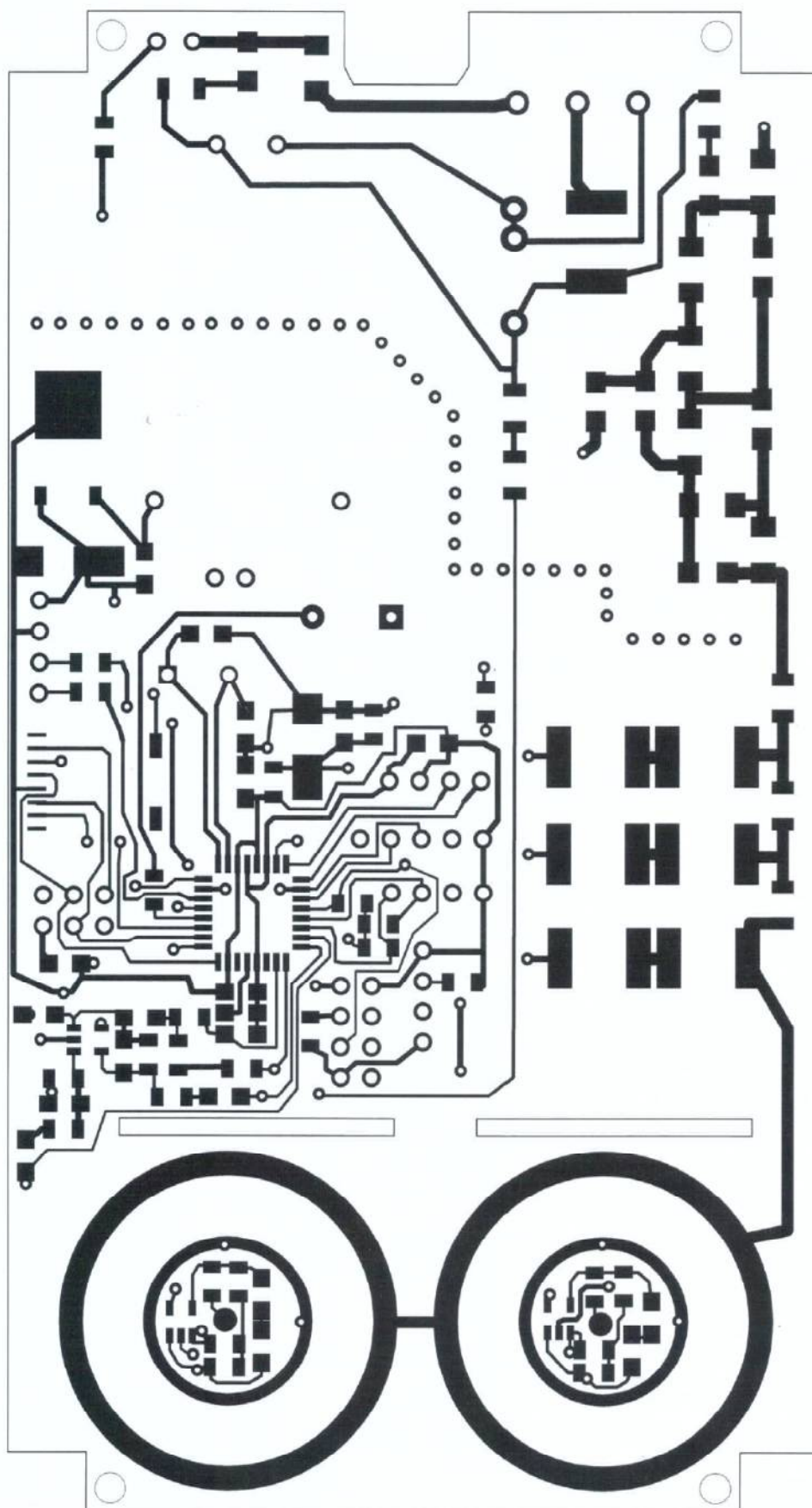


Рисунок В.1 - Топология проводников верхней стороны печатной платы

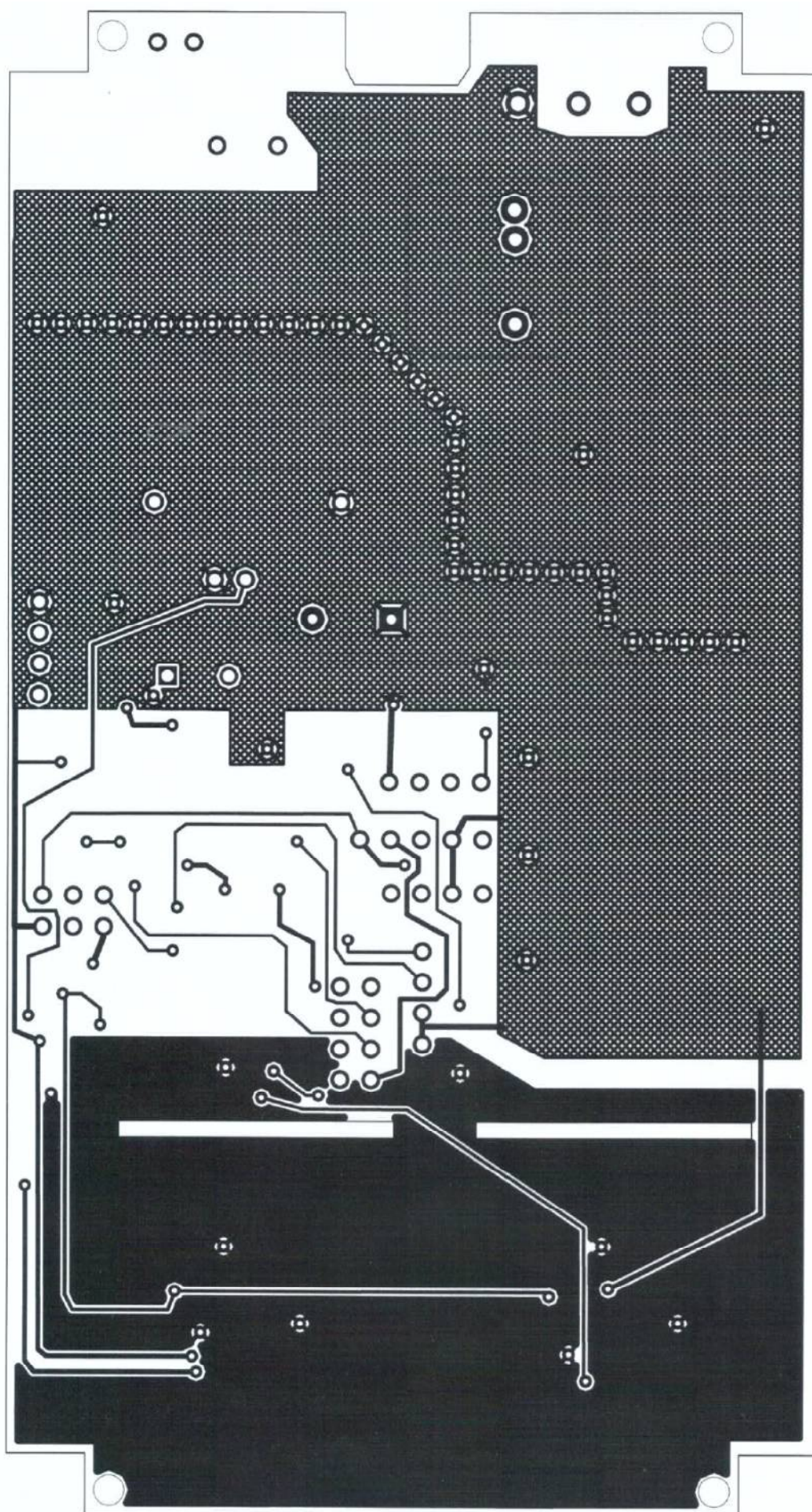


Рисунок В.2 - Топология проводников нижней стороны печатной платы

Приложение Г Сборочный чертеж печатной платы

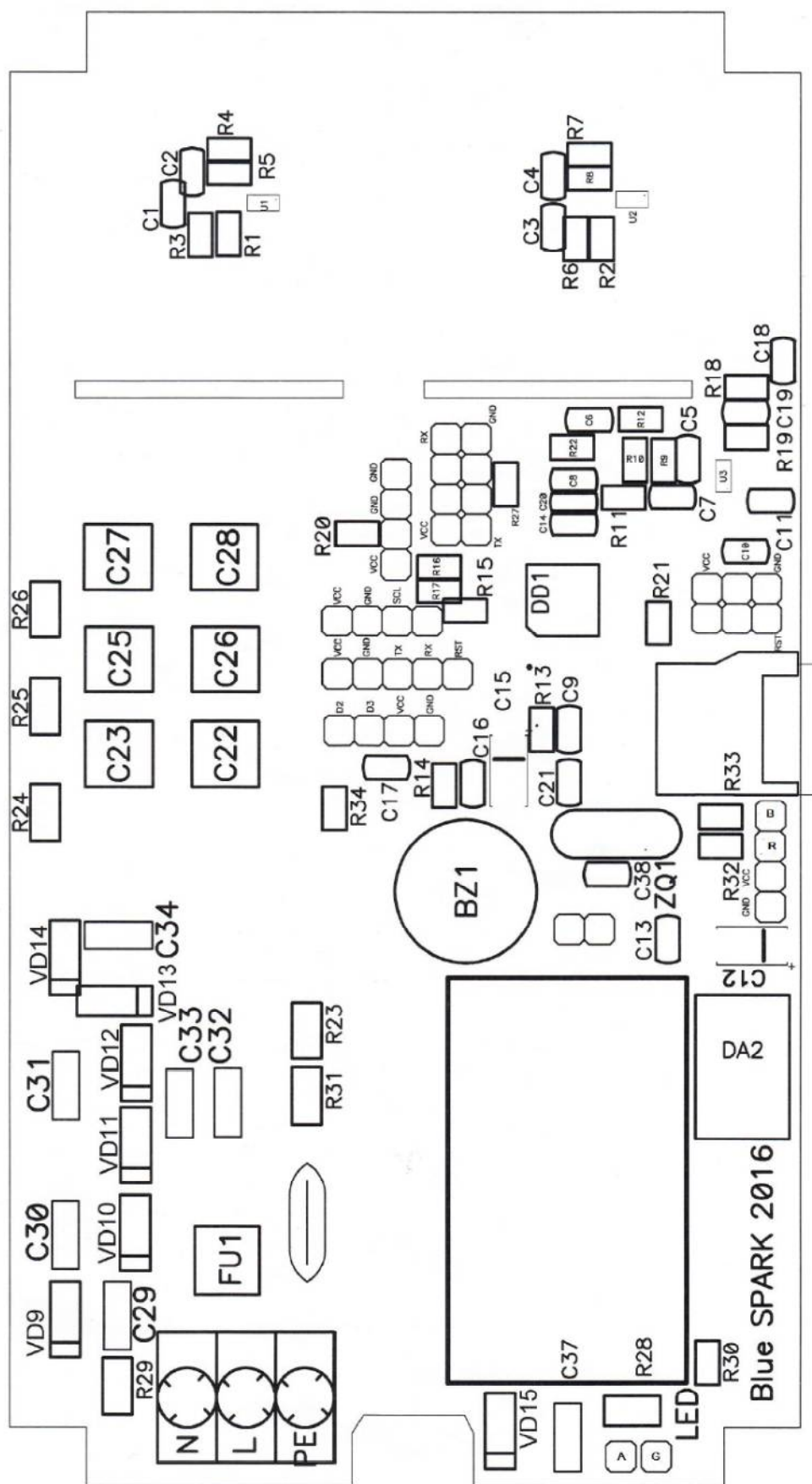


Рисунок Г.1 - Сборочный чертеж печатной платы

Приложение Д

Исходный текст программы прибора

/*

ПО макетного образца устройства ROZET A101/A102 (альфа-радиометр воздуха). Заводская плата, маска, лак. Корпус. Дисплей. Защита от сетевых помех.

Плата "прошита" переходными отверстиями на землю между сетевой частью и всеми остальными

Дополнительно перед камерами выполнены две щели, препятствующие пробую, утечке и распространению механических колебаний
ПО разработано в среде Arduino IDE 1.06 Библиотека Troyka-quad Display модифицирована для большей стабильности работы (сокращено время переключения 0->1).

Импульсы частиц должны быть выше порога детектора, длительность их должна укладываться в диапазон 1.5-3.5мс

Импульсы полагаются одиночными, т.е. до импульса от частицы нет других сигналов минимум 5 мс и после его окончания так же 5 мс

Предварительные результаты калибровки по SIRAD MR-106N: накопленные за час показания делить на 7 для получения Бк/м3.

Время полной начальной установки показаний: 1.5-2 часа. Время установления правдоподобной оценки - 15 минут. Диапазон: 1 Бк/м3 - 9 999 Бк/м3.

Детектор импульсов реализован программно. Детектор работает с частотой 8200 Гц (удвоенная полоса пропускания аналоговой части с запасом, для удовлетворения критерию Найквиста).

Вычисляется оценка СКО методом среднего модуля и подвергается экспоненциальному сглаживанию. Оценка задержана на тау фильтра (~5 мс).

Из сигнала удаляются НЧ ниже 200 Гц. Это устраняет фон сети (если вдруг есть) и НЧ-механику, сейсмику

Фильтрованный сигнал сравнивается с порогом, если он превышен и при этом СКО шума в норме - есть кандидат.

После обнаружения кандидата ждём 3 мс (конца импульса) и снова оцениваем СКО фильтром за время 7 мс. Если шум пришёл в норму, то частица обнаружена.

После чего обнаружение возобновляется.

Вибрационные или звуковые помехи редко регистрируются данным детектором,

а если регистрируются, то дают 1 ложный импульс, не более. Тогда как обычный пороговый алгоритм даст серию импульсов.

В составе вспомогательных датчиков:

- датчик действующего напряжения сети (встроен в схему прибора, его пробой крайне опасен, минимум два резистора 1206!)

Количество импульсов альфа-частиц подсчитывается за интервал времени, усредняется экспоненциально, записывается на SD карту.

В записи 7 параметров:

- текущий счёт альфа частиц (в текущем цикле накопления)

- усредненные фильтром (почасовые) накопленные показания

- сглаженная оценка уровня радона

- напряжение сети

Серийный образец нагревается на 1.5-2 градуса при работе от сети. Это сушит воздух внутри прибора. Электрическое поле тоже сушит воздух.

В результате температура завышена примерно на 2 градуса, а влажность занижена примерно на 10%. Давление измеряется точно.

В связи с этим эффектом измерения температуры и влажности подвергаются экспоненциальной коррекции после старта прибора.

Прибор вначале по SPI прошивается загрузчиком Lillypad 3.3V 8 MHz, затем по USART программируется как этот же штатный вариант Ардуино.

*/

/** ***** Определения индивидуальных отличий каждой модели устройства ***** **/

#define ESP_8266 1 //Если хотим поддержку модуля, то раскомментируем эту строчку

#define ESP_RESET 4 //Hora Reset модуля ESP8266-01 (активный низкий, когда хотим чтобы модуль работал - высокий)

#define ESP_CH_PD 5 //Hora CH_PD модуля ESP8266-01 (активный HIGH, модуль включается и работает)

//GPIO2 идёт на RESET CPU ATMEGA328P-AU

//GPIO0 идёт на перемычку, используется при программировании модуля

//Ноги Tx-Rx модуля соединены "накрест" с ногами Rx-Tx CPU

//Таким образом модуль может сбросить процессор и даже перепрограммировать его

#define AD_SHIFT 511 //Постоянное смещение нулевой линии в данном образце прибора

//10200 кОм - сопротивление двух 5.1МОм, а 33.15кОм - импеданс источника опорного напряжения на частоте сети 50 Гц плюс 33 кОм измерительный R

const float AC_COEFF = 1.01/((33.15/(10200.0+33.15))/(3.3/1023.0)); //Калибровочный коэффициент вольтметра сети (в данном образце прибора R=10.2M)

#define BcM3_COEFF 7.0 //Калибровочный коэффициент, переводящий альфа-события в час в Бк/м3

#define BcM3_MINUTE 60.0/BcM3_COEFF //Калибровочный коэффициент, переводящий альфа-события в минуту в Бк/м3

#define ALARM_POROG 100 //Порог звуковой сигнализации в Бк/м3

/** ***** Подключение библиотек и соответствующие определения ***** **/

#include <Arduino.h> //Стандартная библиотека Ардуино

//Библиотека индикатора

#include <QuadDisplay.h>

#define LPIN 2 //К этой ноге подключен дисплей Module LED Troyka-quad display (на 3-й он промаргивает!)

