

Министерство просвещения ЭССР
ТАРТУСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 654.9

537.56

№ гос. регистрации 0187.0031122

Инв. №

УТВЕРЖАЮ
Проректор по науке ТУ
проф. *А. Н. Калликорм*
"13" апреля 1990 г.



РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ САМОБУЧАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАНДАРТНЫХ СИТУАЦИЙ
ПО СИГНАЛАМ ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

(заключительный отчет)

Тема А-86/22

Научный руководитель

д. ф.-м. н., проф.

Х.Ф. Таммет

Х.Ф. Таммет

"13" апреля 1990 г.

Ответственный исполнитель

к. ф.-м. н., доц.

Э.И. Тамм

Э.И. Тамм

"13" апреля 1990 г.

Декан физ.-хим. факультета

к. ф.-м. н., доц.

Х.И. Воолайд

Х.И. Воолайд

"13" апреля 1990 г.

Тарту 1990

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

1. Бернотас Т.П., электрик-слесарь (разработка и монтаж электронных схем контроллера).
2. Вельдре К.-С.Р., рабочая (оформление документов).
3. Ихер Х.Р., н.с. (выполнение фоновых наблюдений).
4. Капанен И.А., инж. (оформление чертежей).
5. Кикас Ю.Э., н.с. (аэрозольные измерения и анализ).
6. Когер Т.Э., токарь (изготовление деталей макета).
7. Лангус Л.Э., м.н.с. (проведение экспериментов).
8. Яаук О.А., н.с. (конструирование узлов аппаратуры).
9. Липпинг И.В., слесарь (изготовление узлов аппаратуры).
10. Лутс А.М., м.н.с. (расчеты структуры аэроионов и разработка программ).
11. Маасепп Я.Х., электрик-слесарь (обслуживание аппаратуры).
12. Матизен Р.Л., с.н.с. (расчет и проектирование надежности).
13. Миллер Ф.Г., н.с. (конструирование электрометрической аппаратуры).
14. Мирме А.А., с.н.с. (проектирование аппаратуры и аэрозольные измерения).
15. Ноппель М.Г., н.с. (теоретические расчеты и разработка программ).
16. Партс Т.М., зав. лаб. (исследование легких аэроионов).
17. Рейнарт А.Э., м.н.с. (разработка контроллера и его программного обеспечения).
18. Сальм Я.Я., в.н.с. (исследование аэроионов).
19. Тамм Э.И., доц. (ответственный исполнитель).
20. Тамме В.Б., н.с. (аэрозольные измерения).
21. Таммет Х.Ф., гл.н.с. (научное руководство работой и разработка алгоритмов).
22. Хыррак У.Э., м.н.с. (анализ фоновых спектров).
23. Ээвель Я.Р., электрик-слесарь (наладивание аппаратуры).
24. Яковска Н.Е., инж. (оформление документов).

РЕФЕРАТ

Объем отчета 139 с., илл. 30, табл. 17, исп. источников 74.
Ключевые слова: самообучающиеся системы, идентификация, техническая диагностика, специализированные ЭВМ, датчики состояния среды, аэроионы, аэрозоли.

Исследуется методика анализа динамического состояния среды с целью идентификации особых ситуаций, требующих оповещения.

Основная цель работы – создание алгоритма, программы и специализированного контроллера (ЭВМ) со встроенным интерфейсом для набора датчиков, способных идентифицировать наступление нестандартной ситуации в условиях недостаточной априорной определенности модели поведения набора сигналов датчиков. Дополнительные цели – разработка вспомогательной аппаратуры и изучение стандартного аэроионного и аэрозольного режимов воздуха.

В результате работы разработан новый самообучающийся алгоритм идентификации нестандартных ситуаций, обладающий повышенной вычислительной эффективностью по сравнению с известными, создан новый специальный контроллер-ЭВМ и программы для реализации этого алгоритма, разработаны устройство сопряжения аэрозольного спектрометра с ЭВМ и датчик отношения подвижностей легких аэроионов. Накоплен и проанализирован обширный наблюдательный материал, описывающий стандартное аэроионное и аэрозольное состояние воздуха.

Полученные результаты внедрены в исследовательской работе Тартуского университета и рекомендуются для внедрения в ОКР КБ "Салют". Результаты НИР могут быть рекомендованы для использования в системах мониторинга природной среды.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5-9
1. МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАНДАРТНЫХ СИТУАЦИЙ	
1.1. Аппаратное обеспечение	10-11
1.2. Внешнее поведение системы	11-13
1.3. Логическая идентификация нестандартных ситуаций ..	13-15
1.4. Статистическая идентификация нестандартных ситуаций	15-20
1.5. Самообучение при статистической идентификации	20-23
2. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЛЕР	
2.1. Проектирование контроллера	24-25
2.2. Технические характеристики контроллера	25-26
2.3. Устройство и электрическая схема	26-46
2.4. Конструкция макета контроллера	47-47
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
3.1. Структура и инициализация системы программ	48-48
3.2. Программы измерения и обмена данными	48-49
3.3. Программа идентификации нестандартных ситуаций ...	50-62
4. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА	
4.1. Устройство сопряжения аэрозольного спектрометра с ЭВМ "Искра-226/6" УТ-8711	63-72
4.2. Датчик отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов УТ-8805	73-79
5. СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ ЗА АЭРОИОННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХА	
5.1. Аппаратура	80-89
5.2. Программное обеспечение	90-96
5.3. Принципы обработки сигналов спектрометров аэроионов	97-101
6. ХАРАКТЕРИСТИКА АЭРОИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХА	
6.1. Аэроионы и спектр подвижности аэроионов	102-106
6.2. Результаты измерения спектра подвижности аэроионов	107-111
7. ХАРАКТЕРИСТИКА АЭРОЗОЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХА	
7.1. Атмосферные аэрозоли	112-113
7.2. Методы описания аэрозольного состояния воздуха .	113-122
7.3. Аэрозольное состояние приземного атмосферного воздуха	123-133
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	134-139

В В Е Д Е Н И Е

Техническое задание на исследовательскую работу, результаты которой отражены в настоящем отчете, является многоплановым. Может возникнуть впечатление, что рассматриваемые частные проблемы слабосвязаны. С точки зрения технологии научного исследования это действительно так. Однако, в сущности все разделы работы строго подчинены единой задаче – разработке методов и средств идентификации нестандартных ситуаций по параметрам среды.