#define RDisp 2 //При 3.3В 8МГц некоторые дисплеи глючат. Лечится многократным выводом. (Если RDisp=1 - циклы не компилируются, место 110 байт экономится)

```

#define AuxIndicationTime 4000L //Время индикации вспомогательных величин ТВД (влажность, давление и т.д.) в мс.
#define ACTIVE_SND 1 //Если звукоизлучатель активный
//Библиотека i2C
#include <Wire.h>

//Библиотека памяти EEPROM
#include <EEPROM.h>
#define Header_string_length 128 //Длина заголовочной строки EEPROM
#define EEPROM_length 1024 //Длина EEPROM памяти ATMEGA328P
#define TIME_ADDR 1016 //Время наработки прибора в часах (адрес в EEPROM)
#define DOZE_ADDR 1020 //Накопленная прибором доза (адрес в EEPROM)
#define TIME_STR_ADDR 93 //В символьном виде время наработки
#define DOZE_STR_ADDR 109 //В символьном виде накопленная доза

//Библиотека SD-карты
#include <SD.h>
#define chipSelect 10 //Нога управления CS карточки SD

//Определения служебных констант
#define WAIT_PC 10 //Сколько секунд ждать компьютер при подключении USB или старте
#define Power_pin A1 //Сетевое напряжение приходит на этот канал АЦП
#define SOUND 9 //Ножка излучателя звука
#define Acc_interval 59 //60 минут колим счётчик радона
#define Pulse_pin A0 //С этого канала АЦП наблюдаем импульсы альфа-частиц
#define N_AC 4192 //Сколько отсчётов АЦП усреднять при измерении напряжения сети (целое число периодов 50 Гц)
#define led_R_Pin 6 //Красный диод в цветном
#define led_B_Pin 7 //Синий диод в цветном
#define UnNormal220 190 //Ниже этого напряжения сети 220В считаем нерабочим
#define ALARM 2400 //Частота писка при превышении порога радона
#define PressureCoeff 0.00750062 //Коэффициент перевода Паскалей в мм. рт. ст.
float Power = 0; //Переменная для измерения сетевого напряжения
const long Duration = 59000; //Период измерения в мс (должна быть минута, но секунда тратится на датчики, АС и SD и успокоение)
int result=0; //Переменная для хранения результата АЦП
unsigned int score = 0; //Первичный счётчик частиц (заменент с int на Unsigned int)
float Mean_result=0.0; //Переменная хранения накопленного и сглаженного счёта частиц
unsigned long currentMillis = 0; //Текущее системное время в мс
unsigned long previousMillis = 0; //Системное время на предыдущем цикле обнаружения
byte Radon_Minutes = 0; //Счетчик интервалов (обычно, минут)
boolean Dump=false; //Выводить/не выводить содержимое SD-карты
boolean FIRST_CYCLE=true; //Вначале первый цикл измерения альфа-активности (надо дать начальное значение усреднителю)

//Переменные модели вычисления текущего уровня радона
const float TimeFltCoeff = 0.1; //Фильтруем с постоянной порядка 10 событий
float Express_result = 15; //Экспресс-оценка уровня радона, начинаем с 15 Бк по умолчанию

//Переменные и определения для работы с кнопкой (кнопка сенсорная, заряд человека переводит ногу порта в 1-цу, либо механическая, либо QTouch)
#define PressButton_Pin 3 //Ножка CPU, связанная с сенсорной кнопкой
boolean SOUND_ON = true; //Изначально звук включен
boolean BUTTON_FLAG = false; //Реагировать ли на кнопку? До получения первых показаний - нет.
boolean DISPLAY_ON = true; //Показывать ли данные на дисплее
byte CNTRL_STATE = 0; //Счётчик состояний кнопки управления
byte LED = led_B_Pin; //Каким светодиодом будем работать по умолчанию (красным или синим)

//Переменные детектора
#define CORR_POROG (2*35) //Порог срабатывания детектора альфа-частиц (вероятность ПО 0.99 ЛТ 1Е-6 (это примерно 200 мВ)
#define SIG_POROG (10) //Порог шума, если он превышен не считаем импульсы
static int Sigma = 0; //СКО шума
#define Nb 1 //Константы измерителя СКО шума. Коэффициент сглаживания. Чем меньше, тем больше гладит
#define kb 8 //Компенсатор ограниченной разрядности Коэффициент сглаживания Nb/2^kb

//***** Исполняемый модуль начальных установок *****

void setup()
{
    Serial.begin(115200); //Активируем последовательный порт

    Wire.begin(); //Активируем шину I2C
#ifdef ACTIVE_SND
    tone(SOUND,1000,1000); //Издать звук при включении
#else
    tone(SOUND,1000,1000);
#endif
    displayClear(LPIN); //Очищаем дисплей

    pinMode(led_R_Pin, OUTPUT); //Ноги цветного светодиода настроить
    pinMode(led_B_Pin, OUTPUT);

```

```

digitalWrite(led_R_Pin, HIGH);          //Красный и синий выключены
digitalWrite(led_B_Pin, HIGH);

for (byte address=0; address<Header_string_length; address++) { //Выдать в COM информацию о приборе, прописанную в EEPROM
    char EEPROMvalue=EEPROM.read(address);
    Serial.print((char)EEPROMvalue);
}
Serial.println();                      //перевод строки

Serial.read();                          //Зачистить буфер приёма USART, вычитав его

sqr220();                              //Проверить, есть ли напряжение сети и "земля" и нормальное ли оно
if (Power<UnNormal220) LED=led_R_Pin;   //Если ненормальное напряжение или нет земли - все мигания красным
for (byte i=0; i<WAIT_PC; i++) {        //Сколько ждать компьютера (в это время идёт установление HV)
    if (LED!=led_R_Pin) displayDigits(LPIN, QD_G, QD_o, QD_O, QD_n); //Надпись "GoOn" - стартуем и ждём установления высокого
напряжения
    else displayDigits(LPIN, QD_G, QD_r, QD_n, QD_d); //Надпись "GRND" - значит нет земли или нормальной сети. Умножитель не работает.
Частиц не будет.
    digitalWrite(LED, 1-digitalRead(LED)); //Параллельно мигаем назначенным диодом
    delay(1000);                          //Надпись горит
    displayClear(LPIN);                   //Очищаем дисплей
    delay(100);                          //Подержали пустым (мигнули)
    if (Serial.available()) {             //Есть ли данные в последовательном порту?
        if (Serial.read()=='D') {        //Если есть, то не пришла ли команда D(ump)?
            Dump=true;                   //Да пришла
            break;                       //Выскочить из всех циклов
        }
    }
}
pinMode(chipSelect, OUTPUT); //Нора 10 - CS SD-карты, настроить на вывод обязательно!
if (!SD.begin(chipSelect)) { //Есть ли работоспособная карта в приборе? Если нет, не производим инициализацию
    displayDigits(LPIN, QD_C, QD_A, QD_r, QD_d); //Написали CArд (нет карты)
}
else {
    if (SD.exists("datalog.txt")) {      //Есть ли уже файл с данными на карте?
        File myFile = SD.open("datalog.txt"); //Если да, откроем его для чтения
        if (myFile && Dump==true) {      //Заказана ли печать файла?
            while (myFile.available()) { //Если да, то весь файл выводим на печать
                Serial.write(myFile.read()); //Вывод в последовательный порт из файла
            }
            Serial.println("---");        //После вывода файла выдали промпт
            myFile.close();              //Закрыли файл
            SD.remove("datalog.txt");    //И удалили его напрочь
        }
    }
    File myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE); //Открыли файл на запись, если его нет, то он создаётся
    for (byte address=0; address<Header_string_length; address++) { //Выдать в файл информацию о приборе, прописанную в EEPROM
        myFile.print((char)EEPROM.read(address)); //Байт за байтом
    }
    myFile.println();                    //Выдать "перевод строки"
    myFile.close();                     //Закреть файл

    displayDigits(LPIN, QD_MINUS, QD_MINUS, QD_MINUS, QD_MINUS); //Надпись "----"
}

#ifdef ESP_8266
pinMode(ESP_CH_PD, OUTPUT);            //Настраиваем ноги управления модулем WiFi
digitalWrite(ESP_CH_PD, HIGH);          //Выводим его из спячки
pinMode(ESP_RESET, OUTPUT);            //Активируем Wi-Fi модуль ESP8266
digitalWrite(ESP_RESET, LOW);           //Учинив модулю сброс при включении
delay(100);
digitalWrite(ESP_RESET, HIGH);          //И отпустить Reset обратно в высокое состояние
#endif

//Настраиваем АЦП (нам нужен сравнительно быстрый АЦП не менее 9 кГц при 8 МГц тактовой частоты CPU)
ADCSRA &= ~(bit (ADPS0) | bit (ADPS1) | bit (ADPS2)); //Очищаем биты прескалера АЦП
ADCSRA |= bit (ADPS0) | bit (ADPS2); //32 - это 250 кГц при 8 МГц тактовой
delay(500); //Задержка для успокоения напряжений после работы SD и UART
//attachInterrupt(1, PressButton, CHANGE); //Привязываем 1-е прерывание (порт D3) к функции PressButton(). Самоделка.
//attachInterrupt(1, PressButton, FALLING); //Привязываем 1-е прерывание (порт D3) к функции PressButton(). Большая кнопка
attachInterrupt(1, PressButton, RISING); //Привязываем 1-е прерывание (порт D3) к функции PressButton(). Малая красная кнопка.
result = analogRead(Pulse_pin); //Настраиваем мультиметр на альфа-канал и читаем. Второе чтение АЦП уже будет валидно
previousMillis=millis(); //Запомним текущее системное время
}

//***** Основной бесконечный цикл измерений, обнаружения альфа-событий и подсчётов *****

```

```

void loop()
{
    DETECTING(10); //Считать частицы (10) миллисекунд (шаг счётчика времени)
    unsigned int tmp_score=score; //Сохраняем счётчик частиц
    currentMillis = millis(); //Считываем текущее системное время
    if((currentMillis-previousMillis) >= Duration) { //Считаем и показываем результаты измерений каждую минуту, минута прошла
        Radon_Minutes++; //Сколько минут мы уже копим альфа-события
        if(Radon_Minutes>Acc_interval) { //Прошёл ли заданный интервал накопления в минутах? Типа, час.
            FIRST_CYCLE=false; //Если первый интервал накопления прошёл (например, час) то все остальные уже не первые
            EEPROM_float_write(TIME_ADDR,1+EEPROM_float_read(TIME_ADDR)); //Инкрементировать счётчик наработки прибора
            EEPROM_float_write(DOZE_ADDR,score+EEPROM_float_read(DOZE_ADDR)); //Инкрементировать счётчик накопленной дозы прибора
            EEPROM_float_2string_write(TIME_ADDR, TIME_STR_ADDR); //Записать время наработки в заголовочную строку EEPROM
            EEPROM_float_2string_write(DOZE_ADDR, DOZE_STR_ADDR); //Записать накопленную дозу в заголовочную строку EEPROM
            Mean_result=score/BcM3_COEFF; //Реализуем среднечасовую оценку альфа-фона
            score=Radon_Minutes*0; //Сбрасываем счётчики минут и частиц в интервале накопления
        } //Если час не первый, то даём комбинированную оценку
        if (FIRST_CYCLE) { //Собственно экспресс-оценка
            Mean_result=score/BcM3_COEFF; //Если это первый цикл накопления, то среднее значение = текущему
            if (Radon_Minutes==1 && score>5) Express_result=60*Mean_result; //Если уровень высок (>50 Бк/м3) то сразу дать оценку, за первую минуту
            else Express_result+=TimeFltCoeff*(BcM3_MINUTE*score/Radon_Minutes-Express_result); //Уровень невысок, оценку набираем постепенно
        }
        else { //Если не первый час, то считаем с учётом результатов предыдущего часа
            Express_result+=TimeFltCoeff*((BcM3_MINUTE*(score+BcM3_COEFF*Mean_result))/(Radon_Minutes+Acc_interval)-Express_result);
        }
        BUTTON_FLAG=false; //Запретим реагировать на кнопку пока идут доп. измерения и индикация

        ***** Производим все измерения с датчиков *****

        if( Express_result>ALARM_POROG) { //Если превышен порог безопасности, то
            LED=led_R_Pin; //Диод теперь мигает с зеленого на красный
            digitalWrite(led_B_Pin, HIGH); //Но надо не забыть отключить синий
            if(SOUND_ON) tone(SOUND,ALARM,1000); //Противный звук, раздающийся при превышении порога
        }
        else {
            LED=led_B_Pin; //Диод мигает с зеленого на синий, если уровень неопасный
            digitalWrite(led_R_Pin, HIGH); //Но надо не забыть отключить красный, иначе он передавит все остальные
            noTone(SOUND); //И выключили звук
        }

        //Измерение истинного среднеквадратичного напряжения сети, результат в переменной Power
        sqr220();

        ***** Запись результатов измерений на SD-карту *****

        String dataString = ""; //Строковая переменная куда сложим все результаты измерений
        dataString += String((float)tmp_score); //Накопленное количество событий за текущий интервал
        dataString += "\t";
        dataString += String(Mean_result); //Сглаженный уровень радона, меняется раз в час
        dataString += "\t";
        dataString += String(Express_result); //Экспресс-оценка уровня радона, меняется каждую минуту
        dataString += "\t";
        dataString += String(Power); //Действующее значение сетевого напряжения в Вольтах

        //Фактическая запись строки данных с измерениями на SD-карту (в файл datalog.txt) и в последовательный порт
        File myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
        if(myFile) { //Если файл доступен, то пишем в него очередную строку данных
            myFile.println(dataString); //Пишем в файл строку с измерениями
            myFile.close(); //Закрываем файл
        }
        Serial.println(dataString); //Выводим в последовательный порт те же результаты для контроля и IoT
        //Снова настраиваем АЦП на детектирование частиц
        ADCSRA &= ~(bit(ADPS0) | bit(ADPS1) | bit(ADPS2)); //clear prescaler bits
        ADCSRA |= bit(ADPS0) | bit(ADPS2); //32 - это 250 кГц при 8 МГц тактовой
        result = analogRead(Pulse_pin); //Возвращаем настройки АЦП на канал альфа-событий
        //Подтягивание следящих порогов к реальности после индикации (ибо была лагуна в измерениях!)
        for (byte i=0; i<200; i++) DETECTOR(); //Не пользуемся функцией DETECTING(), ибо не ловим здесь частицы!
        previousMillis = currentMillis = millis(); //Перенастраиваем счётчик времени накопления

        ***** Выведем результаты измерений на дисплей *****
        if(DISPLAY_ON) {
            displayPower(LPIN,int(Power*0.5), true); //Выдать напряжение сети
            BLINK();
            displayInt(LPIN, int(Express_result*0.5), false); //Выдать округленное значение экспресс-оценки среднего уровня радона
            delay(10);
        }
        BUTTON_FLAG=true; //Разрешим реагировать на кнопку
    }
}

```

```

}

//***** Подпрограммы *****
//Задержка с детектированием, вызывается при выводе на дисплей очередного параметра
void BLINK() {
    delay(10); //Дать аналогу успокоиться после очередной смены изображения на дисплее
    DETECTING(AuxIndicationTime); //Считать частицы 3 секунды, пока идёт индикация
}
//Детектирование и обработка альфа-событий заданное время
//Детектирование альфа-событий заданное время
void DETECTING(unsigned int mil) { //Прокрутить детектор частиц заданное число раз (т.е. миллисекунд)
    for (unsigned int j=0; j<mil*8; j++) { //В result уже лежит первый отсчёт импульса!!!!
        if(DETECTOR()) { //Если скачок напряжения на АЦП больше порога, то это частица
            delayMicroseconds(3000); //Ждём 3 мс, когда импульс частицы закончится
            for (byte i=56; i>0; i--) DETECTOR(); //Ничего не регистрировать 7 мс после импульса, но следить за дисперсией
            if (Sigma<1*SIG_POROG) { //Если после регистрации частицы сигнал успокоился, то зачёт частицы
                score++; //Увеличить счётчик частиц
                digitalWrite(LED, 1-digitalRead(LED)); //Переключили цвет, т.е. запомнили факт альфа-события
                if (SOUND_ON) tone(SOUND,1000,10); //Издать щелчок, если звук разрешен
            }
        }
    }
}
//Экспоненциальный фильтр
int ifilter(int x) {
    static int y = 0;
    static long z = 0;
    z+=(x-y);
    return (y = (Nb * z) >> kb);
}
//Экспоненциальный фильтр 1
int ifilter1(int x) {
    static int y = 0;
    static long z = 0;
    z+=(x-y);
    return (y = (32 * z) >> kb);
}
//Детектор альфа-событий
boolean DETECTOR () {
    int x = ((ADCL|ADCH << 8)-512); //Постоянная оцифровка и детектирование сигнала
    x = abs(x-ifilter1(x)); //Отрезаем НЧ (ниже 100 Гц) и берём модуль
    bitWrite(ADCSRA, ADSC, 1); //Запускаем следующее преобразование установкой бита 6 (=ADSC) в ADCSRA
    Sigma=ifilter(x); //Вычисляем дисперсию сигнала с шумом
    delayMicroseconds(100); //Задержка до конца преобразования АЦП
    return (CORR_POROG<x && Sigma<SIG_POROG); //Возвращаем факт превышения абсолютного порога
}
//Обработка прерывания от сенсорной кнопки
void PressButton() { //Обработка прерывания от сенсорной кнопки (1-нажата, 0 - не нажата). Кнопка AT42QT1012.
    if(BUTTON_FLAG) { //Если разрешена реакция на кнопку то выделить единичный импульс от 100 до 500 мс
        tone(SOUND,800,100); //Издать короткий писк
        switch (CNTRL_STATE) {
            case 0:
                for (byte i=0; i<RDisp; i++) {
                    displayDigits(LPIN, QD_S, QD_n, QD_d, QD_MINUS); //Sound off
                }
                SOUND_ON=false;
                break;
            case 1:
                for (byte i=0; i<RDisp; i++) {
                    displayDigits(LPIN, QD_d, QD_I, QD_S, QD_MINUS); //Дисплей off
                }
                DISPLAY_ON=false;
                break;
            case 2:
                for (byte i=0; i<RDisp; i++) {
                    displayDigits(LPIN, QD_S, QD_n, QD_d, QD_NONE); //Sound on
                }
                SOUND_ON=true;
                break;
            case 3:
                for (byte i=0; i<RDisp; i++) {
                    displayDigits(LPIN, QD_d, QD_I, QD_S, QD_NONE); //Display on
                }
                DISPLAY_ON=true;
                break;
        }
        CNTRL_STATE++;
        if(CNTRL_STATE>3) CNTRL_STATE=0; //Меняем счётчик состояний контрольной кнопки
    }
}

```

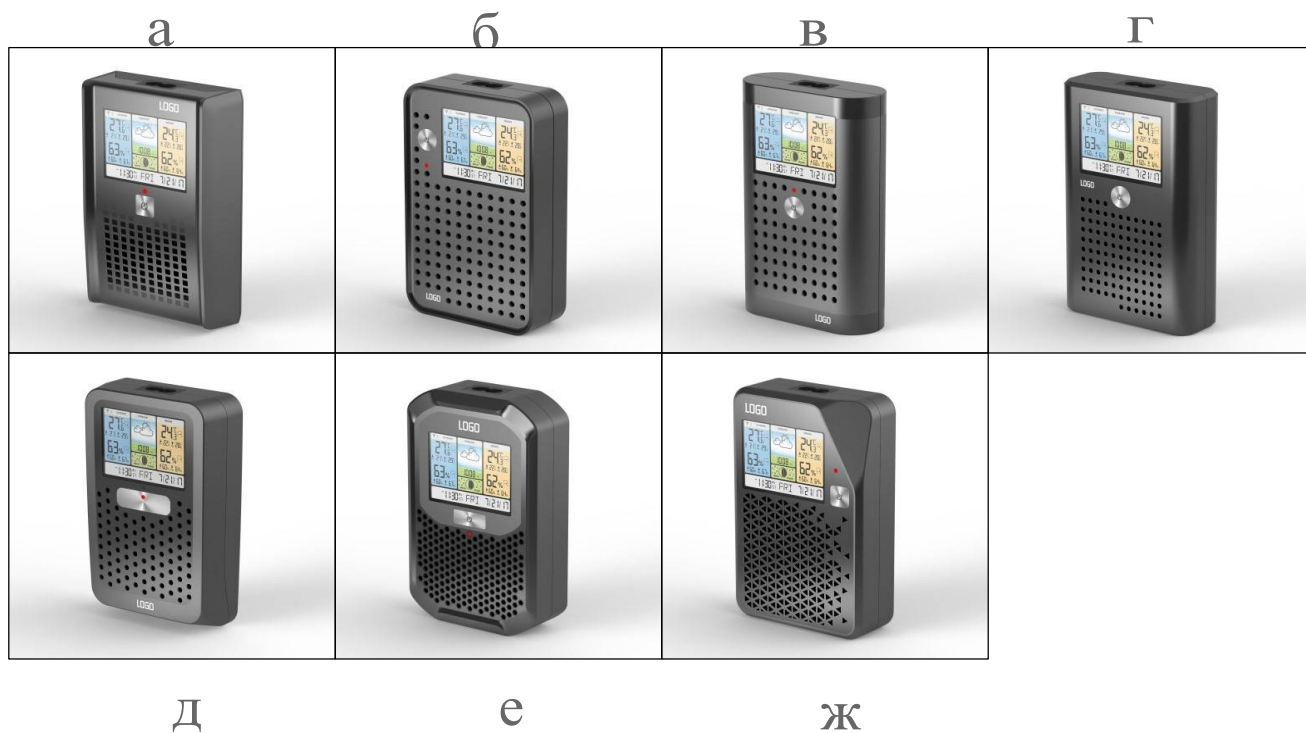
```

EIMSK &= ~(1<<INT1); //Запретить прерывания 1 во избежание повторного входа
delay(1000); //Посветить надписью "Sound on/off"
if (DISPLAY_ON){ //Если дисплей разрешен, то
    for (byte i=0; i<RDisp; i++) { //Несколько раз подряд, во избежание подглючивания дисплея
        displayInt(LPIN, int(Express_result+0.5), false); //Выдать округленное значение экспресс-оценки среднего уровня радона
    }
}
else {
    for (byte i=0; i<RDisp; i++) { //Несколько раз подряд, во избежание подглючивания дисплея
        displayClear(LPIN); //Если вывод на дисплей запрещен, рисуем пустоту
    }
}
delay(100); //Подождать успокоения аналоговой части после манипуляций с дисплеем
EIFR &= ~(1<<INTF1); //Очистить флаг прерывания даже если было повторное
EIMSK |= (1<<INT1); //Разрешить снова прерывания INT1
}
}
//чтение float из EEPROM
float EEPROM_float_read(int addr) {
    byte raw[4];
    for(byte i = 0; i < 4; i++) raw[i] = EEPROM.read(addr+i);
    float &num = (float&)raw;
    return num;
}
//запись float в EEPROM
void EEPROM_float_write(int addr, float num) {
    byte raw[4];
    (float&)raw = num;
    for(byte i = 0; i < 4; i++) EEPROM.write(addr+i, raw[i]);
}
//Запись плавающего числа в виде ASCII в EEPROM
void EEPROM_float_2string_write(int addr, int addr2) {
    String STR=String(EEPROM_float_read(addr));
    for(byte i = 0; i < 8; i++) EEPROM.write(addr2+i,STR[i]);
}
//Измерение сетевого напряжения 220В
void sqr220() {
    float Power1=0;
    float TMP=analogRead(Power_pin)-AD_SHIFT;
    for (int i=0; i<100; i++) TMP+=0.25*(analogRead(Power_pin)-AD_SHIFT-TMP); //Стабилизируем фильтр
    for (int i=1; i<N_AC; i++) { //Делаем тысячи измерений
        TMP+=0.25*(analogRead(Power_pin)-AD_SHIFT-TMP); //Напряжение в сети минус средний уровень АЦП с фильтрацией
        Power1+=TMP*TMP; //Суммируем квадраты напряжений
    }
    if (Radon_Minutes<=1 && FIRST_CYCLE)Power=AC_COEFF*sqrt(Power1/N_AC); //В первом цикле без фильтра вычисляем напряжение
    //сети
    else Power=0.9*Power+0.1*AC_COEFF*sqrt(Power1/N_AC); //Дальше уже фильтруем экспоненциально
}
//This function will write a 2 byte integer to the eeprom at the specified address and address + 1
void EEPROMWriteInt(int p_address, int p_value)
{
    byte lowByte = ((p_value >> 0) & 0xFF);
    byte highByte = ((p_value >> 8) & 0xFF);
    EEPROM.write(p_address, lowByte);
    EEPROM.write(p_address + 1, highByte);
}
//This function will read a 2 byte integer from the eeprom at the specified address and address + 1
unsigned int EEPROMReadInt(int p_address)
{
    byte lowByte = EEPROM.read(p_address);
    byte highByte = EEPROM.read(p_address + 1);
    return ((lowByte << 0) & 0xFF) + ((highByte << 8) & 0xFF00);
}

```

Приложение Е

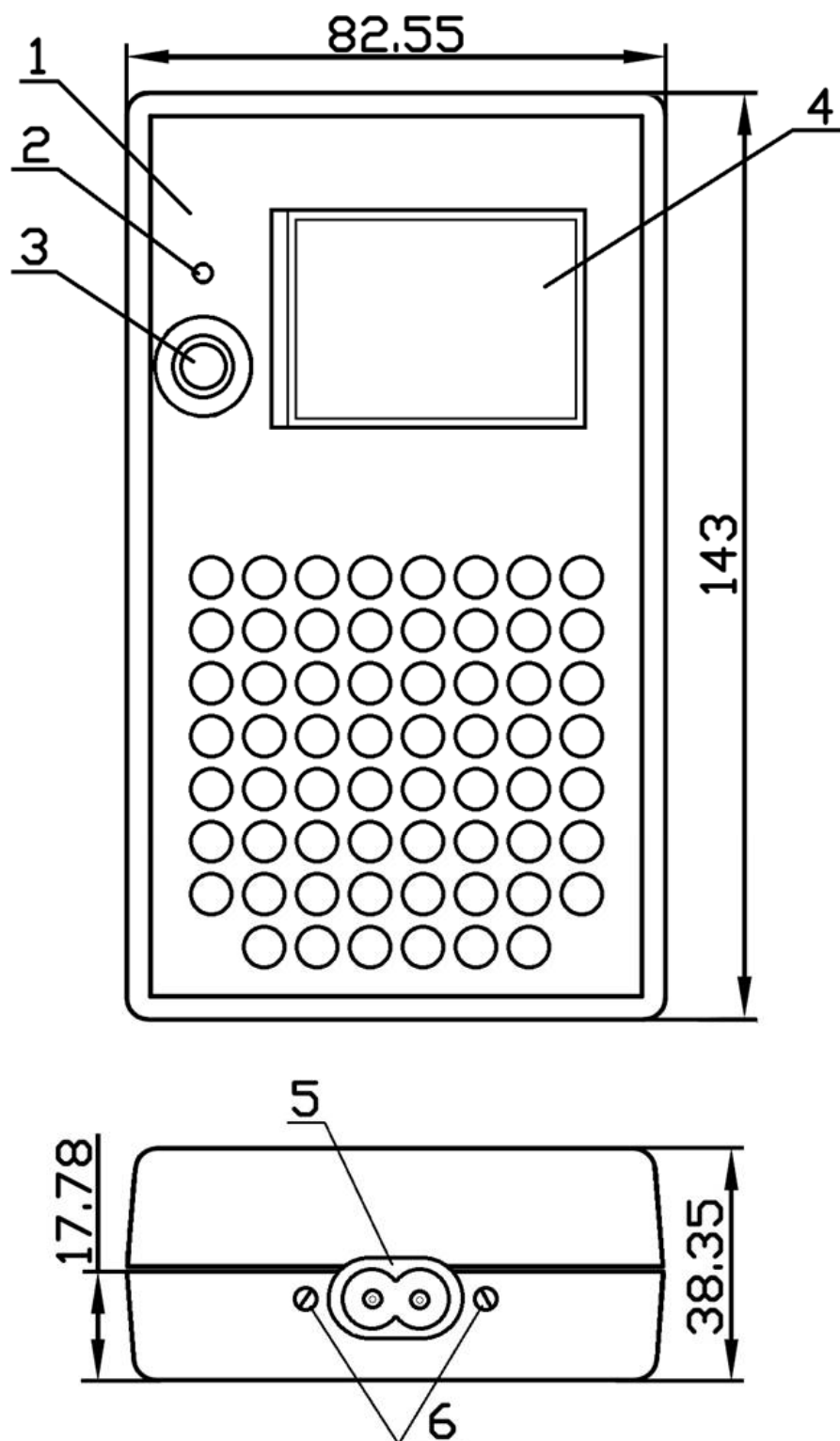
Дизайн-концепции корпуса прибора



Приложение Ж

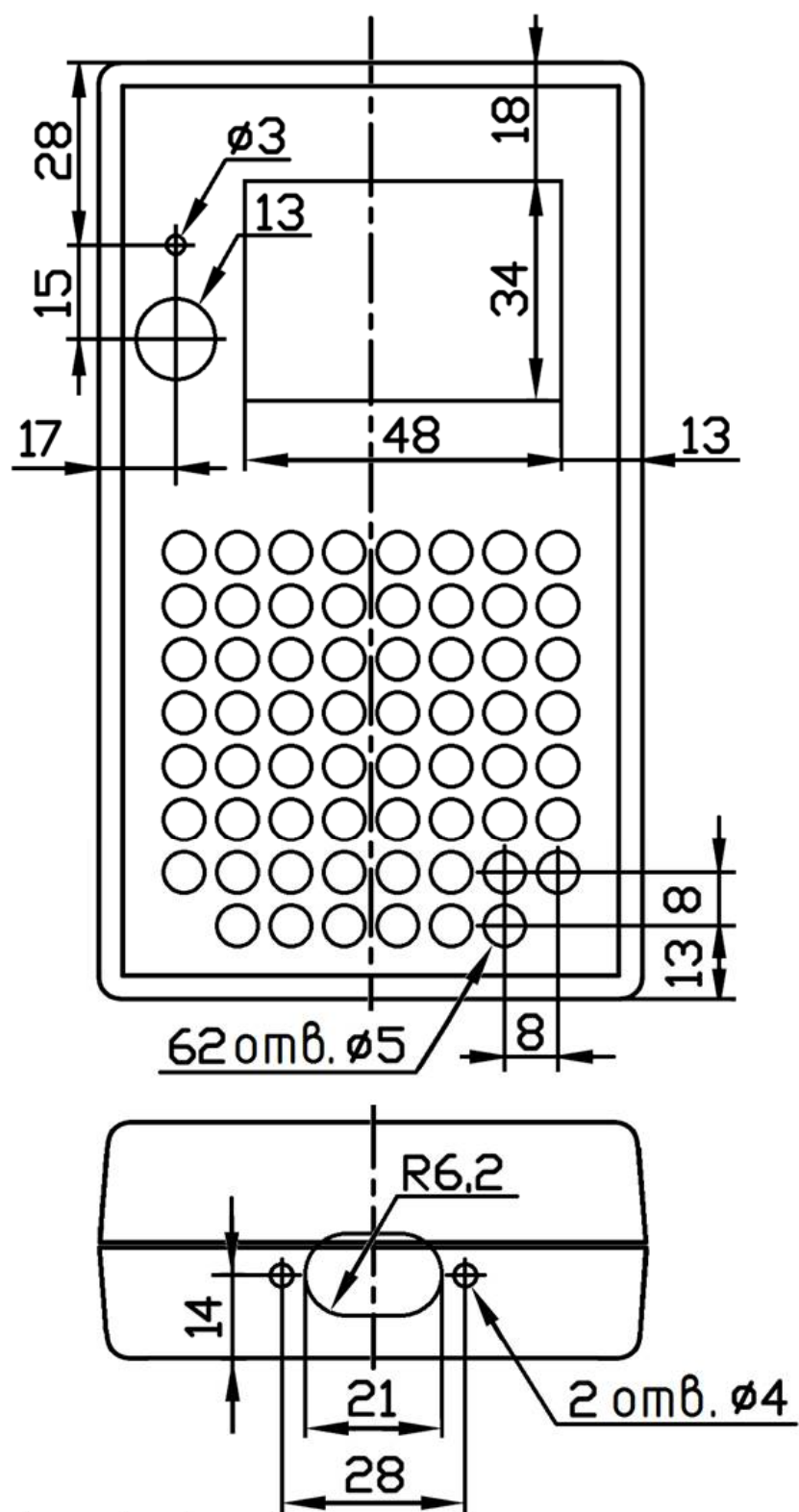
Чертежи макета корпуса

[illegible]

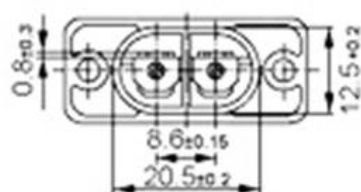
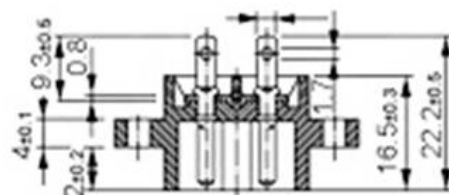
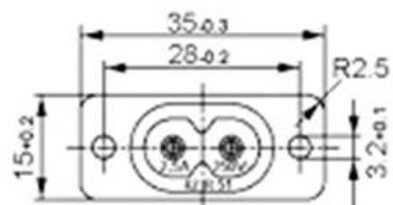


| | | | | | | | |
|-----------|------|---------|---------|------|--------|------|--------|
| | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум | Подпись | Дата | | | |
| Разраб | | | | | | | |
| Пров | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | |
| Утв | | | | | | | |
| | | | | | Литера | Лист | Листов |
| | | | | | у | | |
| | | | | | | | |

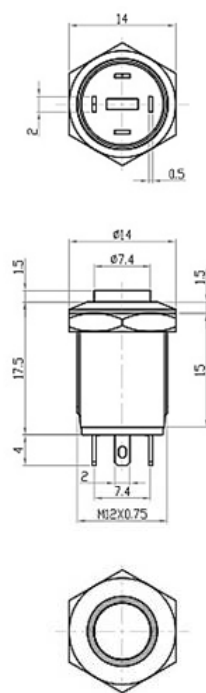
Макет детектора радона



| | | | | | | | |
|-----------|------|---------|---------|------|----------------------|------|--------|
| Изм. | Лист | № докум | Подпись | Дата | Корпус Gainta G1204G | | |
| Разраб | | | | | | | |
| Пров | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | |
| Утв | | | | | | | |
| | | | | | Литера | Лист | Листов |
| | | | | | у | | |



| | | | | | | | |
|-----------|------|---------|---------|------|---------------|------|--------|
| | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум | Подпись | Дата | | | |
| Разраб | | | | | Разъем ИЕС СВ | | |
| Пров | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | |
| Утв | | | | | | | |
| | | | | | Литера | Лист | Листов |
| | | | | | у | | |
| | | | | | | | |



| | | | | | | | |
|-----------|------|---------|---------|------|--|--------|--------|
| | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум | Подпись | Дата | | | |
| Разраб | | | | | Кнопка с посадочным диаметром 12 мм | Литера | Лист |
| Пров | | | | | | у | Листов |
| | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | |
| Уте | | | | | | | |

Приложение И

Доработанная схема электрическая принципиальная

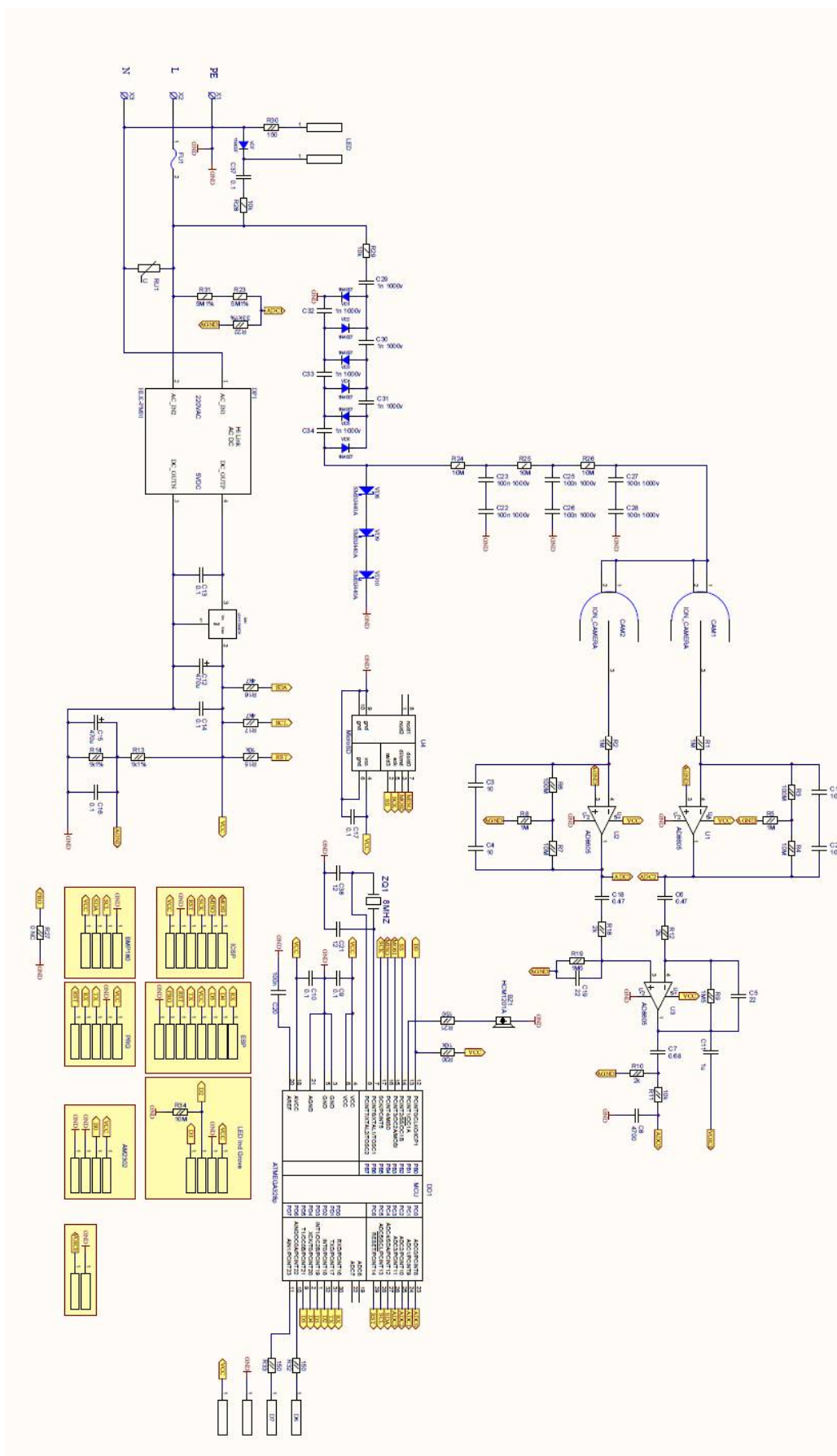


Рисунок И.1 - Схема электрическая принципиальная детектора радона

Приложение К

Доработанный перечень компонентов и материалов электронной части

Таблица К.1.