По параметрам среды могут быть детектированы весьма разные события, требующие принятия экстренных мер. Такими могут быть, например, перегрев компонентов аппаратуры или выделение в воздух вредных газов и аэрозолей. Разные идентифицируемые события могут создать опасность выхода из строя аппаратуры, возникновения пожара, отравления персонала и т.д. В настоящем исследовании проблема идентификации нестандартных ситуаций рассматривается с общей точки зрения, что позволяет использовать результаты для решения разных конкретных задач с учетом любой или всех отмеченных выше в качестве примеров частных факторов и соответствующих практических целей.

Для решения общей задачи необходимо иметь:

- 1) набор датчиков состояния среды, в частности ионных и аэрозольных параметров воздуха;
- 2) статистическую характеристику нормального состояния среды по измеренным параметрам;
- 3) аппаратуру измерения сигналов датчиков и сбора данных;
- 4) методику идентификации нестандартных ситуаций;
- 5) аппаратуру, реализующую эту методику.

Перечисленные пункты определяют весьма общие подзадачи нашей проблемы.

Ниже предполагается, что первая подзадача решена или решается в основном вне рамок настоящего исследования, которое включает разработку только одного конкретного датчика (см. гл.4). В этом датчике используется обнаруженное и описанное ранее /1,2/ явление, что подвижности легких аэроионов изменяются при появлении микропримесей в воздухе, причем положительные и отрицательные аэроионы реагируют на разные примеси и по-разному.

Это явление позволило предложить датчик, выходной сигнал которого зависит от отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов.

Вторая подзадача оказывается исключительно сложной и обширной. В настоящем исследовании конкретно рассматриваются только аэроионный и аэрозольный режимы воздуха. Известны сотни научных публикаций, посвященных исследованию аэроионного и аэрозольного режимов воздуха. Для предварительного ознакомления можно рекомендовать монографию /3/ и сборник /4/. Однако, получаемая из публикаций информация далеко не достаточна для удовлетворительного решения нашей второй подзадачи. При выполнении настоящего исследования были сделаны существенные усилия для получения дополнительной информации путем изучения вариативности аэроионного и аэрозольного состояния атмосферного воздуха, что определяет стандартное состояние воздуха с медико-биологического аспекта. При этом были получены также результаты технологического значения. В частности:

- обнаружено, что аэроионы с подвижностью $0,1-0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ имеют особую физическую природу, встречаются в стандартных ситуациях в весьма малых количествах и возникают только в некоторых особых ситуациях в больших количествах,
- найден эффективный способ описания распределения концентрации аэрозольных частиц по размеру при помощи четырехпараметровой модели.

Детальное описание проведенных аэроионных и аэрозольных исследований и соответствующих результатов изложено в трех последних главах отчета.

Третья подзадача решается в настоящей работе совместно с пятой.

Четвертая подзадача в наибольшей мере поддерживается общеизвестными теоретическими результатами. Задача идентификации принадлежности состояния стохастической системы к тому или иному стандартному распределению, а также задача эмпирического моделирования распределения, являются основными задачами математической статистики. Изложение общих основ соответствующей теории можно найти в классических (см., например /5/) и специальных (см., например /6/) монографиях.

Классические методы идентификации нестандартных ситуаций применимы при условии, что статистическая модель стандартной ситуации заранее известна. Поскольку в практике это условие почти никогда не выполнено, то определенные усилия должны быть приложены к построению конкретной модели. В случае стационарной стандартной ситуации эта задача решается методами классической математической статистики. В случае применения, на которое ориентировано настоящее исследование, таким образом удастся создать только некоторую исходную априорную модель. Главы 6 и 7 настоящего отчета являются именно этапами на данном пути. Однако ограничение исходной стационарной моделью означало бы существенную и притом неконтролируемую потерю чувствительности устройства автоматического реагирования на нестандартные ситуации.

Современная теория идентификации состояний систем развивается по пути построения адаптивных и самообучающихся алгоритмов, постоянно изучающих поведение системы и уточняющих ее статистическую модель. Некоторый обзор этого направления можно найти в книге /7/. При выборе конкретного метода следует учитывать:

- степень выполнимости предложений, лежащих в основе теории метода;
- реальную обеспеченность информацией о системе;
- сложность реализации метода.

Конкретный анализ показал, что изложенные критерии существенно ограничивают применимость многих теоретически интересных методов. Поэтому в первой главе настоящего отчета построена методика, которая реализует самообучение, но в своих основах опирается на классические схемы математической статистики. Ключом технической реализуемости этого метода является алгоритм пополнения информационной матрицы, опубликованный в работе /8/ и позволяющий редуцировать объем вычислений до приемлемого на практике уровня.

Решения третьей и пятой подзадач отражены в главах 2 и 3 отчета.

Инженерные решения существенно зависят от конкретных условий использования аппаратуры, предусмотренных техническим заданием. Если бы конкретные условия не были бы предписаны, то изложенную в первой главе методику проще всего реализовать с помощью универсальной персональной ЭВМ, снабженной измерительным

контроллером. В том случае инженерная задача редуцировалась бы к разработке только измерительного контроллера, т.е. к решению третьей подзадачи, а пятая подзадача решалась бы путем комплектации аппаратуры и программирования универсальной персональной ЭВМ. Настоящее техническое задание исключает такое решение и в инженерную задачу включается также разработка вычислительного устройства, реализующего основные функции ЭВМ. В настоящей работе вычислительное устройство и измерительный контроллер были разработаны совместно и конструктивно представляют собой единое устройство. Именно это решение привело к объединению третьей и пятой подзадач в настоящем исследовании.

Исходя из требования минимизации потребляемой мощности, что является необходимым условием также для минимизации габаритов и ослабления требований к охлаждению, выгодно использовать в контроллере микросхемы, изготовленные по КМОП-технологии. В номенклатуре отечественных микропроцессоров единственной КМОП микросхемой, удовлетворяющей требованиям вычислительной производительности, является микросхема M1821 BМ85А. Поэтому в первой стадии исследования был разработан проект измерительно-вычислительного контроллера, базирующийся на упомянутом микропроцессоре.

Поскольку заказчик НИР не выполнил предусмотренное договором обязательство поставки микросхем M1821 BМ85А, то первоначальный проект измерительно-вычислительного контроллера не был реализован и в настоящем отчете не описывается.

Во второй стадии исследования был разработан и реализован проект измерительно-вычислительного контроллера на базе микропроцессора общего назначения КР1810 BМ86. Поиск подходящего прототипа контроллера оказался безрезультатным и основой разработки являлись общие принципы построения вычислительных устройств на базе микропроцессоров серии 1810. Результаты разработки отражены во второй главе отчета.

При разработке программного обеспечения измерительно-вычислительного контроллера было учтено обстоятельство, что инженерное решение на базе процессора КР1810 BМ86 может оказаться временным. Это означает требование минимизации машинной зависимости программ. Программное обеспечение состоит из двух частей – программы непосредственного управления измерением и обмена данными, и программы анализа и идентификации

ситуации. Машинно-зависимость программ первой части оказалась настолько сильной, что оформление и анализ алгоритмов на каком-то универсальном языке программирования нецелесообразно. Программа анализа и идентификации ситуации имеет другой характер и в интересах минимизации машинной зависимости она была написана и отлажена на языке Си /9/. Поскольку в распоряжении разработчиков не было компилятора, обеспечивающего достаточно качественный перевод программы в коды процессора, то окончательный перевод был осуществлен вручную. Точнее, вручную программа была переведена на язык Ассемблер, а с Ассемблера автоматически транслирована в код. В третьей главе отчета, где рассмотрено программное обеспечение, изложение ограничивается уровнем языка Си.

1. МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАНДАРТНЫХ СИТУАЦИЙ

1.1. Аппаратное обеспечение

1.1.1. Датчики

Рассмотрим систему, которая содержит N_1 датчиков. Допускается значение N_1 в пределах $1...32$. Конкретные датчики обозначаются их порядковыми номерами $1...N_1$.

Любой датчик может быть действующим, неисправным, выключенным или отключенным. Действующий датчик должен выдать сигнал в виде напряжения относительно массы $0...+5$ В. Сигнал неисправного датчика не может быть регламентирован. Сигнал выключенного или отключенного датчика должен быть нулевым.

Для каждого датчика должно быть задано:

l – минимальное возможное значение сигнала в стандартной ситуации,

u – максимальное возможное значение сигнала в стандартной ситуации,

$d(t)$ – максимальный возможный абсолютный дрейф сигнала за время t в стандартной ситуации (для $t = 10...100$ с).

Параметры l , u и d должны быть заданы так, чтобы вероятность случайного выхода или дрейфа сигнала датчика за эти пределы в стандартной ситуации не превышала бы 1% от допустимой вероятности ложной тревоги в любом интервале времени. Интервал (l, u) или $(-d, d)$ будет рассмотрен как толерантный интервал при логическом анализе сигналов датчиков.

1.1.2. Система опроса

Система опроса должна позволять измерять по требованию процессора сигналы всех датчиков за время, не превышающее 3 с. Результаты в виде отвлеченных чисел должны быть доступны процессору.

1.1.3. Индикаторы

На панели индикации расположены три большие световые индикаторы и 30 малых световых индикаторов.

Большие световые индикаторы имеют следующие цвета и надписи:

- красный индикатор – тревога,
- желтый индикатор – внимание,
- зеленый индикатор – нормально.

Малые световые индикаторы отмечены номерами 1...30, которые соответствуют номерам датчиков.

На панели должен быть объяснительный текст, указывающий, что в ситуации "нормально" индицируются неисправные датчики, а в ситуациях "внимание" и "тревога" индицируются возмущенные датчики.

Параллельно к индикаторам "внимание" и "тревога" включены электрические контакты, выводы которых могут быть использованы для подключения внешних звуковых и световых сигналов, а также для осуществления автоматических аварийных переключений внешнего оборудования.

1.2. Внешнее поведение системы

1.2.1. Поведение в стандартной ситуации

Система выполняет повторяющиеся циклы. Время одного цикла T_0 зафиксировано при установке системы и может иметь значение от 10 до 100 с.

На панели индикации горит индикатор "нормально", а индикатор "внимание" и "тревога" погашены. Включены индикаторы неисправных датчиков.

Система квалифицирует датчики как действующие или неисправные, причем выключенные и отключенные датчики причисляются к неисправным. До первой тревоги все датчики рассматриваются как действующие. В режиме "тревога" датчик может быть переквалифицирован в неисправный. Сигналы датчиков, квалифицированных как неисправные, не учитываются при оценке ситуации, однако они непрерывно изучаются системой. Если сигнал будет вести себя нормально, т.е. не будут нарушены толерантные пределы, оговоренные в п. 1.1, то датчик переквалифицируется в действующий. При этом он первоначально будет рассмотрен как "необученный".

1.2.2. Переход к нестандартной ситуации

Если система идентифицирует нестандартную ситуацию, то индикатор "нормально" отключается и индикаторы датчиков будут показывать возмущенные датчики. При этом учитываются только действующие датчики.

Выход сигнала или дрейфа сигнала действующего датчика за толерантные пределы приводит к немедленному включению режима "тревога" – включаются контакт и индикатор "тревога". После этого соответствующий датчик исключается из набора действующих датчиков и будет рассмотрен как неисправный. Статус действующего датчика может быть восстановлен только после возврата в режим "нормально" на основе изучения поведения сигнала датчика. Отказ действующего датчика приводит к появлению ложной тревоги. Если после такой тревоги датчик не будет заменен или отремонтирован, то он останется в списке неисправных и не будет учтен в дальнейшем.

Статистически идентифицированная нестандартность ситуации может быть квалифицирована как слабая или как сильная. В первом случае включается режим "внимание", во втором случае "тревога".

Не исключается возможность ложного включения режимов "внимание" или "тревога" по причине большой случайной флуктуации набора сигналов датчиков. Средний период случайного включения режима "внимание" обозначается T_1 и средний период случайного включения режима "тревога" T_2 . Эти периоды задаются при установке системы. Они должны быть выбраны достаточно большими. Однако, следует учитывать, что лишнее увеличение периода ложной тревоги сопровождается понижением чувствительности системы к нестандартным ситуациям.

1.2.3. Возвращение к стандартной ситуации

В нестандартной ситуации система настраивается к ускоренному "переобучению". В результате режим "нормально" будет восстановлен и в том случае, когда особенность, вызывающая тревогу, будет сохраняться.

Для того, чтобы не потерять возможность идентификации возмущенных в нестандартной ситуации датчиков в случае слишком быстрого восстановления режима "нормально" введены следующие правила:

– режим "тревога" не может быть снят ранее, чем через предопределенное время T_0 ,

- при снятии режима "тревога" включается режим "внимание",
- режим "внимание" не может быть снят ранее, чем через время T_3 , которое задается при установке системы.

1.3. Логическая идентификация нестандартных ситуаций

1.3.1. Описание сигналов и состояния системы

Обозначим число датчиков N_1 . Сигналы датчиков называются первичными сигналами. Для каждого датчика вычисляется вторичный сигнал, описывающий скорость дрейфа первичного сигнала. Общее количество сигналов будет $N_2 = 2 * N_1$. Расположим все сигналы в N_2 -мерном векторе x , так, что первые N_1 составляющих будут первичные сигналы, а следующие - вторичные сигналы. Определим вторичные сигналы для $i = 1 \dots N_1$, следующим образом

$$x(N_1+i) = x(i) - x_0(i),$$

где $x_0(i)$ - первичный сигнал i -того датчика в предыдущем цикле. $x(i)$ для $i = 1 \dots N_2$ называется сигналом i -того канала.