Перечень компонентов и материалов электронной части всего устройства

| Номер | Обозначение по схеме | Расшифровка | Наименование, номинал | Корпус | Количество | Цена, руб | Стоимость, руб |
|-------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|----------------|------------|-----------|----------------|
| 1 | VD1 - VD7 | Диод SMD 1000V 1A | 1N4007 | 1N5819 | 7 | 1 | 7 |
| 2 | VD8 - VD10 | Стабилитрон SMD 440V 1A | PKE440CA | DO-214AA | 3 | 3 | 9 |
| 3 | U1, U2, U3 | Операционный усилитель | AD8605 | SOT23-5 | 3 | 50 | 150 |
| 4 | DD1 | Микропроцессор | ATMEGA48_20AI | TQFP32 | 1 | 80 | 80 |
| 5 | RU1 | Варистор выводной 250/390В 17 кДж | B72520 | | 1 | 5 | 5 |
| 6 | C9, C10, C13, C14, C16, C17 | Конденсатор SMD | CC0805 0.1 мкФ 5% | O805 | 6 | 1 | 6 |
| 7 | C7 | Конденсатор SMD | CC0805 0.68 мкФ 5% | O805 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | C11 | Конденсатор SMD | CC0805 1 мкФ 10% | O805 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | C1, C2, C3, C4 | Конденсатор SMD | CC0805 10 пФ 5% | O805 | 4 | 1 | 4 |
| 10 | C21, C38 | Конденсатор SMD | CC0805 12 пФ 5% | O805 | 2 | 1 | 2 |
| 11 | C5, C19 | Конденсатор SMD | CC0805 22 пФ 5% | O805 | 2 | 1 | 2 |
| 12 | C20 | Конденсатор SMD | CC0805 100нФ 5% | O805 | 1 | 1 | 1 |
| 13 | C8 | Конденсатор SMD | CC0805 4700 пФ 5% | O805 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | C37 | Конденсатор SMD | CC0805 0.1 мкФ x 250В 10% | O1206 | 1 | 4 | 4 |
| 15 | C29 - C34 | Конденсатор SMD | CC0805 1 нФ x 1000В 10% | O1812 | 6 | 10 | 60 |
| 16 | C22, C23, C25 – C28 | Конденсатор SMD | CC0805 0.1 мкФ x 1000В 10% | O2220 | 6 | 25 | 150 |
| 17 | FU1 | Предохранитель плавкий | 1A 250В | ? | 1 | 5 | 5 |
| 18 | HB_SD | Держатель SD-карты | Micro SD socket | | 1 | 40 | 40 |
| 19 | BZ1 | Звукоизлучатель | HCM1206A | | 1 | 30 | 30 |
| 20 | U5, U6 | Ионизационная камера | Сетка-фильтр 3/4 дюйма, обр. | | 2 | 18 | 36 |
| 21 | DA1 | Стабилизатор напряжения 3.3 В | LM1117DT-3.3/NOPB | TO-252 / D-PAK | 1 | 120 | 120 |
| 22 | X11 - X47 | Контакты игольчатые | PLS-PIN | PLS-PIN | 37 | 1 | 37 |
| 23 | ZQ1 | Кварцевый резонатор 8 МГц | QUARTZ 8 MHz | "лодочка" | 1 | 7 | 7 |
| 24 | C12, C15 | Конденсаторы полимерные эл. 470 мкФ | 470 мкФ 4В 20% | POLYMER-C | 2 | 33 | 66 |
| 25 | R27 | Перемычка 0R (не устанавливается) | 0R (NC в базовой версии) | R0805 | 1 | 1 | 1 |
| 26 | R13, R14 | Резистор SMD | 1 K 1% | R0805 | 2 | 1 | 2 |
| 27 | R1, R2, R5, R8 | Резистор SMD | 1 M 1% | R0805 | 4 | 1 | 4 |
| 28 | R9, R19 | Резистор SMD | 1M5 1% | R0805 | 2 | 1 | 2 |
| 29 | R10, R12, R18 | Резистор SMD | 2 K 1% | R0805 | 3 | 1 | 3 |
| 30 | R16, R17 | Резистор SMD | 4K7 1% | R0805 | 2 | 1 | 2 |
| 31 | R11, R15, R20 | Резистор SMD | 10 K 1% | R0805 | 3 | 1 | 3 |
| 32 | R4, R7, R34 | Резистор SMD | 10 M 1% | R0805 | 3 | 1 | 3 |
| 33 | R22 | Резистор SMD | 33 K 1% | R0805 | 1 | 1 | 1 |
| 34 | R3, R6 | Резистор SMD | 100 M 1% (допустимо 5%) | R0805 | 2 | 10 | 20 |

Продолжение таблицы К.1.

| Номер | Обозначение по схеме | Расшифровка | Наименование, номинал | Корпус | Количество | Цена, руб | Стоимость, руб |
|-------|----------------------|--|-----------------------|--------|------------|-----------|----------------|
| 35 | R21, R30, R32, R33 | Резистор SMD | 150 Ом 5% | R0805 | 4 | 1 | 4 |
| 36 | R23, R31 | Резистор SMD | 5M1 250 В | R1206 | 2 | 2 | 4 |
| 37 | R28, R29 | Резистор SMD | 10K 250 В | R1206 | 2 | 2 | 4 |
| 38 | R24 - R26 | Резистор SMD | 10M 250 В | R1206 | 3 | 2 | 6 |
| 39 | SH1 | Шнур сетевой 2 проводной с колодкой | | | 1 | 20 | 20 |
| 40 | KL1 | Клемма 3 контактная на плату | | | 1 | 10 | 10 |
| 41 | LED1 | Светодиод RGB 5 мм | | | 1 | 5 | 5 |
| 42 | IND1 | Индикатор ST7735 1.8" SPI | | | 1 | 150 | 150 |
| 43 | SD1 | SD-карта 2 Гбайт (опционально) | | | 1 | 100 | 100 |
| 44 | | Плата печатная заказная | | | 1 | 250 | 250 |
| 49 | | Корпус Gainta G1204G | | | 1 | 190 | 190 |
| 50 | KN1 | Кнопка антивандальная | GQ25-22E | 12 мм | 1 | 20 | 20 |
| | | | | | | ИТОГО: | 1628 |
| | | | | | | | |
| 51 | | Датчик давления, влажности и температуры (опционально) | BME280 | | 1 | 120 | 120 |
| 52 | | WiFi-модуль (опционально) | ESP8266-01 | | 1 | 110 | 110 |
| | | | | | | ИТОГО: | 1858 |

Приложение Л Доработанный чертеж топологический печатной платы

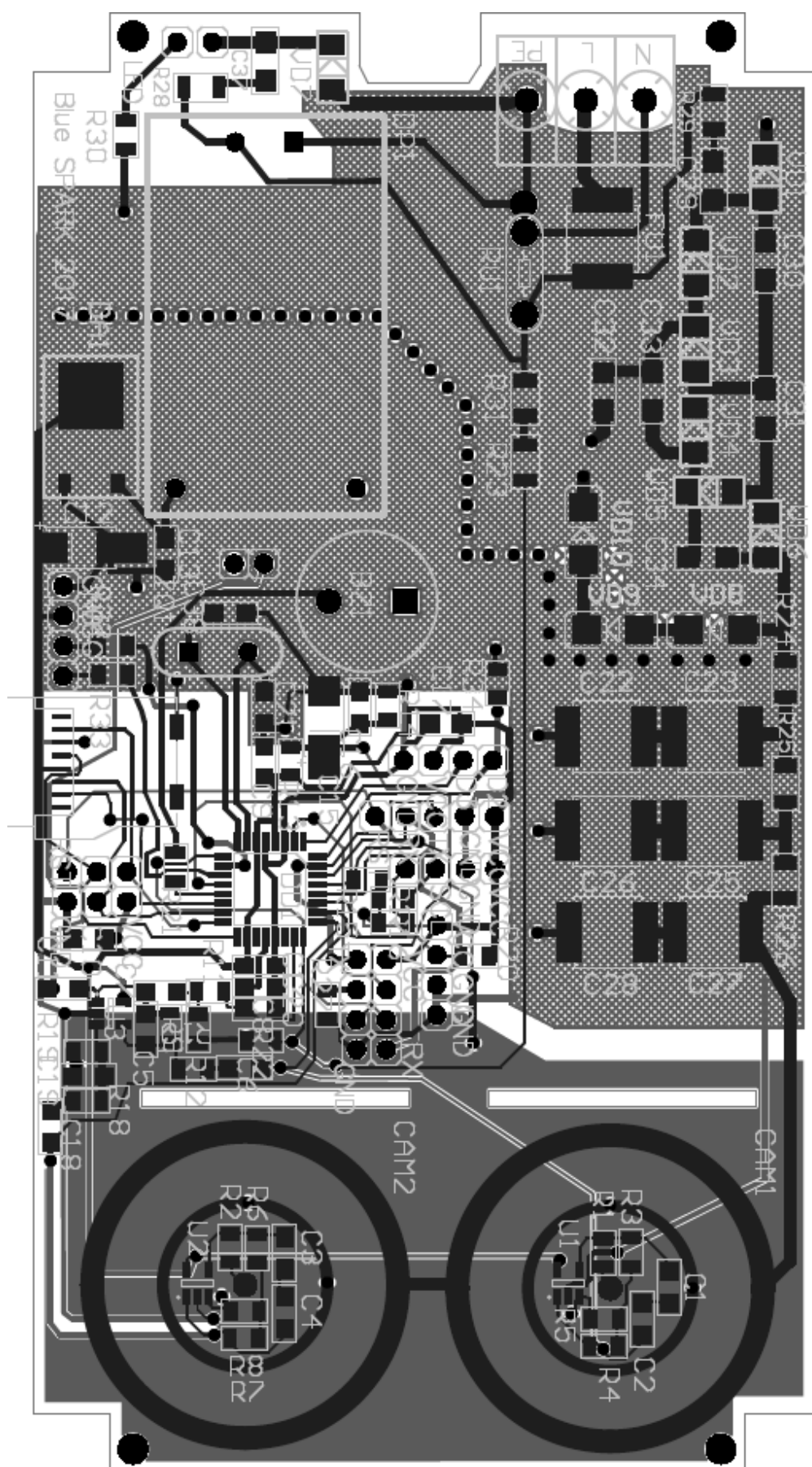


Рисунок Л.1 - Топология проводников верхней стороны печатной платы

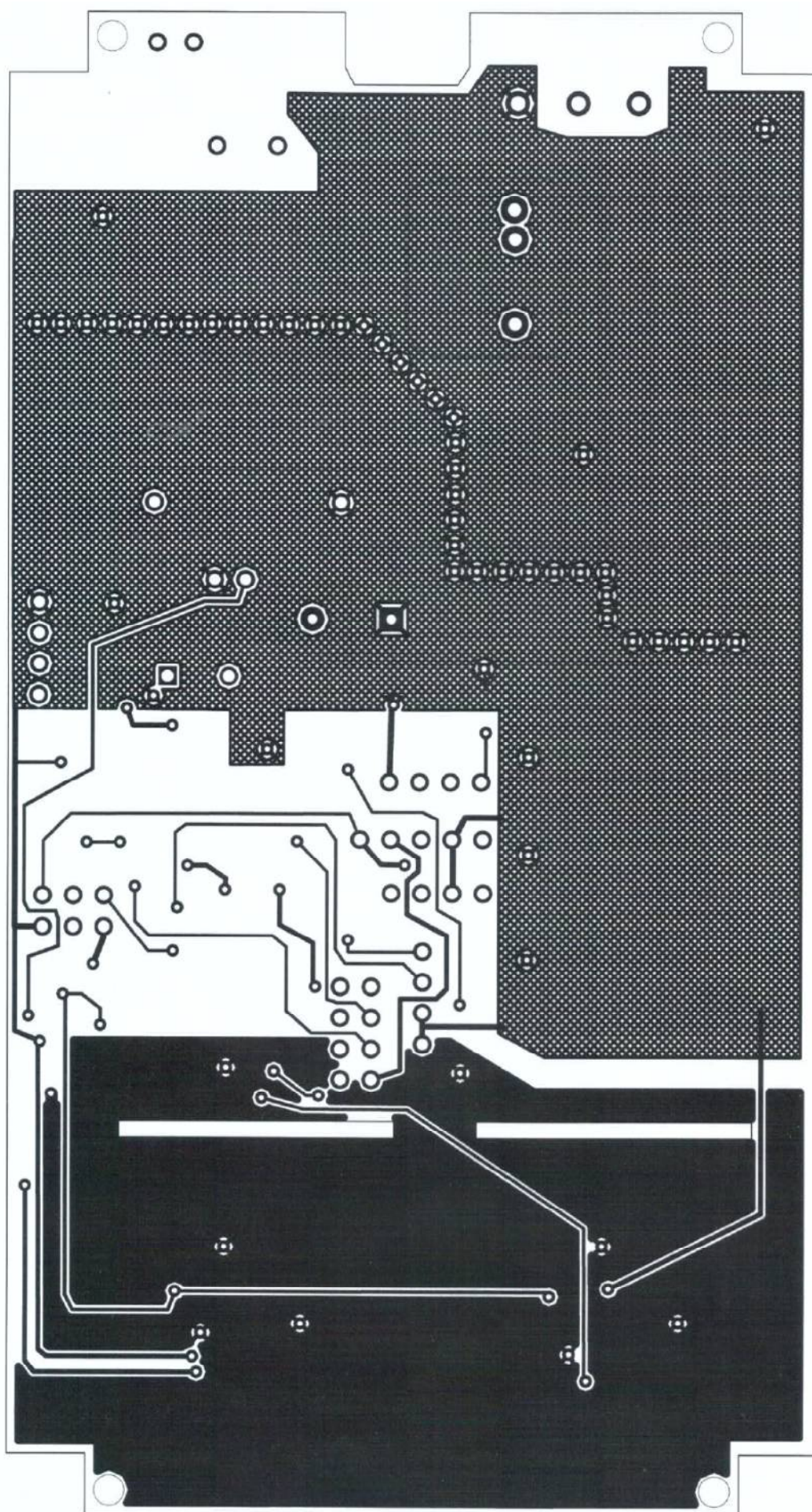


Рисунок Л.2 - Топология проводников нижней стороны печатной платы

Приложение М Доработанный сборочный чертеж печатной платы

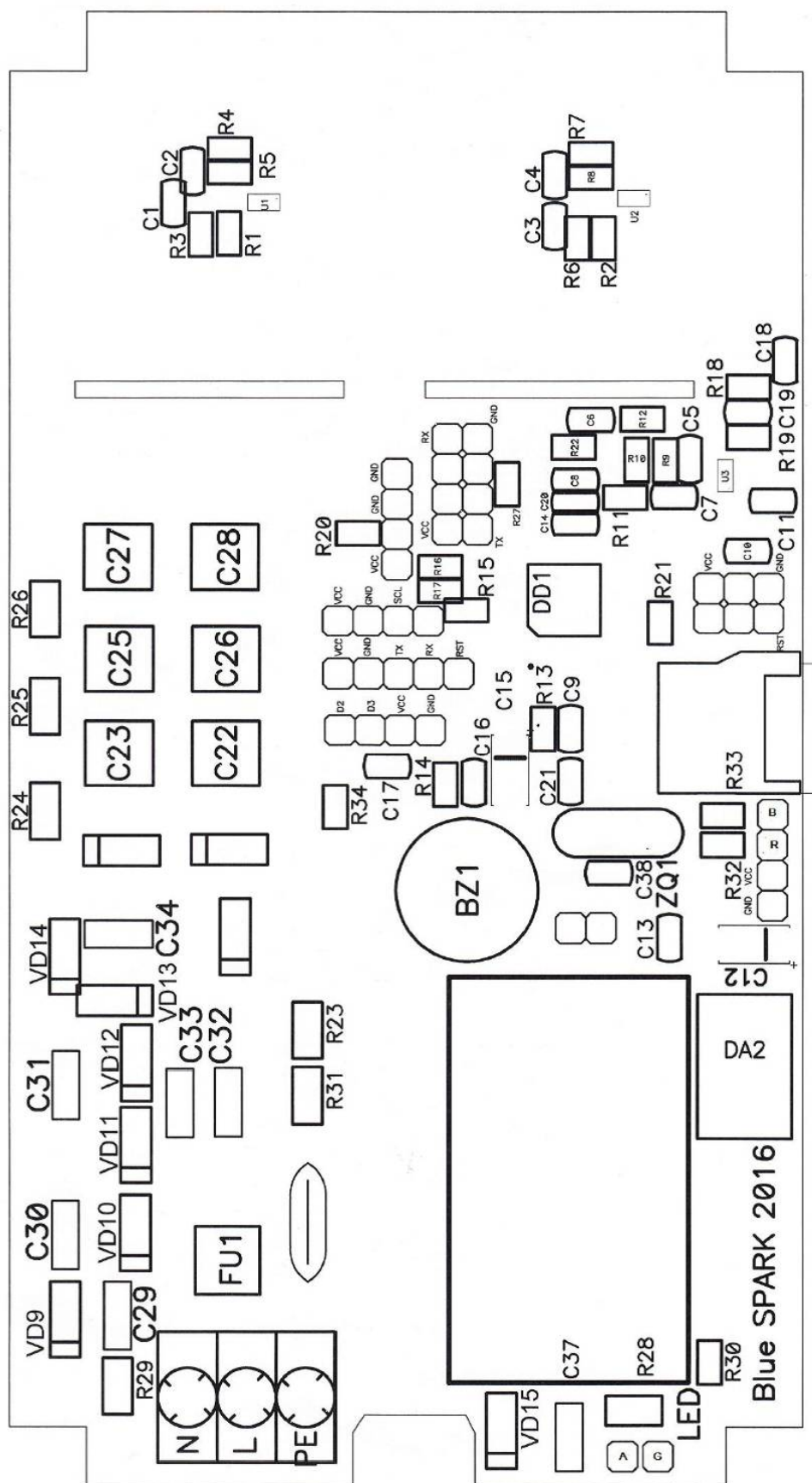


Рисунок М.1. Сборочный чертеж печатной платы

Приложение Н

3D-модель электронной платы прибора

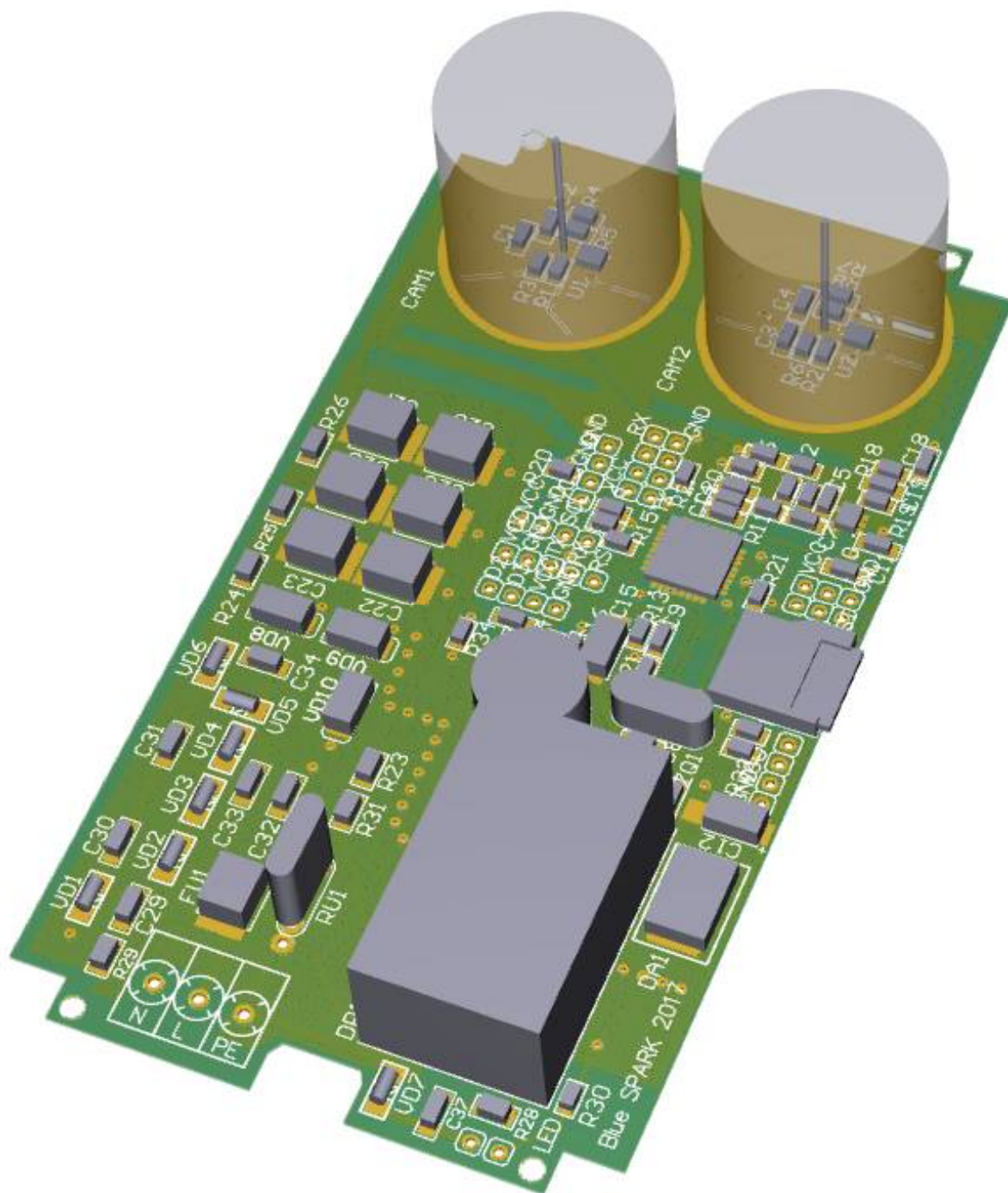



Рисунок Н.1 - 3D-модель электронной платы прибора в сборе с компонентами

Приложение П

Уведомление о приеме и регистрации заявки на полезную модель

Форма № 94 ИЗ, ПМ, ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

 «Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)


Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

| | | |
|------------------|------------|-------------------|
| 14.02.2018 | 008399 | 2018105504 |
| Дата поступления | Входящий № | Регистрационный № |

| | | | |
|---|--|--|---------------------------------|
| ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации) 14.02.2018 | | (21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № 008399 | ВХОДЯЩИЙ № 2018105504 |
| (85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу 14.02.2018 | | | |
| <input type="checkbox"/> ФИПС (уведомление о приеме международной заявки и дата международной публикации, установленные законодательством) <input type="checkbox"/> (87) (номер и дата международной публикации международной заявки) | | АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ (полное наименование организации) 194358, Санкт-Петербург а/я 208, Пуляеву А.В. Телефон: +7 911 152-16-86 Факс: E-mail: ayulyaev@mail.ru | |
| ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель | | В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993 Российская Федерация | |
| (54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ ДЕТЕКТОР РАДОНА С СЕТЧАТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ | | | |
| (71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование юридического лица), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) ООО "РОЗЕТ" 194223, г. Санкт-Петербург, пр. Тореца, д. 33 литера А, пом. 15-Н <input type="checkbox"/> полезная модель создана за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком, исполнителем работ _____ (указать наименование) <input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ _____ (указать наименование) Контракт от _____ № _____ | | ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1177847048735 КПП 780201061 ИНН 7802010880 СНИЛС _____ ДОКУМЕНТ (серия, номер) _____ КОД страны по стандарту ВОИС ST. 3 RU | |
| (74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ (И) ЗАЯВИТЕЛЯ (указывается фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, наделенного заявителем правом представлять его интересы для получения патента от его имени в Федеральной службе по интеллектуальной собственности или являющегося таковым в силу закона) Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) _____ Адрес _____ | | <input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону Телефон: _____ Факс: _____ E-mail: _____ | |

| | | |
|---|----|---|
| Общее количество документов в листах | 30 | Лицо, зарегистрировавшее документы |
| Из них - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца) | 0 | Киселева Е.А. |
| Количество платежных документов | 2 |  |
| Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу « www.fips.ru » в разделе «Информационные ресурсы / Открытые реестры» | | |

ДЕТЕКТОР РАДОНА С СЕТЧАТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ

Область техники, к которой относится полезная модель

Полезная модель относится к устройствам для определения уровня радона в воздухе.

Уровень техники

Из патента RU2008694 известно устройство для определения содержания в воздухе радона. Определение происходит путем регистрации альфа-частиц, испускаемых дочерними продуктами распада радона. Устройство содержит воздушную камеру, в которой размещен датчик альфа-частиц. Воздух подается в камеру через аэрозольный фильтр. Камера выполнена в виде складывающихся телескопических колец, благодаря которым она может складываться и расправляться, обеспечивая, тем самым, подачу воздуха внутрь камеры (т.е. камера выполняет также роль насоса).

Для обеспечения достаточной чувствительности и точности измерений камера должна иметь достаточно большие размеры. В частности, минимальный характерный линейный размер камеры, такой как высота или диаметр, для обеспечения минимальной работоспособности устройства должен быть более 30 мм, а для реализации потенциально возможной чувствительности камера должна иметь размер от 80 до 120 мм или более. Недостатком такого прибора являются большие размеры, необходимые для обеспечения достаточной чувствительности.

Раскрытие полезной модели

Задачей полезной модели является повышение чувствительности детектора радона при одновременном уменьшении размеров ионизационной камеры.

Задача полезной модели решается с помощью детектора радона, включающего в себя сетчатую цилиндрическую ионизационную камеру, установленную с обеспечением возможности попадания на него дочерних продуктов распада радона из воздуха около детектора (т.е. открытую для окружающего воздуха). Сетчатая цилиндрическая ионизационная камера состоит из катода в виде сетчатого внешнего электрода, выполненного в виде сетчатого металлического цилиндра с сетчатой металлической крышкой и установленного торцом цилиндра на монтажной плате, и анода, выполненного с использованием проволоки и содержащего основу, радиальные ветви и боковые ветви. Основа установлена одним концом на монтажной плате в геометрическом центре торца цилиндра с расположением вдоль оси цилиндра. Радиальные ветви прикреплены к другому концу основы параллельно сетчатой металлической крышке внешнего электрода. Боковые ветви прикреплены к концам радиальных ветвей и расположены параллельно основе и боковым стенкам сетчатого металлического

цилиндра внешнего электрода. Расстояние от боковых ветвей до сетчатого металлического цилиндра внешнего электрода равно расстоянию от радиальных ветвей до сетчатой металлической крышки внешнего электрода.

Длина цилиндра составляет не более 2,5 см, а радиус цилиндра составляет не более 1 см. На плате между местами установки анода и катода размещено защитное кольцо в виде проводника, окружающее анод и соединенное с анодом через защитную цепь.

Детектор радона также содержит блок обработки, индикатор и источник питания. Блок обработки выполнен с возможностью обработки сигнала с измерительного электрода и передачи результата обработки в индикатор, который выполнен с возможностью индикации уровня радона. Источник питания выполнен с возможностью подачи питания в блок обработки и индикатор, а также подачи электрического питания на катод относительно анода.

В частном варианте анод может быть снабжен дополнительными радиальными ветвями, соединяющими нижние концы боковых ветвей с основой, причем дополнительные радиальные ветви расположены параллельно радиальным ветвям, прикрепленным к верхнему концу основы, и сетчатой металлической крышке внешнего электрода.

Напряжение электрического питания, подаваемого на катод относительно анода, предпочтительно имеет значение не менее 1000В и не более 1500В. Детектор радона также может содержать модуль связи, содержащий излучающий инфракрасный диод и выполненный с возможностью передачи данных от блока обработки посредством излучающего инфракрасного диода.

Техническим результатом полезной модели является повышение чувствительности детектора радона при одновременном уменьшении размеров ионизационной камеры.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 показан общий вид сетчатой цилиндрической ионизационной камеры.

На фиг. 2 показан частичный разрез сетчатой цилиндрической ионизационной камеры.

На фиг. 3 показан измерительный электрод.

Осуществление полезной модели

На фиг. 1 показан общий вид сетчатой цилиндрической ионизационной камеры. Сетчатая цилиндрическая ионизационная камера устанавливается на монтажной плате 1 и состоит из сетчатого металлического цилиндра 2 и сетчатой металлической крышки 3. Сетчатая металлическая крышка 3 закрывает сетчатый металлический цилиндр 2 с одного торца, а другим торцом сетчатый металлический цилиндр 2 устанавливается на монтажную плату 1.

На фиг. 2 показан частичный разрез сетчатой цилиндрической ионизационной камеры. В частичный вырез, показанный в сетчатом металлическом цилиндре 2, виден измерительный

электрод 4, который прикреплен одним концом к монтажной плате 1 в геометрическом центре торца цилиндра 2. Электрод 4, а точнее его основа 41 на фиг. 3, установлен вертикально и, поскольку конец основы 41 (фиг. 3) закреплен в геометрическом центре торца цилиндра 2 (фиг. 1, 2), то соответственно сама основа 41 измерительного электрода проходит по оси цилиндра.

Измерительный электрод 4 имеет длину, которая меньше длины сетчатого цилиндра (внешнего электрода) на определенную величину. Эта величина равна расстоянию от боковых ветвей 44 до стенок сетчатого цилиндра. Вследствие этого расстояние от конца измерительного электрода до сетчатой крышки на торце сетчатого цилиндра равно расстоянию от его боковых ветвей до стенки внешнего электрода, то есть до стенки цилиндра. Благодаря такой конфигурации достигается одинаковое расстояние от измерительного электрода до любого элемента внешнего электрода, то есть от крайних элементов электрода 4 до сетчатого цилиндра 2 и крышки 3. Это обеспечивает одинаковую напряженность электрического поля вдоль всего цилиндра.

Для удержания боковых ветвей 44 параллельно основе 41, измерительный электрод снабжен радиальными ветвями 42 и 43, проходящими от основы 41 к боковым ветвям 44 и соединенным с ними. Радиальные ветви 42 и 43 установлены, предпочтительно, перпендикулярно основе 41 и боковым ветвям 44, а боковые ветви 44 преимущественно проходят параллельно основе 41. Поскольку основа 41 устанавливается вдоль оси сетчатого цилиндра ионизационной камеры, то боковые ветви 44 проходят параллельно стенкам сетчатого цилиндра, а радиальные ветви 42 и 43 параллельно крышке сетчатого цилиндра. Расстояния от боковых ветвей до стенки сетчатого цилиндра, как уже упоминалось выше, предпочтительно равно расстоянию от верхних радиальных ветвей 42 до крышки цилиндра.

В одном из вариантов боковые ветви 44 могут крепиться к основе 41 только с помощью верхних радиальных ветвей 42. Однако, для снижения акустической и вибрационной чувствительности, боковые ветви 44 также крепятся к основе 41 с помощью нижних радиальных ветвей 43 – благодаря этому нижние концы боковых ветвей не колеблются и не вносят помехи в измерительный сигнал, снимаемый с измерительного электрода.

Основа 41, радиальные ветви 42 и 43, а также боковые ветви 44 предпочтительно выполнены с использованием проволоки. Отдельные элементы электрически и механически соединены друг с другом, например, с помощью пайки, скручивания, обжима крепежными элементами или другими способами, известными из уровня техники. На фиг. 3 показано, что измерительный электрод имеет шесть боковых ветвей, однако в других вариантах выполнения их может быть меньше или больше, от двух (трех, четырех), до восьми (девяти, десяти) или более.

Учитывая, что длина сетчатого цилиндра составляет не более 2,5 см, а радиус цилиндра составляет не более 1 см, а также учитывая, что элементы измерительного электрода внутри внешнего электрода расположены на одинаковом расстоянии до всех элементов внешнего электрода, оказывается, что напряженность электрического поля

выравнивается по всей камере. Так как внутри сетчатого внешнего электрода обеспечена одинаковая напряженность электрического поля между измерительным электродом и внешним электродом, все ионные треки, созданные альфа-частицами, выпущенными при распаде дочерними продуктами распада радона, в воздухе внутри ионизационной камеры, становятся примерно одинаковыми и гарантированно попадающими на измерительный электрод. Таким образом обеспечивается повышение чувствительности детектора радона при одновременном уменьшении размеров ионизационной камеры.

На плате между местами установки измерительного электрода (выполняющей роль анода) и сетчатого цилиндра внешнего электрода (выполняющего роль катода) размещено защитное кольцо в виде проводника, окружающего место установки измерительного электрода (анода) и соединенного с ней через защитную цепь. Этим самым предотвращаются токи утечки между анодом и катодом, что приводит к снижению помех для определения ионных треков, создаваемых альфа-частицами от дочерних продуктов распада радона. Это значит, что будут обнаружено максимально возможно количество ионных треков и, тем самым, будет повышена чувствительность детектора радона при одновременном уменьшении размеров ионизационной камеры.

Защитная цепь представляет собой RC-цепочку, выполняющую роль фильтра низких частот. Она необходима для того, чтобы токи утечки не искажали сигнал с измерительного электрода. Благодаря такой защитной цепи также повышается чувствительность детектора радона при одновременном уменьшении размеров ионизационной камеры.

Проволока, из которой изготовлен измерительный электрод, должна иметь жесткость, достаточную для сохранения прямой формы и положения в оси цилиндра, поскольку ее длина меньше длины цилиндра и, следовательно, второй конец проволоки не закреплен и находится в свободном состоянии.

Детектор радона согласно полезной модели также содержит блок обработки, индикатор и источник питания. Блок обработки обрабатывает сигнал с измерительного электрода. Обработка заключается в усилении, оцифровке и цифровой обработке сигнала, например, в выделении и подсчете импульсов, формируемых ионными треками, созданными альфа-частицами, испущенными дочерними продуктами распада радона в пределах сетчатой ионизационной камеры, а также пересчете количества сосчитанных импульсов в уровень радона, на пример, в его объемную активность. Вычисленный уровень радона передается в индикатор, который показывает пользователю уровень радона.

Детектор радона также содержит источник питания, например, батарейный или аккумуляторный. Источник питания подает питание в блок обработки и индикатор для того, чтобы они могли выполнять свои функции. Кроме того, источник питания подает электрическое питание на внешний сетчатый электрод и проволоку. Поскольку на внешний сетчатый электрод подается отрицательное напряжение относительно измерительного электрода, то внешний

сетчатый электрод, состоящий из сетчатого цилиндра и сетчатой крышки, считается катодом, а измерительный электрод считается анодом.

Благодаря разнице электрических потенциалов между анодом и катодом в сетчатой цилиндрической ионизационной камере создается напряженность электрического поля, которая позволяет отрицательно заряженным частицам (ионам), создаваемым при пролете в ионизационной камере альфа-частицами, испускаемыми дочерними продуктами распада радона, притягиваться к аноду и при попадании на него формировать сигнал, который регистрируется в блоке обработки.

Напряжение электрического питания, подаваемого на катод относительно анода, предпочтительно имеет значение не менее 1000В и не более 1500В. Детектор радона также может содержать модуль связи, содержащий излучающий инфракрасный диод и выполненный с возможностью передачи данных от блока обработки посредством излучающего инфракрасного диода.

ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ

1. Детектор радона, включающий в себя сетчатую цилиндрическую ионизационную камеру, установленную с обеспечением возможности попадания на него дочерних продуктов распада радона из воздуха около детектора, блок обработки, индикатор и источник питания, причем сетчатая цилиндрическая ионизационная камера состоит из катода в виде сетчатого внешнего электрода, выполненного в виде сетчатого металлического цилиндра с сетчатой металлической крышкой и установленного торцом цилиндра на монтажной плате, и анода, выполненного с использованием проволоки и содержащего основу, радиальные ветви и боковые ветви, причем основа и установлена одним концом на монтажной плате в геометрическом центре торца сетчатого металлического цилиндра с расположением по оси цилиндра, причем радиальные ветви прикреплены к другому концу основы параллельно сетчатой металлической крышке внешнего электрода, причем боковые ветви прикреплены к концам радиальных ветвей и расположены параллельно основе и боковым стенкам сетчатого металлического цилиндра внешнего электрода, причем расстояние от боковых ветвей до сетчатого металлического цилиндра внешнего электрода равно расстоянию от радиальных ветвей до сетчатой металлической крышки внешнего электрода, причем длина цилиндра составляет не более 2,5 см, а радиус цилиндра составляет не более 1 см, причем на монтажной плате между местами установки анода и катода размещено защитное кольцо в виде проводника, окружающего анод и соединенного с анодом через защитную цепь, причем блок обработки выполнен с возможностью обработки сигнала с измерительного электрода и передачи результата обработки в индикатор, который выполнен с возможностью индикации уровня радона, причем источник питания выполнен с возможностью подачи питания в блок обработки и индикатор, а также подачи электрического питания на катод относительно анода.