Состояние системы описывается двумя N_2 -мерными векторами t и d .

Составляющая $t(i)$ указывает условное количество действующих измерений по i -тому каналу. При пуске системы статистическое описание системы датчиков заполняется априорной информацией и все $t(i)$ приравниваются некоторому фиксированному значению t_0 , которое определяет вес априорной информации. Постоянная t_0 задается при установке системы.

Когда датчик признается неисправным, то всем элементам $t(i)$ и $t(N_1+i)$ присваивается значение 0 и условие $t(i)=0$ используется как признак неисправности канала.

Вектор d описывает состояние возмущенности каналов. Для невозмущенного канала $d(i) = 0$, для возмущенного канала - $d(i) > 0$.

Дополнительно вводится скалярный параметр состояния w . Семантика этого параметра:

- $w = 0$ - состояние "нормально",
- $w = 1$ - состояние "внимание",
- $w = 2$ - состояние "тревога".

1.3.2. Принцип логической идентификации нестандартной ситуации

Непосредственно после измерения сигналов датчиков вычисляются вторичные сигналы и проверяются допустимые пределы для всех каналов. Если сигнал выходит из допустимого интервала в случае неисправного канала, то отсюда не вытекает никаких последствий. Если это происходит в случае действующего канала, то объявляется состояние тревоги.

Логическая идентификация плохо использует имеющуюся информацию и не может обеспечить высокую чувствительность системы. Причины следующие:

- при установлении допустимых пределов нет достаточной информации о распределении значений сигнала в реальных условиях и поэтому эти пределы приходится установить "с запасом",
- не учитывается взаимосвязь между сигналами разных датчиков (см. п. 1.4).

Устранение этих недостатков в рамках легко реализуемой чисто логической схемы оказывается невозможным. Кажущиеся простые решения обманчивы. В качестве примера рассмотрим следующее предложение. Выбираем число $M \approx T_2/T_0$ (см. пп.1.2., 1.2.), регистрируем в ходе эксплуатации системы реальные экстремальные значения сигнала за M циклов и устанавливаем затем эмпирические допустимые пределы, равные этим значениям. Если бы ряд последовательных значений сигнала оказался бы нескоррелированным, то это предположение позволило бы устранить первый из указанных выше недостатков. Однако в практике последовательные значения сигнала почти всегда скоррелированы. В крайнем случае сигнал медленно дрейфует в одну сторону и одно из экстремальных значений в каждом цикле обновляется. В случае принятия описанного предложения уже первый новый цикл после установления эмпирических допустимых пределов привел бы к нарушению этих пределов и тем самым к ложной тревоге.

1.3.3. Преобразование состояния системы

На уровне логического анализа преобразование состояния осуществляется поканально. Независимо от состояния канала проверяется вхождение сигнала $x(i)$ в толерантные пределы $[1, u]$. Выполняемые действия описаны ниже в таблице:

Условия	Действия
$x(i) \notin [1, u], t(i) = 0$	-
$x(i) \notin [1, u], t(i) > 0$	$t(i) = 0, d(i) = 1, w = 2$
$x(i) \in [1, u], t(i) = 0$	$t(i) = t_0$, установка априорных параметров сигнала
$x(i) \in [1, u], t(i) > 0$	если $t(i) < t_{\max}$, то $t(i) = t(i) + 1$

В изложенных правилах встречается постоянная t_{\max} , значение которой задается при установке системы. t_{\max} определяет длительность периода безусловного обучения равной $t_{\max} * T_0$. При обновлении статистической информации вес каждого нового измерения равен $1/t(i)$. При $t < t_{\max}$ обновление сводится к равномерному усреднению, а при $t > t_{\max}$ усреднению с постепенным сбросом старой информации.

1.4. Статистическая идентификация нестандартных ситуаций

1.4.1. Упрощенная покоординатная идентификация

Допустим, что сигналы подчиняются нормальному распределению. Эта гипотеза может быть исследована в ходе работы системы и при необходимости может быть введено такое преобразование шкалы измерения, которое приближает распределение к нормальному.

В результате исследования поведения сигнала определенного канала можно с помощью стандартных статистических методов оценить среднее значение сигнала m и стандартное отклонение s . После этого каждый сигнал непосредственно после измерения может быть стандартизирован преобразованием $y = (x - m)/s$. Стандартизированные сигналы имеют распределение $N(0, 1)$. Вероятность события, что следующий сигнал превышает по абсолютному значению некоторую заданную границу y_0 (событие $|y| > y_0$) равно $q = 2(1 - \Phi(y_0))$, где Φ - интегральная функция нормального распределения. Если событие $|y| > y_0$ будет принято в основу объявления тревоги, то q - вероятность ложной тревоги,

обусловленной случай. Допустимая вероятность ложной тревоги равна $T0/T2$ (см. п.1.2.1., 1.2.2.). Отсюда $y_0 = \Psi(1-(T0/T2)/2)$, где Ψ – обратная функция нормального распределения.

Описанная процедура может быть выполнена самостоятельно для каждого канала.

Недостатки упрощенной процедуры явные. Наиболее существенный недостаток вытекает из игнорирования взаимосвязей между сигналами разных каналов. Сущность этого недостатка иллюстрируется в следующем подпункте. Вторым недостатком заключается в игнорировании возможных расхождений между истинными параметрами распределения и их оценками m и s . Для подавления этого недостатка может быть введено распределение Стьюдента. Поскольку поставленная проблема будет решена в многомерной задаче, одномерный вариант ближе не анализируется. Третий недостаток заключается в игнорировании возможной корреляции последовательных значений сигнала. В настоящей стадии разработки этот недостаток не проанализирован и он не устраняется в дальнейших разделах и алгоритмах.

1.4.2. Необходимость учета корреляции

Рассмотрим систему с двумя датчиками, выдавшими сигналы x_1 и x_2 , дрейф сигналов не изучается. Статистическое распределение наглядно изображается на координатной плоскости (x_1, x_2) , пример показан на рис. 1.1.