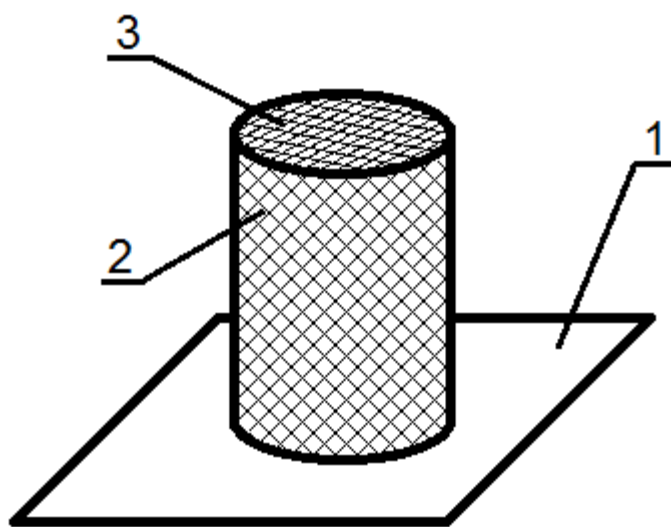
2. Детектор радона по п. 1, отличающийся тем, что анод снабжен дополнительными радиальными ветвями, соединяющими нижние концы боковых ветвей с основой, причем дополнительные радиальные ветви расположены параллельно радиальным ветвям, прикрепленным к верхнему концу основы, и сетчатой металлической крышке внешнего электрода.

3. Детектор радона по п. 1, отличающийся тем, что напряжение электрического питания, подаваемого на катод относительно анода имеет значение не менее 1000В и не более 1500В.

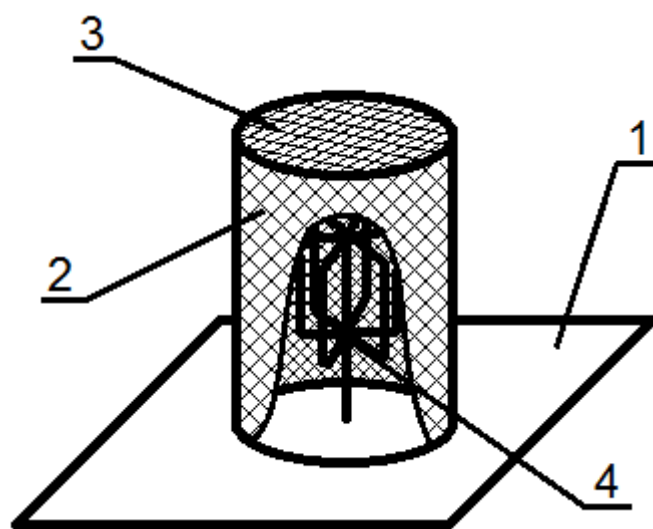
4. Детектор радона по п. 1, отличающийся тем, что включает в себя модуль связи, содержащий излучающий инфракрасный диод и выполненный с возможностью передачи данных от блока обработки посредством излучающего инфракрасного диода.

ДЕТЕКТОР РАДОНА С СЕТЧАТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ

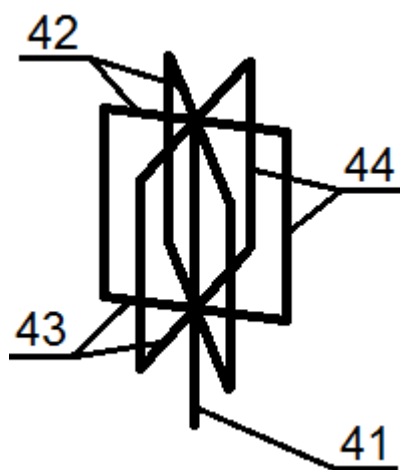
Представлен детектор радона, включающий в себя сетчатую цилиндрическую ионизационную камеру, установленную с обеспечением возможности попадания на него дочерних продуктов распада радона из воздуха около детектора. Сетчатая цилиндрическая ионизационная камера состоит из катода в виде сетчатого внешнего электрода, выполненного в виде сетчатого металлического цилиндра с сетчатой металлической крышкой и установленного торцом цилиндра на монтажной плате, и анода, выполненного в виде проволоки длиной меньше длины сетчатого внешнего электрода на радиус цилиндра и установленной одним концом на монтажной плате в геометрическом центре торца цилиндра с расположением по оси цилиндра. Длина цилиндра составляет не более 2,5 см, а радиус цилиндра составляет не более 1 см. На плате между местами установки анода и катода размещено защитное кольцо в виде проводника, окружающее анод и соединенное с анодом через защитную цепь. Детектор радона также содержит блок обработки, индикатор и источник питания. Блок обработки выполнен с возможностью обработки сигнала с измерительного электрода и передачи результата обработки в индикатор, который выполнен с возможностью индикации уровня радона. Источник питания выполнен с возможностью подачи питания в блок обработки и индикатор, а также подачи электрического питания на катод относительно анода. Техническим результатом полезной модели является повышение чувствительности детектора радона при одновременном уменьшении размеров ионизационной камеры.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Приложение Р

Текст отлаженной программы макета

```
/*
Программное обеспечение макетного образца прибора ROZET

В составе вспомогательных датчиков:
- датчик влажности BME280
- датчик атмосферного давления BME280
- датчик температуры BME280
- датчик действующего напряжения сети (встроен в схему прибора, его пробой крайне опасен, минимум два резистора 1206!)
- датчик углекислого газа CO2 MH-19
- счётчик Гейгера СБМ-20-1

Количество импульсов альфа-частиц подсчитывается за интервал времени, усредняется экспоненциально, записывается на SD
карту.
В записи 9 параметров:
- текущий счёт альфа частиц (в текущем цикле накопления)
- усредненные фильтром (почасовые) накопленные показания
- сглаженная оценка уровня радона
- температура
- влажность
- давление
- напряжение сети
- уровень CO2
- уровень гамма-фона

Серийный образец нагревается на 1.5-2 градуса при работе от сети. Это сушит воздух внутри прибора. Электрическое поле также
дополнительно сушит воздух.
В результате температура завышена примерно на 2 градуса, а влажность занижена примерно на 10%. Давление измеряется точно.
В связи с этим эффектом измерения температуры и влажности подвергаются экспоненциальной коррекции после старта прибора.

Прибор вначале по SPI прошивается загрузчиком Lylipad 3.3V 8 MHz, затем по USART программируется как этот же штатный
вариант Ардуино.
*/

//***** Определения индивидуальных отличий каждой модели устройства *****

#define SDCARD //Если определено, то используется SD-карта
//define QUAD //Если определено, то в приборе есть дисплей Тройка-QUAD
#define TVD //Если определено, то в приборе есть сенсор BME280
#define CO2 //Если определено, то в приборе есть сенсор CO2 MH-19
#define GEIGER //Если определено, то в приборе есть счётчик Гейгера СБМ-20
#define WiFiModule //Если есть WiFi-модуль ESP8266/ESP32
//define EMI //Если определено, то производится оценка электромагнитного смога

//D4 и D5 выходят на ESP разъём
#define TFT_ON 5 //Ножка включения/выключения графического дисплея TFT

#define AD_SHIFT 511 //Постоянное смещение нулевой линии в данном образце прибора

//40150 кОм - сопротивление четырех 10МОм, а 150.15кОм - импеданс источника опорного напряжения на частоте сети 50 Гц плюс
33 кОм измерительный R
const float AC_COEFF = 1.01 / (150.15 / (40150.0 + 150.15) / (3.30 / 1023.0)); //Калибровочный коэффициент вольтметра сети (в
данном образце прибора R=40.15M)

#define BcM3_COEFF 7.0 //Калибровочный коэффициент, переводящий альфа-события в час в Бк/м3
#define BcM3_MINUTE 60.0/BcM3_COEFF //Калибровочный коэффициент, переводящий альфа-события в минуту в Бк/м3
#define ALARM_POROG 100 //Порог звуковой сигнализации в Бк/м3

//***** Подключение библиотек и соответствующие определения *****

#include <Arduino.h> //Стандартная библиотека Ардуино

//Библиотека индикатора
#ifndef QUAD
#include <QuadDisplay.h> //Библиотека модифицирована под 8 МГц CPU
#define LPIN 2 //К этой ноге подключен дисплей Module LED Tройка-quad display (на 3-й он промаргивает!)
#endif
#define AuxIndicationTime 4000L //Время индикации вспомогательных величин ТВД (влажность, давление и т.д.) в мс.
#define ACTIVE_SND 1 //Если звукоизлучатель активный, иначе закомментировать

//Библиотека i2C
#include <Wire.h> //Аппаратный I2C на ногах A4-A5

//Библиотека памяти EEPROM
#include <EEPROM.h>
#define Header_string_length 128 //Длина заголовочной строки EEPROM
#define EEPROM_length 1024 //Длина EEPROM памяти ATMEGA328P
```

```

#define TIME_ADDR 1016 //Время наработки прибора в часах (адрес в EEPROM)
#define DOZE_ADDR 1020 //Накопленная прибором доза (адрес в EEPROM)
#define TIME_STR_ADDR 93 //В символьном виде время наработки
#define DOZE_STR_ADDR 109 //В символьном виде накопленная доза

//Библиотека SD-карты
#ifdef SDCARD
#include <SD.h>
#define chipSelect 10 //Нога управления CS карточки SD
#endif

//Определения служебных констант
#define WAIT_PC 10 //Сколько секунд ждать компьютер при подключении USB или старте
#define Power_pin A1 //Сетевое напряжение приходит на этот канал АЦП
#define SOUND 9 //Ножка излучателя звука
#define Acc_interval 59 //60 минут копим счётчик радона
#define Pulse_pin A0 //С этого канала АЦП наблюдаем импульсы альфа-частиц
#define N_AC 4192 //Сколько отсчётов АЦП усреднять при измерении напряжения сети (целое число периодов 50 Гц)
#define led_R_Pin 6 //Красный диод в цветном
#define UnNormal220 100 //Ниже этого напряжения сети 110/240В считаем нерабочим
#define ALARM 2400 //Частота писка при превышении порога радона
#define PressureCoeff 0.00750062 //Коэффициент перевода Паскалей в мм. рт. ст.
#define RELAY 3 //Управление фазовым реле
#define BUTTON 7 //Кнопка управления
#define PowerStep 10 //На сколько вольт должно скакнуть напряжение сети при касании рукой фазового сенсора
float Power = 0; //Переменная для измерения сетевого напряжения
float SPower = 0; //Переменная для сглаживания сетевого напряжения
float PWRNoise = 0; //Переменная для хранения оценки сетевой "грязи"
float SPWRNoise = 0; //Переменная для хранения сглаженной оценки сетевой "грязи"
const long Duration = 59000; //Период измерения в мс (должна быть минута, но секунда тратится на датчики, АС и SD и
успокоение)
int result = 0; //Переменная для хранения результата АЦП
unsigned int score = 0; //Первичный счётчик частиц (заменяет с int на Unsigned int)
float Mean_result = 0.0; //Переменная хранения накопленного и сглаженного счёта частиц
unsigned long currentMillis = 0; //Текущее системное время в мс
unsigned long previousMillis = 0; //Системное время на предыдущем цикле обнаружения
byte Radon_Minutes = 0; //Счётчик интервалов (обычно, минут)
boolean Dump = false; //Выводить/не выводить содержимое SD-карты
boolean FIRST_CYCLE = true; //Вначале первый цикл измерения альфа-активности (надо дать начальное значение усреднителю)

//Переменные модели вычисления текущего уровня радона
const float TimeFtCoeff = 0.1; //Фильтруем с постоянной порядка 10 событий
float Express_result = 15; //Экспресс-оценка уровня радона, начинаем с 15 Бк по умолчанию

//Переменные и определения для работы с кнопкой (кнопка сенсорная, заряд человека переводит ногу порта в 1-цу, либо
механическая, либо QTouch)
#define PressButton_Pin 3 //Ножка CPU, связанная с сенсорной кнопкой
boolean SOUND_ON = true; //Изначально звук включен
boolean BUTTON_FLAG = false; //Реагировать ли на кнопку? До получения первых показаний - нет.
boolean DISPLAY_ON = true; //Показывать ли данные на дисплее
byte CNTRL_STATE = 0; //Счётчик состояний кнопки управления
byte LED = led_R_Pin; //Каким светодиодом будем работать по умолчанию (красным или синим)

#ifdef TVD
//Подключаем драйвер BME280
#include "BME280C.h"
#endif

//Переменные детектора
#define CORR_POROG (2*35) //Порог срабатывания детектора альфа-частиц (вероятность ПО 0.99 ЛТ 1Е-6 (это примерно 200
мВ)
#define SIG_POROG (10) //Порог шума, если он превышен не считаем импульсы
static int Sigma = 0; //СКО шума
#define Nb 1 //Константы измерителя СКО шума. Коэффициент сглаживания. Чем меньше, тем больше гладит
#define kb 8 //Компенсатор ограниченной разрядности Коэффициент сглаживания Nb/2^kb

#define pwmPin 8 //Нога для чтения показаний датчика CO2 (показания в виде ШИМ)

//Блок поправок температуры и влажности

const float p1 = -0.00040215; //Коэффициенты аппроксимации экспоненты полиномом
const float p2 = 0.0092158;
const float p3 = -0.083872;
const float p4 = 0.38667;
const float p5 = -0.93464;
const float p6 = 0.99167 - 1; //Из аддитивного члена заранее вычитаем 1-цу, поскольку нужна функция exp(x)-1

#ifdef WiFiModule
//const float CORR_T = 4.5771; //Настолько нагревается прибор с WiFi и CO2 в высоком корпусе
const float CORR_T = 6.7771; //Настолько нагревается прибор с WiFi и CO2 и TFT в низком корпусе

```

```

#else
const float CORR_T = 2.5100;    //Настолько нагревается прибор без WiFi и CO2
#endif
const float T_ALFA = 0.0647;    //Показатель экспоненты прогрева
const float H_ALFA = 0.0472;    //Показатель экспоненты осушения
byte COMMON_TIME = 0;           //Общее время работы прибора в минутах, используется для компенсации изменения ТВД во
                                //время начального прогрева прибора

float iexp(float x) {             //Аппроксимация падающей экспоненты (минус единица) полиномом 5-й степени (адекватна до x=7)
    //return (p1 * x * x * x * x * x + p2 * x * x * x * x + p3 * x * x * x + p4 * x * x + p5 * x + p6); //Вернуть значение "эсепоненты" прямым
    //вычислением полинома
    return (p6 + x * (p5 + x * (p4 + x * (p3 + x * (p2 + x * p1))))); //Вернуть значение "эсепоненты" по схеме Горнера
}

float EF_T(float t) {             //Функция, дающая относительную поправку влажности от температуры
    return (1.656e-6 * t * t - 0.00051081 * t + 0.08);
}

float TRUE_T(float t, byte time) { //Функция, поправляющая температуру
    return (t + CORR_T * iexp(T_ALFA * time));
}

float TRUE_H(float t, float h, byte time) { //Функция, поправляющая влажность
    return (h * (1 - CORR_T * EF_T(t) * iexp(H_ALFA * time)));
}

#include <PinChangeInt.h>         //Прерывания по любому пину, библиотека

//Блок работы с дополнительным счётчиком Гейгера
#define SBM20 4                  //Порт, куда подключен гамма-счётчик СБМ-20-1
float gamma = 15;                //Усредненное начальное (типичное) значение гамма-фона
int score2 = 0;                  //Счётчик частиц (СБМ-20)

//Обработка прерывания от СБМ-20
void Geiger2() {                 //Обработка прерывания
    score2++;                     //Инкрементировать счётчик частиц
}

//***** Исполняемый модуль начальных установок *****

void setup()
{
    Serial.begin(115200);         //Активируем последовательный порт

#ifdef TVD
    Wire.begin();                 //Активируем шину I2C
    BME280_Init(BME280_OS_T_16, BME280_OS_P_16, BME280_OS_H_16, //Активируем датчик BME280
                BME280_FILTER_16, BME280_MODE_NORMAL, BME280_TSB_05); //BME280_MODE_NORMAL
#endif
    tone(SOUND, 1000, 1000);      //Издать звук при включении
#ifdef QUAD
    displayClear(LPIN);           //Очищаем дисплей
#endif
    pinMode(SBM20, INPUT_PULLUP); //Активируем порт счётчика Гейгера
    pinMode(led_R_Pin, OUTPUT);   //Ноги цветного светодиода настроить
    digitalWrite(led_R_Pin, HIGH); //Красный и синий выключены
    pinMode(RELAY, OUTPUT);       //Настройка пина фазового реле
    digitalWrite(RELAY, LOW);     //Начальное положение фазового реле
    pinMode(BUTTON, INPUT_PULLUP); //Подтягиваем кнопку управления к питанию
    pinMode(TFT_ON, OUTPUT);      //Настраиваем ногу управления дисплеем
    digitalWrite(TFT_ON, HIGH);   //Включаем TFT дисплей

    sqr220();                     //Проверить, есть ли напряжение сети и "земля" и нормальное ли оно
    float PowerFirst = Power;     //Запоминаем его
    float PowerDiff = 0;          //Здесь будем хранить скачок напряжения, возникающий при касании человека кнопки "ON"

    do {
        sqr220();                 //Измеряем сетевое напряжение после появления надписи
        PowerDiff = Power - PowerFirst; //Вычисляем размер скачка напряжения
    } while (abs(PowerDiff) < PowerStep); //Пока скачок не превысил 10 Вольтр продолжаем измерять
    if (PowerDiff > PowerStep) {   //Если напряжение выросло, то перевернуть фазу
        while (abs(analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT) > 10); //Ждем перехода через ноль, чтобы избежать броска тока
        digitalWrite(RELAY, HIGH); //Переключаем реле синфазно
    }
    delay(100);                   //Ждем успокоения переходных процессов

    Serial.println("Start");      //Проинформировать WiFi-модуль и графический дисплей, что прибор успешно стартовал

    sqr220();                     //Снова проверить, есть ли напряжение сети и "земля" и нормальное ли оно

    for (byte i = 0; i < WAIT_PC; i++) { //Сколько ждать компьютера (в это время идёт установление HV)
#ifdef QUAD