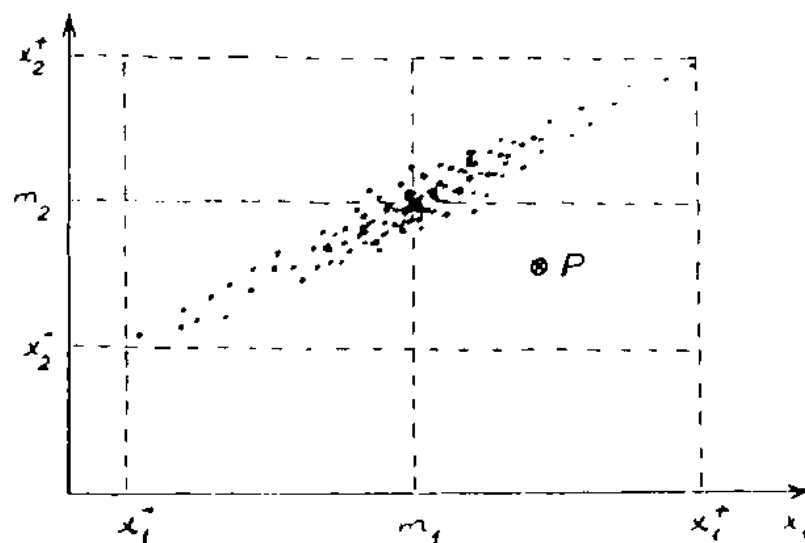


Рис. 1.1. Случайное распределение сигналов двух датчиков.

Точки обозначают конкретные результаты измерения, \bar{x} – среднее значение, x^- и x^+ – статистические толерантные пределы, вычисленные по отдельности для x_1 и x_2 по методике, изложенной в п. 1.4.1.

Если результат нового измерения попадает внутрь прямоугольника, ограниченного линиями x^- и x^+ , то одномерные критерии не дадут основу для объявления тревоги. Высказанное относится, например, к точке P , которая является вполне нормальной как на шкале x_1 , так и на шкале x_2 . Однако, очевидно, что результат P в рассматриваемом примере является вполне достаточной основой для объявления тревоги, что обнаруживается только при изучении совместного распределения сигналов.

При построении оптимального критерия следовало бы заменить прямоугольную критическую область на эллипсоидальную. Для построения такой области необходимо изучить и учитывать корреляцию между сигналами x_1 и x_2 .

Выйгрыш в чувствительности, которая получается в результате учета корреляции, растет с увеличением размерности пространства сигналов. В нашей конкретной задаче размерность может дойти до 64, что подчеркивает необходимость учета корреляции.

Приведенный на рисунке пример полезен еще для интерпретации следующего утверждения, которое необходимо в дальнейшем:

Если использовать методику идентификации, учитывающей корреляции, и заменить все коэффициенты корреляции на нули, то это понизит чувствительность процедуры, но не может повысить вероятность ложной тревоги.

1.4.3. Многомерная идентификация

Основой используемого ниже статистического метода идентификации нестандартных ситуаций является следующее известное утверждение теории вероятностей.

Допустим, что N -мерный вектор x подчиняется многомерному нормальному распределению со средним $m_0 = \bar{x}$ и ковариационной матрицей $C_0 = (x - m_0)(x - m_0)^T$ (в литературе встречаются также термины "матрица рассеивания" и "дисперсионная матрица"). Тогда можно вычислить квадрат расстояния Махаланобиса между конкретной ситуацией x и стандартом m_0 :

$$d_0^2 = (x - m_0)^T C_0^{-1} (x - m_0).$$

Известно, что величина d_0^2 подчиняется распределению χ^2 с N степенями свободы. Для идентификации ситуации следует сравнить d_0^2 с уровнями χ^2 -распределения. Если d_0^2 оказывается невероятно большим, что ситуация квалифицируется как нестандартная и может быть объявлена тревога.

В действительности истинные средняя и ковариационная матрица сигналов неизвестны. Они могут быть заменены выборочными оценками $m = \sum x/n$ и $C = \sum (x-m)(x-m)^T/n$ по n последовательным измерениям. Если при этом сохранить предыдущую процедуру принятия решения, отождествляя m и m_0 , C и C_0 , то совершается такая же ошибка, как в случае использования нормального распределения в одномерной задаче. В случае больших значений n ошибка небольшая и может оказаться допустимой. Однако, хоть для оценки совершаемой ошибки, необходимо ввести уточненную процедуру, учитывающей конечность числа n в действительности.

Уточненную процедуру можно построить на основе распределения T^2 -статистики Хотеллинга. Если C – выборочная ковариационная матрица для x , то по распространенному определению

$$T^2 = (n-1)(m-m_0)^T C^{-1} (m-m_0).$$

T^2 описывает отклонение выборочной средней от истинной. Известно, что величина

$$\frac{n-N}{N(n-1)} T^2$$

подчиняется распределению $F(N, n-N)$ Фишера-Снедекора [5, 10].

Статистика T^2 в оригинальном виде не подходит для решения нашей задачи. Однако, поскольку x не входит в выборку, по которой определяется m , легко можно показать, что ковариационная матрица для разности $(x-m)$ является простым $(n+1)$ -кратным ковариационной матрицы разности $(m-m_0)$. Соответственно T^2 можно заменить на статистику $((n-1)/(n+1))d^2$ и построить дальнейшие рассуждения на утверждении, что статистика

$$f = \frac{(n-N)d^2}{N(n+1)}$$

подчиняется распределению $F(N, n-N)$ /10/.

Приведенное рассуждение все же не позволяет строить вполне точную процедуру решения. Отклонения от последней математической модели возникают вследствие коррелированности наблюдений во времени (по выборке) и по причине специфической особенности нашей задачи, где объем выборки n может оказаться разным для разных сигналов.

Возможный способ приближенного учета неоднородности объема выборки следующий. Вычислим отношение

$$\alpha = \frac{N(n+1)}{n-N} \frac{F_F^{-1}(N, n-N)}{F_{\chi^2}^{-1}(N)},$$

где F_F^{-1} – критическая точка F -распределения и $F_{\chi^2}^{-1}$ – критическая точка χ^2 -распределения на выбранном уровне значимости. Величина α интерпретируется как множитель увеличения критического уровня d^2 при переходе от критерия χ^2 к критерию F . Взамен явного перехода можно скорректировать перед вычислением d^2 все составляющие отклонения $(x-m)$, умножая их на $\alpha^{-1/2}$. Критерий χ^2 относительно скорректированных отклонений дает тот же результат, что критерий F относительно истинных отклонений. Отличие модифицированной процедуры от обычной состоит в том, что коррекцию α можно провести индивидуально по составляющим вектора сигналов, учитывая для каждой составляющей индивидуальный объем наблюдений. Описанный прием не имеет строгого теоретического обоснования и он должен быть рассмотрен, как приближение первого порядка.