```



```

    if (Power > UnNormal220) displayDigits(LPIN, QD_G, QD_o, QD_O, QD_n); //Надпись "GoOn" - стартуем и ждём установления
высокого напряжения
    else displayDigits(LPIN, QD_G, QD_r, QD_n, QD_d); //Надпись "GRND" - значит нет земли или нормальной сети. Умножитель не
работает. Частиц не будет.
#endif
    digitalWrite(LED, 1 - digitalRead(LED)); //Параллельно мигаем назначенным диодом
    delay(1000); //Надпись горит
#ifdef QUAD
    displayClear(LPIN); //Очищаем дисплей
#endif
    delayMicroseconds(50000); //Подержали пустым (мигнули)
}
#ifdef SDCARD
pinMode(chipSelect, OUTPUT); //Нога 10 - CS SD-карты, настроить на вывод обязательно!
if (!SD.begin(chipSelect)) { //Есть ли работоспособная карта в приборе? Если нет, не производим инициализацию
#ifdef QUAD
    displayDigits(LPIN, QD_C, QD_A, QD_r, QD_d); //Написали CArd (нет карты)
#endif
}
else {
    File myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE); //Открыли файл на запись, если его нет, то он создаётся
    for (byte address = 0; address < Header_string_length; address++) { //Выдать в файл информацию о приборе, прописанную в EEPROM
        myFile.print((char)EEPROM.read(address)); //Байт за байтом
    }
    myFile.println(); //Выдать "перевод строки"
    myFile.close(); //Закрыть файл
}
#ifdef QUAD
    displayDigits(LPIN, QD_MINUS, QD_MINUS, QD_MINUS, QD_MINUS); //Надпись "----"
#endif
}
#endif

//Настраиваем АЦП (нам нужен сравнительно быстрый АЦП не менее 9 кГц при 8 МГц тактовой частоты CPU)
ADCSRA &= ~(bit (ADPS0) | bit (ADPS1) | bit (ADPS2)); //Очищаем биты прескалера АЦП
ADCSRA |= bit (ADPS0) | bit (ADPS2); //32 - это 250 кГц при 8 МГц тактовой
delay(500); //Задержка для успокоения напряжений после работы SD и UART
PCintPort::attachInterrupt(BUTTON, PressButton, FALLING); //Прерывание управляющей кнопки
PCintPort::attachInterrupt(SBM20, Geiger2, FALLING); //Прерывание счётчика СБМ-20 (гамма-фон)
result = analogRead(Pulse_pin); //Настраиваем мультиметр на альфа-канал и читаем. Второе чтение АЦП уже будет
валидно
previousMillis = millis(); //Запомнили текущее системное время
}

//***** Основной бесконечный цикл измерений, обнаружения альфа-событий и подсчётов
*****

void loop()
{
    DETECTING(10); //Считать частицы (10) миллисекунд (шаг счётчика времени)
    unsigned int tmp_score = score; //Сохраняем счётчик альфа-частиц
    unsigned int tmp_score2 = score2; //Сохраняем счётчик фотонов
    currentMillis = millis(); //Считываем текущее системное время
    if ((currentMillis - previousMillis) >= Duration) { //Считаем и показываем результаты измерений каждую минуту, минута прошла
        Radon_Minutes++; //Сколько минут мы уже копим альфа-события
        if (Radon_Minutes > Acc_interval) { //Прошёл ли заданный интервал накопления в минутах? Типа, час.
            FIRST_CYCLE = false; //Если первый интервал накопления прошёл (например, час) то все остальные уже не
первые
            EEPROM_float_write(TIME_ADDR, 1 + EEPROM_float_read(TIME_ADDR)); //Инкрементировать счётчик наработки прибора
            EEPROM_float_write(DOZE_ADDR, score + EEPROM_float_read(DOZE_ADDR)); //Инкрементировать счётчик накопленной дозы
прибора
            EEPROM_float_2string_write(TIME_ADDR, TIME_STR_ADDR); //Записать время наработки в заголовочную строку
EEPROM
            EEPROM_float_2string_write(DOZE_ADDR, DOZE_STR_ADDR); //Записать накопленную дозу в заголовочную строку
EEPROM
            Mean_result = score / BcM3_COEFF; //Реализуем среднечасовую оценку альфа-фона
            score = Radon_Minutes = 0; //Сбрасываем счётчики минут и частиц в интервале накопления
        }
        //Если час не первый, то даём комбинированную оценку
        score2 = 0;
        gamma = 0.9 * gamma + 0.075 * tmp_score2; //Гамма-фон вычисляем в мкр/час
        if (FIRST_CYCLE) { //Собственно экспресс-оценка
            Mean_result = score / BcM3_COEFF; //Если это первый цикл накопления, то среднее значение = текущему
            if (Radon_Minutes == 1 && score > 5) Express_result = 60 * Mean_result; //Если уровень высок (>50 Бк/м3) то сразу дать оценку, за
первую минуту
            else Express_result += TimeFltCoeff * (BcM3_MINUTE * score / Radon_Minutes - Express_result); //Уровень невысок, оценку
набираем постепенно
        }
        else { //Если не первый час, то считаем с учётом результатов предыдущего часа
            Express_result += TimeFltCoeff * ((BcM3_MINUTE * (score + BcM3_COEFF * Mean_result)) / (Radon_Minutes + Acc_interval) -
Express_result);
        }
    }
}

```

```

BUTTON_FLAG = false; //Запретим реагировать на кнопку пока идут доп. измерения и индикация

/***** Производим все измерения с датчиков *****/

if ( Express_result > ALARM_POROG ) { //Если превышен заданный порог безопасности, то
    if (SOUND_ON) tone(SOUND, ALARM, 1000); //Противный звук, раздающийся каждую минуту при превышении порога
}
//Читаем показания датчика влажности, давления и температуры
#ifdef TVD
    float h, t, p;
    BME280_ReadAll(&BME280_temperature, &BME280_pressure, &BME280_humidity); //Прочли все показания
#endif

//Читаем показания датчика CO2
#ifdef CO2
    float PPM = 5 * (((pulseIn(pwmPin, HIGH, 2000000)) / 1000.0) - 2);
    if (PPM < 0 || PPM > 5000) PPM = 0; //Проверка на осмысленность результата
#endif

//Измерение истинного среднеквадратичного напряжения сети, результат в переменной Power
sqr220();
if (Radon_Minutes > 1 && FIRST_CYCLE) SPower = Power; //Начальное значение напряжения сети
SPower = 0.9 * SPower + 0.1 * Power; //Фильтрованное значение напряжения сети
#ifdef EMI
    SNqr220(); //Измерение электромагнитного смога
#endif
if (Radon_Minutes > 1 && FIRST_CYCLE) SPWRNoise = PWRNoise; //Начальное значение напряжения сети
SPWRNoise = 0.9 * SPWRNoise + 0.1 * PWRNoise; //Фильтрованное значение напряжения сети

/***** Запись результатов измерений на SD-карту *****/

String dataString = String((float)tmp_score); //Накопленное количество событий за текущий интервал
dataString += "\t";
dataString += String(Mean_result); //Сглаженный уровень радона, меняется раз в час
dataString += "\t";
dataString += String(Express_result); //Экспресс-оценка уровня радона, меняется каждую минуту
#ifdef TVD
    dataString += "\t";
    dataString += String(t = TRUE_T(BME280_temperature / 100.0, COMMON_TIME)); //Температура град. C
    dataString += "\t";
    dataString += String(h = TRUE_H(t, BME280_humidity / 1024.0, COMMON_TIME)); //Влажность в процентах
    dataString += "\t";
    dataString += String(p = BME280_pressure * PressureCoeff); //Давление в мм. рт. ст.
#endif
dataString += "\t";
dataString += String(SPower); //Действующее значение сетевого напряжения в Вольтах
#ifdef CO2
    dataString += "\t";
    dataString += String(PPM); //Показания содержания CO2 в воздухе в ppm (норма 400)#endif
#endif
#ifdef GEIGER
    dataString += "\t";
    dataString += String(gamma); //Показания содержания CO2 в воздухе в ppm (норма 400)
#endif
#ifdef EMI
    dataString += "\t";
    dataString += String(PWRNoise); //Действующее значение сетевого шума в Вольтах
#endif
COMMON_TIME++; //Общее системное время
if (COMMON_TIME > 100) COMMON_TIME = 100; //Через 100 циклов все давно прогрелось

#ifdef SDCARD
//Фактическая запись строки данных с измерениями на SD-карту (в файл datalog.txt) и в последовательный порт
File myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) { //Если файл доступен, то пишем в него очередную строку данных
    myFile.println(dataString); //Пишем в файл строку с измерениями
    myFile.close(); //Закрываем файл
}
}
Serial.println(dataString); //Выводим в последовательный порт те же результаты для контроля и IoT
//Снова настраиваем АЦП на детектирование частиц
ADCSRA &= ~(bit (ADPS0) | bit (ADPS1) | bit (ADPS2)); //clear prescaler bits
ADCSRA |= bit (ADPS0) | bit (ADPS2); //32 - это 250 кГц при 8 МГц тактовой
result = analogRead(Pulse_pin); //Возвращаем настройки АЦП на канал альфа-событий
//Подтягивание следящих порогов к реальности после индикации (ибо была лагуна в измерениях!)
for (byte i = 0; i < 200; i++) DETECTOR(); //Не пользуемся функцией DETECTING(), ибо не ловим здесь частицы!
previousMillis = currentMillis = millis(); //Перенастраиваем счётчик времени накопления

/***** Выведем результаты измерений на дисплей *****/
#ifdef QUAD

```

```

    if(DISPLAY_ON) {
#ifdef TVD
        displayTemperatureC(LPIN, int(t + 0.5), true);    //Выдать температуру
        BLINK();                                           //Пауза и продолжаем измерения, пока идёт индикация
        displayHumidity(LPIN, int(h + 0.5), true);        //Выдать влажность
        BLINK();
        displayPressure(LPIN, int(p + 0.5), true);        //Выдать давление
        BLINK();
#endif
        displayPower(LPIN, int(SPower + 0.5), true);      //Выдать напряжение сети
#ifdef CO2
        BLINK();
        displayFloat(LPIN, PPM / 1000.0, 3);             //Выдать значение CO2
#endif
#ifdef GEIGER
        BLINK();
        displayFloat(LPIN, gamma, 1);                   //Выдать гамму (много байтов занимает!)
#endif
        BLINK();
        displayInt(LPIN, int(Express_result + 0.5), false); //Выдать округленное значение экспресс-оценки среднего уровня радона
        delayMicroseconds(10000);
    }
}

//Разрешим реагировать на кнопку
BUTTON_FLAG = true;
}

}

/***** Подпрограммы *****/
//Задержка с детектированием, вызывается при выводе на дисплей очередного параметра
void BLINK() {
    delayMicroseconds(10000);                            //Дать аналогу успокоиться после очередной смены изображения на дисплее
    DETECTING(AuxIndicationTime);                         //Считать частицы 3 секунды, пока идёт индикация
}

//Детектирование и обработка альфа-событий заданное время
void DETECTING(unsigned int mil) {                       //Прокрутить детектор частиц заданное число раз (т.е. миллисекунд)
    for (unsigned int j = 0; j < mil * 8; j++) {          //В result уже лежит первый отсчёт импульса!!!!
        if (DETECTOR()) {                                //Если скачок напряжения на АЦП больше порога, то это частица
            delayMicroseconds(3000);                     //Ждём 3 мс, когда импульс частицы закончится
            for (byte i = 56; i > 0; i--) DETECTOR();      //Ничего не регистрировать 7 мс после импульса, но следить за дисперсией
            if (Sigma < SIG_POROG) {                     //Если после регистрации частицы сигнал успокоился, то зачёт частицы
                score++;                                  //Увеличить счётчик частиц
                digitalWrite(LED, 1 - digitalRead(LED)); //Переключили цвет, т.е. запомнили факт альфа-события
                if (SOUND_ON) tone(SOUND, 4000, 10);      //Издать щелчок, если звук разрешен
            }
        }
    }
}

//Экспоненциальный фильтр 0
int ifilter(int x) {
    static int y = 0;
    static long z = 0;
    z += (x - y);
    return (y = (Nb * z) >> kb);
}

//Экспоненциальный фильтр 1
int ifilter1(int x) {
    static int y = 0;
    static long z = 0;
    z += (x - y);
    return (y = (32 * z) >> kb);
}

//Детектор альфа-событий
boolean DETECTOR () {
    int x = ((ADCL | ADCH << 8) - 512);                  //Постоянная оцифровка и детектирование сигнала
    x = abs(x - ifilter1(x));                            //Отрезаем НЧ (ниже 100 Гц) и берём модуль
    bitWrite(ADCSRA, ADSC, 1);                          //Запускаем следующее преобразование установкой бита 6 (=ADSC) в ADCSRA
    Sigma = ifilter(x);                                  //Вычисляем дисперсию сигнала с шумом
    delayMicroseconds(100);                              //Задержка до конца преобразования АЦП
    return (CORR_POROG < x && Sigma < SIG_POROG);         //Возвращаем факт превышения абсолютного порога
}

//Обработка прерывания от сенсорной кнопки
void PressButton() {                                    //Обработка прерывания от сенсорной кнопки (1 - нажата, 0 - не нажата). Кнопка
    AT42QT1012.
    if (BUTTON_FLAG) {                                  //Если разрешена реакция на кнопку то выделить единичный импульс от 100 до 500
        мс
        switch (CNTRL_STATE) {
            case 0:
                tone(SOUND, 800, 200);                  //Издать короткий писк
        }
    }
}
#ifdef QUAD

```

```

    displayDigits(LPIN, QD_A, QD_L, QD_L, QD_MINUS); //Sound oFF, дисплей OFF, ночной режим
#endif
    SOUND_ON = false;
    DISPLAY_ON = false;
    digitalWrite(TFT_ON, LOW); //Выключаем TFT дисплей
    break;
    case 1:
        tone(SOUND, 3000, 200); //Издать короткий писк
#ifdef QUAD
    displayDigits(LPIN, QD_A, QD_L, QD_L, QD_NONE); //Дисплей On, Звук Он, нормальный режим
#endif
    SOUND_ON = true;
    DISPLAY_ON = true;
    digitalWrite(TFT_ON, HIGH); //Включаем TFT дисплей
    break;
}
CNTRL_STATE++;
if (CNTRL_STATE > 1) CNTRL_STATE = 0; //Меняем счётчик состояний контрольной кнопки
delay(1000); //Посветить надписью "ALL-/ALL"
if (DISPLAY_ON) { //Если дисплей разрешен, то
#ifdef QUAD
    displayInt(LPIN, int(Express_result + 0.5), false); //Выдать округленное значение экспресс-оценки среднего уровня радона
#endif
}
else {
#ifdef QUAD
    displayClear(LPIN); //Если вывод на дисплей запрещен, рисуем пустоту
#endif
}
}
delayMicroseconds(50000); //Задержка на успокоение переходных процессов
while (digitalRead(BUTTON) == LOW) { //Ждём отпускания кнопки, и до тех пор не обслуживаем новые прерывания
    delayMicroseconds(50000); //Задержка, чтобы не висеть наглухо в прерывании
}
}
}
//чтение float из EEPROM
float EEPROM_float_read(int addr) {
    byte raw[4];
    for (byte i = 0; i < 4; i++) raw[i] = EEPROM.read(addr + i);
    float &num = (float&)raw;
    return num;
}
//запись float в EEPROM
void EEPROM_float_write(int addr, float num) {
    byte raw[4];
    (float&)raw = num;
    for (byte i = 0; i < 4; i++) EEPROM.write(addr + i, raw[i]);
}
//Запись плавающего числа в виде ASCII в EEPROM
void EEPROM_float_2string_write(int addr, int addr2) {
    String STR = String(EEPROM_float_read(addr));
    for (byte i = 0; i < 8; i++) EEPROM.write(addr2 + i, STR[i]);
}
}

//Измерение сетевого напряжения 220В
void sqr220() {
    float Power1 = 0;
    float TMP = analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT; //Измеряем первую точку
    while (abs(TMP = analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT) > 10); //Ждем перехода через ноль
    for (int i = 0; i < 1000; i++) TMP += 0.25 * (analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT - TMP); //Стабилизируем фильтр
    for (long i = 1; i < N_AC; i++) { //Делаем тысячи измерений
        TMP += 0.25 * (analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT - TMP); //Напряжение в сети минус средний уровень АЦП с
        фильтрацией
        Power1 += TMP * TMP; //Суммируем квадраты напряжений
    }
    Power = AC_COEFF * sqrt(Power1 / N_AC); //Вычисляем амплитудное значение напряжения сети
}

//Измерение шума поверх сетевого напряжения 220В
#ifdef EMI
void SNqr220() {
    PWRNoise = 0;
    float Power1 = 0;
    float TMP = analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT; //Измеряем первую точку
    while (abs(TMP = analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT) > 10); //Ждем перехода через ноль
    for (int i = 0; i < 1000; i++) TMP += 0.25 * (analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT - TMP); //Стабилизируем фильтр
    for (long i = 1; i < N_AC; i++) { //Делаем тысячи измерений
        TMP += 0.25 * ((PWRNoise = (analogRead(Power_pin) - AD_SHIFT)) - TMP); //Напряжение в сети минус средний уровень
        АЦП с фильтрацией
    }
}

```

```

    PWRNoise += 0.1 * (abs(TMP - Power) - PWRNoise); //Оцениваем "грязь" на сетевом напряжении (напряжение
падает в этом режиме! Время измерений увеличивается. Разобраться!)
    Power1 += PWRNoise * PWRNoise; //Суммируем квадраты напряжений
}
PWRNoise = AC_COEFF * sqrt(Power1 / N_AC); //Вычисляем амплитудное значение шумов напряжения
сети
}
#endif

//This function will write a 2 byte integer to the eeprom at the specified address and address + 1
void EEPROMWriteInt(int p_address, int p_value)
{
    byte lowByte = ((p_value >> 0) & 0xFF);
    byte highByte = ((p_value >> 8) & 0xFF);
    EEPROM.write(p_address, lowByte);
    EEPROM.write(p_address + 1, highByte);
}
//This function will read a 2 byte integer from the eeprom at the specified address and address + 1
unsigned int EEPROMReadInt(int p_address)
{
    byte lowByte = EEPROM.read(p_address);
    byte highByte = EEPROM.read(p_address + 1);
    return ((lowByte << 0) & 0xFF) + ((highByte << 8) & 0xFF00);
}
}

//----- Драйвер модуля BME280 -----
//Переменные и определения датчика давления, температуры и влажности
#ifndef _BME280_H_
#define _BME280_H_

//Device Address
#define BME280_I2C_ADDR      0x76    //0xEC or 0xEE

//Configuration parameters
//Temperature oversampling
#define BME280_OS_T_SKP      0x00
#define BME280_OS_T_1        0x01
#define BME280_OS_T_2        0x02
#define BME280_OS_T_4        0x03
#define BME280_OS_T_8        0x04
#define BME280_OS_T_16       0x05

//Pressure oversampling
#define BME280_OS_P_SKP      0x00
#define BME280_OS_P_1        0x01
#define BME280_OS_P_2        0x02
#define BME280_OS_P_4        0x03
#define BME280_OS_P_8        0x04
#define BME280_OS_P_16       0x05

//Humidity oversampling
#define BME280_OS_H_SKP      0x00
#define BME280_OS_H_1        0x01
#define BME280_OS_H_2        0x02
#define BME280_OS_H_4        0x03
#define BME280_OS_H_8        0x04
#define BME280_OS_H_16       0x05

//Filter coefficient
#define BME280_FILTER_OFF    0x00
#define BME280_FILTER_2      0x01
#define BME280_FILTER_4      0x02
#define BME280_FILTER_8      0x03
#define BME280_FILTER_16     0x04

//Mode
#define BME280_MODE_SLEEP     0x00
#define BME280_MODE_FORCED    0x01
#define BME280_MODE_NORMAL    0x03

//Standby time - ms
#define BME280_TSB_05         0x00    // 0.5
#define BME280_TSB_62         0x01    //62.5
#define BME280_TSB_125        0x02
#define BME280_TSB_250        0x03
#define BME280_TSB_500        0x04
#define BME280_TSB_1000       0x05
#define BME280_TSB_10         0x06
#define BME280_TSB_20         0x07