Возможный способ приближенного учета автокорреляции сигналов во времени следующий. Автокорреляционные функции по каналам аппроксимируются выражением $\exp(-\Delta n/n_0)$, где Δn – количество циклов между измерениями и n_0 – постоянная канала, определяемая на основе анализа наблюдений. Коррекция в процедуру идентификации ситуации вводится тем, что при определении числа степеней свободы выборочных оценок число наблюдений n заменяется на эффективное число независимых наблюдений $n' \approx n/n_0$.

Использование последнего метода ведет к неоднородности количества степеней свободы по каналам.

1.5. Самообучение при статистической идентификации

1.5.1. Одномерное самообучение

Самообучение означает постоянное изучение поведения сигналов датчиков и введение на основе результатов анализа корректив в информационную базу, которая используется при идентификации стандартности ситуации.

Информационная база состоит из раздела одномерной информации и раздела многомерной информации. Раздел одномерной информации состоит из самостоятельных подразделов для каждого канала.

В практике реализована минимальная информационная база одного канала, которая состоит из трех чисел:

- n – количество действительных измерений.
- m – оценка среднего значения,
- s – оценка стандартного отклонения.

При расширении информационная база дополняется числами, описывающими высшие моменты распределения, масштаб автокорреляции и т. д.

Простейший алгоритм самообучения по одному каналу сводится к элементарной стандартной процедуре математической статистики. В начале работы $n = 0$, m и s не определены. Априорная информация не используется. После каждого цикла измерения вычисляются $n = n + 1$, $m = \sum x/n$ и если $n > 1$ то $s = \sqrt{\sum (x-m)^2/n}$ (в интересах многомерной идентификации рационально использовать выборочную дисперсию, хотя это смещенная оценка). Эта процедура может быть технически рационализирована следующим образом:

Начальная установка: $n, m, s^2 = 0$,

Шаг после измерения: $n_1 = n + 1$

$$m = (nm+x)/n_1$$

$$s^2 = s^2 + x^2$$

$$\text{если } n > 0, \text{ то } s = \sqrt{s^2/n_1 - m^2}$$

$$n = n_1.$$

Описанный алгоритм предусмотрен для стандартной ситуации. В особых условиях он может быть прерван, причем для особого канала может быть выполнена новая начальная установка.

Первым этапом усовершенствования описанного алгоритма является ввод априорной информации. Пусть заданы предполагаемые среднее значение μ_0 и стандартное отклонение σ_0 сигнала x , причем ошибка задания среднего значения описывается оценкой соответствующего стандартного отклонения от действительного среднего значения σ_μ . Эта информация вводится при начальной установке следующим образом:

$$n = \text{округленное значение } (\sigma_0^2 / \sigma_\mu^2),$$

$$m = \mu_0,$$

$$s_2 = n \mu_0^2 + (n-1) \sigma_0^2.$$

Алгоритм шага, приведенный выше, не изменяется.

На втором этапе усовершенствования следует принимать во внимание нестационарный характер случайных процессов в широком масштабе времени. Игнорирование нестационарности в вышеприведенном алгоритме приводит к тому, что при увеличении n вначале чувствительность идентификации возрастает и вероятность ложной тревоги сохраняется на предусмотренном уровне, а начиная с какого-то значения вероятность ложной тревоги будет быстро расти. Это вытекает из постепенного увеличения интервала между средней точкой периода усреднения и текущим моментом.

Простейший способ подавления описанного вредного явления заключается в ограничении периода усреднения.

Способ ограничения учетного периода фиксированным количеством n_{\max} циклов оказывается технически невыгодным, поскольку при этом необходимо постоянно хранить в памяти все n_{\max} предыдущие наблюдения. Технически выгодно ограничить период так, чтобы вес сигналов в статистических оценках с удалением во времени постепенно снижался. Для этого достаточно опустить после достижения определенного значения n последнюю операцию в алгоритме шага, представленном выше. Если максимальное значение n равно n_0 , то веса будут снижаться как геометрическая прогрессия с множителем $n_0/(n_0+1)$. Это может быть аппроксимировано весовой функцией $\exp(-(t-t')/(n_0 T_0))$, где t - текущий момент, t' - момент измерения, T_0 - время одного цикла.

1.5.2. Простое многомерное самообучение

Раздел многомерной информации информационной базы включает оценку ковариационной или корреляционной матрицы сигналов по каналам. Расширение этого раздела не предусматривается.

Поскольку раздел одномерной информации включает оценку дисперсии, то корреляционная матрица является достаточной. Она может быть заменена на любую равносильную матрицу, например, на свою обратную матрицу.

Обычно априорная информация о корреляциях сигналов отсутствует. Тогда начальная установка приравнивает корреляционную матрицу к единичной матрице.

Шаг накопления информации в цикле можно построить в разных вариантах, которые отличаются друг от друга не только в техническом аспекте, а также разной обработкой эффектов второго приближения. Приведем ниже один из возможных алгоритмов, который отличается тем, что значения x перед дальнейшей обработкой стандартизируются на основе предыдущей информации, что упрощает дальнейшие вычисления:

```

для i = 1 то N
    n* = ni + 1
    x = xi - mi
    mi = mi + x/n*
    si = √((nisi2 + x2)/n*)
    xi = x/si
    если n* ≤ n0 то ni = n*
следующий i
для i = 1 то N
    n* = ni
    для j = 1 то N
        n = n*
        если ni < n то n = nj
        Rij = ((n-1)Rij + xixj)/n
    следующий j
следующий i

```

1.5.3. Усовершенствование алгоритма вычисления расстояния Махаланобиса

Обычно требуется проведение анализа информации и принятия решения относительно ситуации после каждого шага накопления информации. Для решения необходимо вычислить расстояние Махаланобиса, а для этого требуются элементы информационной матрицы $A = R^{-1}$. Если используется алгоритм п. 1.5.2 в оригинальном виде, то после каждого шага следует вычислить обратную матрицу. Обращение матрицы размерности 64×64 на восьмиразрядной микропроцессорной машине занимает не менее, чем полчаса времени.

Усовершенствование алгоритма многомерного самообучения сводится к тому, что накопление R или S заменяется на непосредственное накопление элементов обратной матрицы A . Это можно осуществить с помощью алгоритма пополнения Дуайра и Уо /11, 8/.

Если $A = R^{-1}$ и x стандартизован в первой части алгоритма п. 1.5.2, то вторая часть алгоритма записывается так:

```

d2 = 0
для i = 1  то N
    v = 0
    для j = 1  то N
        v = v + Aijxj
    следующий j
    d2 = d2 + vxi
    vi = v
следующий i
для i = 1  то N
    для j = 1  то N
        n = ni
        если nj < n  то n = nj
        Aij = (n/(n-1))(Aij - vivj/((n-1) + d2))
    следующий j
следующий i.

```

В качестве побочного продукта получается значение квадрата расстояния Махаланобиса d^2 .

2. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАНДАРТНЫХ СИТУАЦИЙ

2.1. Проектирование контроллера

2.1.1. Методика проектирования

Исходную позицию разработки определили с одной стороны техническое задание исследовательской работы и с другой стороны необходимость реализации вычислительного метода, изложенного в первой главе настоящего отчета. Упомянутый метод требует вычислительной производительности и объема оперативной памяти, сравнимых с теми же параметрами современных персональных ЭВМ.

Проектирование направлено одновременно на достижение минимальных габаритов, минимальной мощности и максимальной надежности при условии выполнения исходных требований. Задачи обеспечения минимальных габаритов и минимальной потребляемой мощности односторонне направлены, поскольку потребляемая мощность оказывается основным фактором габаритов, которые должны обеспечить рассеивание тепла внутри прибора без локальных перегревов элементов схемы. Также скоррелированы потребляемая мощность и надежность, поскольку оба параметра ухудшаются при увеличении количества микросхем в устройстве.

В первой стадии проектирования был проделан анализ существующей элементной базы, используя кроме общедоступной литературы (например, /12-14/) опыт разработки аналогичной аппаратуры в разных организациях. В результате проведенного анализа в качестве вычислительного элемента контроллера был выбран микропроцессор M1821 BM85A.

2.1.2. Сравнение контроллеров на базе процессора M1821 BM85A и на базе KP1810 BM86

Первый вариант электрической схемы контроллера был разработан на базе микропроцессора M1821 BM85A. Микропроцессор M1821 BM85A представляет собой универсальный однокристалльный 8-разрядный микропроцессор, выполненный в КМОП технологии. Ток потребления этого процессора всего несколько миллиампер даже при максимальной тактовой частоте.

К сожалению, заказчик не мог поставить эти процессоры, как было предусмотрено в договоре, и электрическая схема контроллера была переработана с использованием процессора типа КР1810 ВМ86А.

При этом ухудшались следующие характеристики контроллера.

1. Увеличилось энергопотребление примерно в 1,5 раза, т.к. кроме замены процессора, пришлось еще добавить микросхему генератора тактов КР1810ВМ84А, две микросхемы буфера магистрали данных КР580ВА86 и одну микросхему буфера магистрали адреса К55СНР23.

2. Увеличились габариты (в новой конфигурации пришлось оформить контроллер на одной большой и на трех малых печатных платах, поскольку увеличилось количество микросхем и ширина магистрали данных от 8 битов до 16 битов).

3. С увеличением потребляемой мощности увеличились габариты блока питания примерно в 1,5 раза.

4. Замена процессора М1823 ВМ85А на процессор широкого потребления КР1810 ВМ86А привело к заметному ухудшению надежности контроллера.

При вышеупомянутой замене увеличилась рабочая скорость контроллера примерно в четыре раза (это преимущество несущественно при реализованном алгоритме).

Замена дала возможность использовать для создания и налаживания программ вычислительные машины типов IBM PC, ИСКРА 1030 или ЕС1840.

2.2. Технические характеристики контроллера

2.2.1. Контроллер обеспечивает:

1) опрос до 30 датчиков за цикл, продолжительность которого определяется программно;

2) автоматическую идентификацию подмножества действующих датчиков и настройку на использование сигналов соответствующих каналов в каждом цикле;

3) обновление описания стандартной ситуации за каждый цикл с добавлением информации, полученной в результате анализа конкретной ситуации и постепенным стиранием старой информации;

4) оценку ситуации с учетом расстояния Махаланобиса между векторами конкретной и стандартной ситуаций;

5) в соответствии с табличкой индикаторов и звуковых сигналов "нормально", "внимание" и "тревога" параллельно световым индикаторам и контактом включения внешнего устройства;

6) последовательный обмен данными через интерфейс ИРПС ("токовая петля").

2.2.2. Габаритные размеры контроллера 325x225x65 мм³, масса 2,5 кг.

2.2.3. Питание от источников постоянного тока напряжением 27 В. Потребляемая мощность не более 12 Вт.

2.2.4. Элементная база устройства - интегральные схемы серий: К155, КР580, КР1810, К555, КР1533, К573, К537, К293, К142, дискретные элементы.

2.3. Устройство и электрическая схема

2.3.1. Контроллер оформлен в виде основной платы, к которой присоединены модуль аналого-цифрового преобразования и модуль для последовательного обмена данными через канал ИРПС ("токовая петля"). Блок питания оформлен в виде отдельной платы.

2.3.2. Блок-схема контроллера изображена на рис. 2.1. На основной плате размещены следующие узлы:

1) микропроцессор (CPU) с буферами и демультиплексорами шин адресов и данных;

2) генератор тактов для генерирования необходимых систем тактовых сигналов;

3) оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) до 16 кбайт;

4) постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) до 16 кбайт;

5) разъемы для подключения аналого-цифрового преобразователя, модуля для последовательного обмена данными и модуля светодиодного дисплея.

На основной плате имеются свободные места для подключения 8-уровневого контроллера прерываний и таймера для счета времени при измерениях в реальном масштабе времени.

2.3.3. Электрическая принципиальная схема процессорного модуля изображена на рис. 2.2., рис. 2.3., 2.4., 2.5., спецификация деталей приведена в табл. 2.1.

В контроллере используется высокопроизводительный микропроцессор КР1810 ВМ86А (рис. 2.2, DD1).