```

```

//User API
byte BME280_Init(byte os_t, byte os_p, byte os_h, byte filter, byte mode, byte t_sb);
byte BME280_ReadAll(long* t, unsigned long* p, unsigned long* h);
byte BME280_SetMode(byte mode);

#endif /* _BME280_H_ */

#define ID_REG            0xD0
#define PRESS_MSB_REG     0xF7
#define CALIB_00_REG      0x88
#define CALIB_26_REG      0xE1
#define CONFIG_REG        0xF5
#define CTRL_MEAS_REG     0xF4
#define STATUS_REG        0xF3
#define CTRL_HUM_REG      0xF2

static struct {
    unsigned int dig_T1;
    unsigned int dig_T2;
    unsigned int dig_T3;
    unsigned int dig_P1;
    int dig_P2;
    int dig_P3;
    int dig_P4;
    int dig_P5;
    int dig_P6;
    int dig_P7;
    int dig_P8;
    int dig_P9;
    byte dig_H1;
    int dig_H2;
    byte dig_H3;
    int dig_H4;
    int dig_H5;
    short dig_H6;
}
CalibParam;

long t_fine;                // t_fine carries fine temperature as global value

byte I2C_ReadData(byte device_addr, byte register_addr, byte* data, byte length)
{
    byte cnt;
    Wire.beginTransmission(device_addr);
    Wire.write(register_addr);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(device_addr, length);
    if(length)
    {
        if(length > 1)                                //Data
        {
            for(cnt = 0; cnt < length - 1; cnt++)
            {
                data[cnt] = Wire.read();
            }
        }
        data[length - 1] = Wire.read();
    }
    return 0;
}

byte I2C_WriteData(byte device_addr, byte register_addr, byte* data, byte length)
{
    byte cnt = 0;
    Wire.beginTransmission(device_addr);
    Wire.write(register_addr);    //Register address
    while(cnt != length)         //Data
    {
        Wire.write(data[cnt++]);
    }
    Wire.endTransmission();
    return 0;
}

/*****
* Return: 0          - Everything OK
*              non 0 - Failed
* Parameters:  os_t - Temperature Oversampling
*              os_p - Pressure Oversampling
*              os_h - Humidity Oversampling
*****/

```

```

*           filter - Filter coefficient
*           mode - Mode (Sleep/Forced/Normal)
*           t_sb - Standby time between conversions
*****/
byte BME280_Init(byte os_t, byte os_p, byte os_h, byte filter, byte mode, byte t_sb)
{
    byte ID = 0;
    byte Buff[26] = {
        0
    };
    byte Temp;
    I2C_ReadData(BME280_I2C_ADDR, ID_REG, &ID, 1);
    if(ID != 0x60)
        return 1;
    I2C_ReadData(BME280_I2C_ADDR, CALIB_00_REG, Buff, 26);
    //ToDo: test im_update bit
    CalibParam.dig_T1 = (Buff[1] << 8) | Buff[0];
    CalibParam.dig_T2 = (Buff[3] << 8) | Buff[2];
    CalibParam.dig_T3 = (Buff[5] << 8) | Buff[4];
    CalibParam.dig_P1 = (Buff[7] << 8) | Buff[6];
    CalibParam.dig_P2 = (Buff[9] << 8) | Buff[8];
    CalibParam.dig_P3 = (Buff[11] << 8) | Buff[10];
    CalibParam.dig_P4 = (Buff[13] << 8) | Buff[12];
    CalibParam.dig_P5 = (Buff[15] << 8) | Buff[14];
    CalibParam.dig_P6 = (Buff[17] << 8) | Buff[16];
    CalibParam.dig_P7 = (Buff[19] << 8) | Buff[18];
    CalibParam.dig_P8 = (Buff[21] << 8) | Buff[20];
    CalibParam.dig_P9 = (Buff[23] << 8) | Buff[22];
    CalibParam.dig_H1 = Buff[25];
    memset (Buff, 0, 7);
    I2C_ReadData(BME280_I2C_ADDR, CALIB_26_REG, Buff, 7);
    CalibParam.dig_H2 = (Buff[1] << 8) | Buff[0];
    CalibParam.dig_H3 = Buff[2];
    CalibParam.dig_H4 = (Buff[3] << 4) | (Buff[4] & 0x0F);
    CalibParam.dig_H5 = (Buff[5] << 4) | (Buff[4] >> 4);
    CalibParam.dig_H6 = Buff[6];
    Temp = (t_sb << 5) | ((filter & 0x07) << 2); //config
    I2C_WriteData(BME280_I2C_ADDR, CONFIG_REG, &Temp, 1);
    Temp = os_h & 0x07; //hum
    I2C_WriteData(BME280_I2C_ADDR, CTRL_HUM_REG, &Temp, 1);
    Temp = (os_t << 5) | ((os_p & 0x07) << 2) | (mode & 0x03); //meas
    I2C_WriteData(BME280_I2C_ADDR, CTRL_MEAS_REG, &Temp, 1);
    return 0;
}

// Returns temperature in DegC, resolution is 0.01 DegC. Output value of "5123" equals 51.23 DegC.
long BME280_CompensateT(long adc_T)
{
    long var1, var2, T;
    var1 = (((adc_T >> 3) - ((long)CalibParam.dig_T1 << 1))) * ((long)CalibParam.dig_T2) >> 11;
    var2 = (((adc_T >> 4) - ((long)CalibParam.dig_T1)) * ((adc_T >> 4) - ((long)CalibParam.dig_T1))) >> 12 * ((long)CalibParam.dig_T3) >> 14;
    t_fine = var1 + var2;
    T = ((t_fine * 5 + 128) >> 8) - 100; //Вычел 1 градус, это стандартная поправка для BME280 во всех драйверах
    return T;
}

/*
//Версия с лонгом, считает быстро, но на 200 байт больше плавучей
unsigned long BME280_CompensateP(int32_t adc_P)
{
    int32_t var1, var2;
    uint32_t p;
    var1 = (((int32_t)t_fine) >> 1) - (int32_t)64000;
    var2 = (((var1 >> 2) * (var1 >> 2)) >> 11) * ((int32_t)CalibParam.dig_P6);
    var2 = var2 + ((var1 * ((int32_t)CalibParam.dig_P5) << 1);
    var2 = (var2 >> 2) + (((int32_t)CalibParam.dig_P4) << 16);
    var1 = (((CalibParam.dig_P3 * ((var1 >> 2) * (var1 >> 2)) >> 13) >> 3) + (((int32_t)CalibParam.dig_P2 * var1) >> 1)) >> 18;
    var1 = (((32768 + var1) * ((int32_t)CalibParam.dig_P1)) >> 15);
    if (var1 == 0)
    {
        return 0; // avoid exception caused by division by zero
    }
    p = (((uint32_t)((int32_t)1048576 - adc_P) - (var2 >> 12))) * 3125;
    if (p < 0x80000000)
    {
        p = (p << 1) / ((uint32_t)var1);
    }
    else
    {
        p = (p / (uint32_t)var1) * 2;
    }
}

```

```

var1 = (((int32_t)CalibParam.dig_P9) * (((int32_t)((p>>3) * (p>>3))>>13)))>>12;
var2 = (((int32_t)(p>>2)) * (((int32_t)CalibParam.dig_P8)>>13);
p = (uint32_t)((int32_t)p + ((var1 + var2 + CalibParam.dig_P7) >> 4));
return p;
}
*/

//Версия с плавающей, занимает на 200 байт меньше, но считается дольше
unsigned long BME280_CompensateP(long adc_P)
{
    double v_x1_u32;
    double v_x2_u32;
    double pressure;

    v_x1_u32 = ((double)t_fine / 2.0) - 64000.0;
    v_x2_u32 = v_x1_u32 * v_x1_u32 * ((double)CalibParam.dig_P6) / 32768.0;
    v_x2_u32 = v_x2_u32 + v_x1_u32 * ((double)CalibParam.dig_P5) * 2.0;
    v_x2_u32 = (v_x2_u32 / 4.0) + (((double)CalibParam.dig_P4) * 65536.0);
    v_x1_u32 = (((double)CalibParam.dig_P3) * v_x1_u32 * v_x1_u32 / 524288.0 + ((double)CalibParam.dig_P2) * v_x1_u32) / 524288.0;
    v_x1_u32 = (1.0 + v_x1_u32 / 32768.0) * ((double)CalibParam.dig_P1);
    pressure = 1048576.0 - (double)adc_P;
    // Avoid exception caused by division by zero.
    if (v_x1_u32 != 0) pressure = (pressure - (v_x2_u32 / 4096.0)) * 6250.0 / v_x1_u32;
    else return 0;
    v_x1_u32 = ((double)CalibParam.dig_P9) * pressure * pressure / 2147483648.0;
    v_x2_u32 = pressure * ((double)CalibParam.dig_P8) / 32768.0;
    pressure = pressure + (v_x1_u32 + v_x2_u32 + ((double)CalibParam.dig_P7)) / 16.0;
    return (unsigned long)pressure;
}

// Returns humidity in %RH as unsigned 32 bit integer in Q22.10 format (22 integer and 10 fractional bits).
// Output value of "47445" represents 47445/1024 = 46.333 %RH
unsigned long BME280_CompensateH(long adc_H)
{
    long v_x1_u32r;
    v_x1_u32r = (t_fine - ((long)76800));
    v_x1_u32r = (((((adc_H << 14) - (((long)CalibParam.dig_H4) << 20) - (((long)CalibParam.dig_H5) * v_x1_u32r)) +
    ((long)16384)) >> 15) * (((((v_x1_u32r * ((long)CalibParam.dig_H6)) >> 10) * (((v_x1_u32r *
    ((long)CalibParam.dig_H3)) >> 11) + ((long)32768))) >> 10) + ((long)2097152)) *
    ((long)CalibParam.dig_H2) + 8192) >> 14));
    v_x1_u32r = (v_x1_u32r - (((v_x1_u32r >> 15) * (v_x1_u32r >> 15)) >> 7) * ((long)CalibParam.dig_H1)) >> 4);
    v_x1_u32r = (v_x1_u32r < 0 ? 0 : v_x1_u32r);
    v_x1_u32r = (v_x1_u32r > 419430400 ? 419430400 : v_x1_u32r);
    return (unsigned long)(v_x1_u32r >> 12);
}

/*****
* Return: 0          - Everything OK
*              non 0 - Failed
* Parameters:      t - Pointer to variable in which to write the temperature
*                  p - Pointer to variable in which to write the pressure
*                  h - Pointer to variable in which to write the humidity
*****/
byte BME280_ReadAll(long* t, unsigned long* p, unsigned long* h)
{
    byte Buff[8] = {
        0
    };
    long UncT, UncP, UncH;
    if(I2C_ReadData(BME280_I2C_ADDR, PRESS_MSB_REG, Buff, 8))
        return 1;
    UncP = ((unsigned long)Buff[0] << 16) | ((unsigned int)Buff[1] << 8) | Buff[2];
    UncP >>= 4;
    UncT = ((unsigned long)Buff[3] << 16) | ((unsigned int)Buff[4] << 8) | Buff[5];
    UncT >>= 4;
    UncH = ((unsigned int)Buff[6] << 8) | Buff[7];
    *t = BME280_CompensateT(UncT);
    *p = BME280_CompensateP(UncP);
    *h = BME280_CompensateH(UncH);
    return 0;
}

/*****
* Return: 0          - Everything OK
*              non 0 - Failed
* Parameters:      mode - Mode (Sleep/Forced/Normal)
*****/
byte BME280_SetMode(byte mode)
{
    byte RegVal = 0;
    mode &= 0x03;

```



```
I2C_ReadData(BME280_I2C_ADDR, CTRL_MEAS_REG, &RegVal, 1);
RegVal &= 0xFC;
RegVal |= mode;
return I2C_WriteData(BME280_I2C_ADDR, CTRL_MEAS_REG, &RegVal, 1);
}

long BME280_temperature;
unsigned long BME280_pressure, BME280_humidity;
```

Приложение С

Протокол испытаний

“ ” _____ 2018 г.

ПРОТОКОЛ № 1

Поверочных испытаний макета детектора радона «Розет»

1. Детектор-монитор ЭРОА радона Rozet (действующие макеты №1 и №2)
(наименование испытываемого объекта)

2. Основания для проведения испытаний: Договор №1895ГС1/26942 от 22.03.2017

3. Условия проведения испытаний: в отапливаемом помещении ООО «Розет», при нормальных условиях (влажность $23\pm 2\%$, температура $23\pm 1^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление 765 ± 10 мм. рт. ст осветительная сеть 220В с заземлением, фактическое напряжение $223\pm 2\text{В}$)

4. Средства испытаний:

- детектор радона SIRAD MR106N
- детектор радона RADEX MR107
- мультиметр MUSTECH MY62
- весы бытовые электронные DH2-000060
- малая радоновая камера объемом 20 литров
- осциллограф портативный Velleman Instruments HPS-40
- линейка стальная слесарная

5. Визуальный осмотр: макет конструктивно законченный, видимых дефектов или повреждений на корпусе не имеется, вентиляционные отверстия не загрязнены, шнур питания исправен.

6. Порядок проведения испытаний:

- осмотр визуальный
- взвешивание (при отсоединенном шнуре электропитания)
- измерение габаритных размеров
- измерение длительности импульсов от альфа-частиц по осциллограмме сигнала, оценка микрофонного эффекта по осциллограмме и контрольному прослушиванию на наушники
- вычисление максимальной нагрузочной способности по длительности импульсов с использованием номограммы

- включение прибора, проверка фактического функционирования, измерение энергопотребления
- размещение прибора вместе с эталонными приборами (SIRAD и RADEX) в радоновой камере в режиме непрерывной записи данных 6 суток
- размещение прибора в герметизированном помещении на 11 суток вместе с эталонным прибором SIRAD MR106N с непрерывной записью данных
- обработка и анализ полученных данных на ПЭВМ

7. Результаты испытаний

Таблица 1.

| Номер показателя | Показатель | По ТЗ | Факт. Rozet №1 | Факт. Rozet №2 | Примечание |
|------------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|------------|
| 1. | Габаритные размеры | 150x100x50 | 140x80x40 | 140x80x40 | Достигнут |
| 2. | Масса | 400 г. (не более) | 245 г. | 244 г. | Достигнут |
| 3. | Время экспозиции | 15 минут | 10 минут | 10 минут | Достигнут |
| 4. | Погрешность основная | | 22.6% | 23.5% | Не задан |
| 5. | Электробезопасность | Для бытовых приборов | Для бытовых приборов | Для бытовых приборов | Достигнут |
| 6. | Микрофонный эффект | Должен быть подавлен | Подавлен | Подавлен | Достигнут |
| 7. | Потребляемая от сети мощность | | 2 Вт | 2 Вт | Не задан |
| 8. | Чувствительность датчика по радону (альфа-частиц в минуту на 100 Бк/м ³) | | 15 | 15 | Не задан |

Продолжение таблицы 1.

| Номер показателя | Показатель | По ТЗ | Факт. Rozet №1 | Факт. Rozet №2 | Примечание |
|------------------|--|------------------|-------------------|-------------------|------------|
| 9. | Диапазон измерения объемной активности радона | 1-10000 Бк/м3 | 1-10000 Бк/м3 | 1-10000 Бк/м3 | Достигнут |
| 10. | Допустимая относительная влажность воздуха при температуре 25 град С | 80% | 87% | 87% | Достигнут |

8. Выводы по результатам испытаний:

Испытанные экземпляры Rozet №1 и Rozet №2 действующего макета соответствует требованиям Технического задания к Договору №1895ГС1/26942 от 22.03.2017.

Испытания проводили:

Генеральный директор

ООО «Розет»

Научный руководитель

канд. тех. наук

Пуляев А.В.
Мисюченко И.



Приложение Т Акт испытаний

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Розет»

«___» _____ 2018 г.
Пуляев А.В.



АКТ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ (действующий макет)

от «___» _____ 2018 г.

В соответствии с требованиями Технического задания к Договору №1895ГС1/26942 от 22.03.2017 г.

Комиссия в составе:

Председателя комиссии: Пуляева А.В.

Членов комиссии: Мисюченко И.

«___» _____ 2018 г. провела испытания действующих макетов детектора радона «Розет» (макеты Rozet №1 и Rozet №2), разработанных ООО «Розет» в соответствии с Договором №1895ГС1/26942 от 22.03.2017 г. и с Техническим заданием (ТЗ).

Испытания проводились в помещении ООО «Розет», по адресу г. Санкт-Петербург, пр. Тореза, д. 33 литера А, пом. 15-Н.

1. Объект испытаний

1.1. Объектом испытаний являются действующие макеты детектора радона «Розет» (макет №1 и №2), разработанные ООО «Розет» в соответствии с Договором №1895ГС1/26942 от 22.03.2017 г. и с Техническим заданием (ТЗ)..

1.2. Объект испытаний представлен на испытания в следующем составе:

- 1.2.1. Детекторы радона «Розет» (макет №1, макет №2);
- 1.2.2. Шнуры сетевые;
- 1.2.3. Упаковка транспортная.

1.3. Для проведения испытаний Исполнителем представлена следующая организационно-методическая документация:

1.3.1. ТЗ на разработку **детектора радона «Розет»**.

1.3.2. Проектная документация;

2. Цель испытаний

2.1. Целью испытаний являлась проверка разработанных технических решений, реализованных в **детекторе радона «Розет»**, путем проверки соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ.

3. Результаты испытаний

3.1. Испытания действующего макета **детектора радона «Розет»** показали его работоспособность.

3.2. При испытаниях установлено, что **детектор радона «Розет»** соответствует требованиям ТЗ и может быть рекомендован к внедрению.

4. Рекомендации комиссии

Комиссия рекомендует действующий макет детектора радона «Розет» к внедрению в производство и коммерциализацию.

Члены комиссии:



Пуляев А.В.



Мисюченко И.