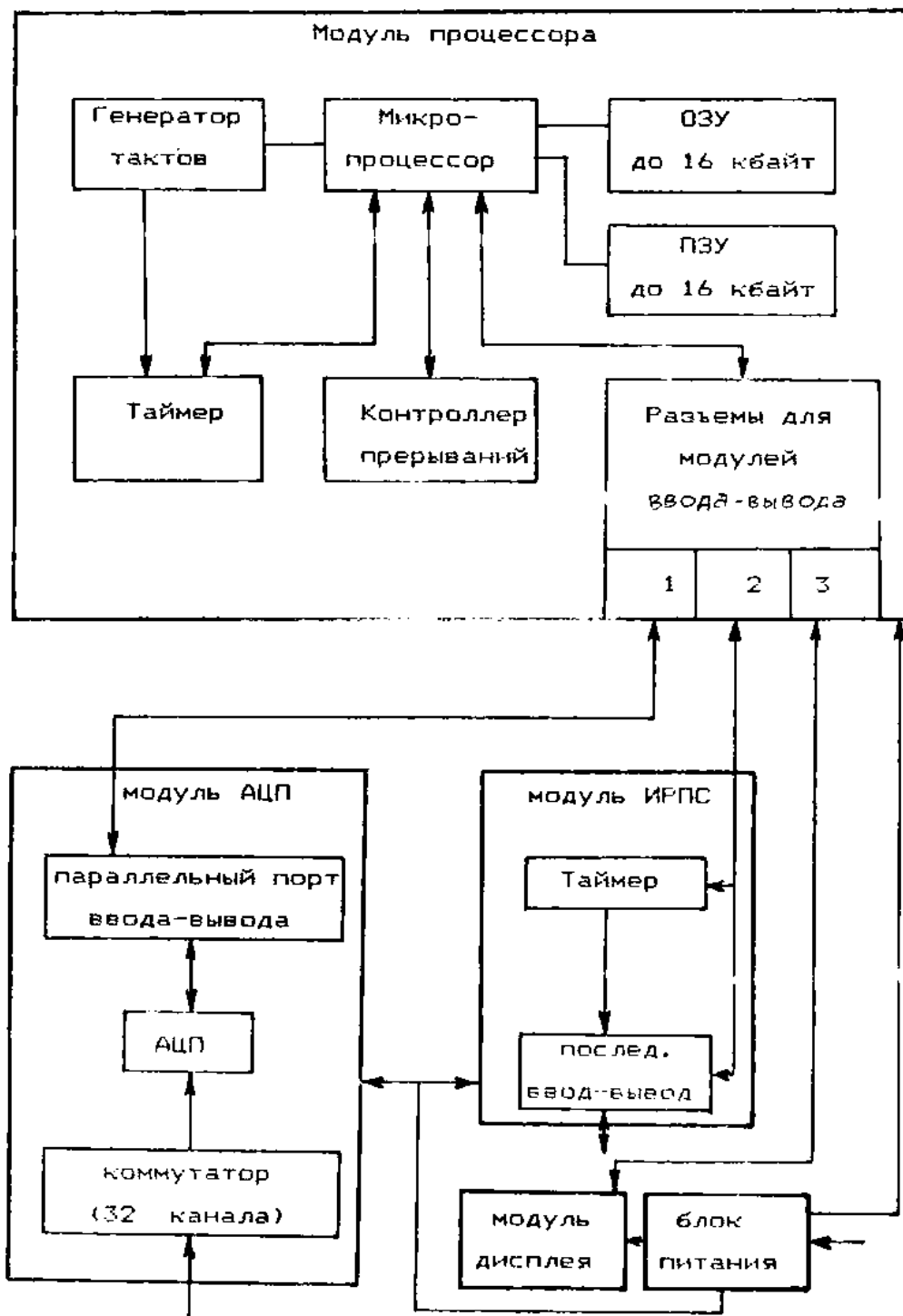


Рис. 2.1. Блок-схема контроллера.

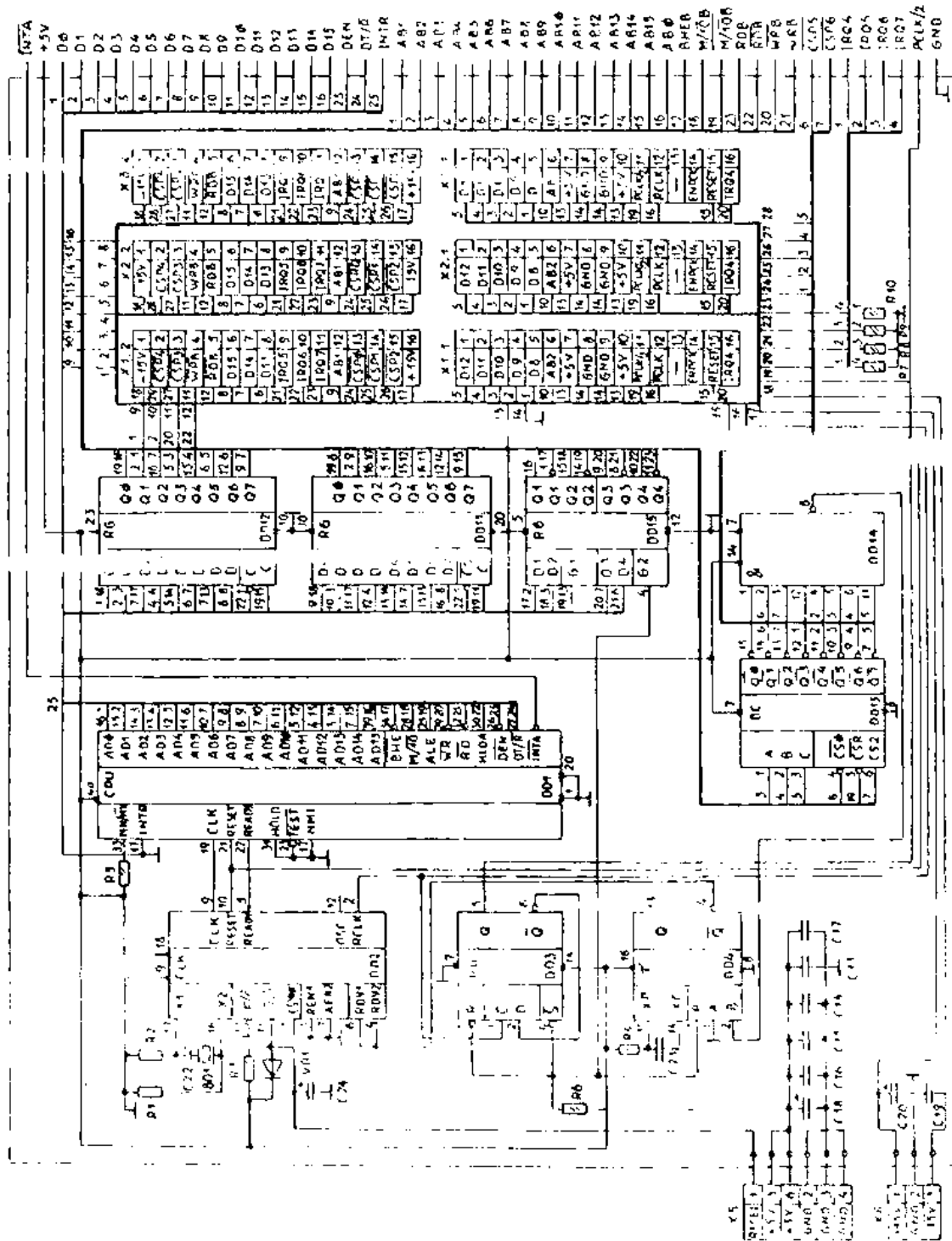


Рис. 2.7. Процессор и модуль. Схемо-электрическая принципиальная схема

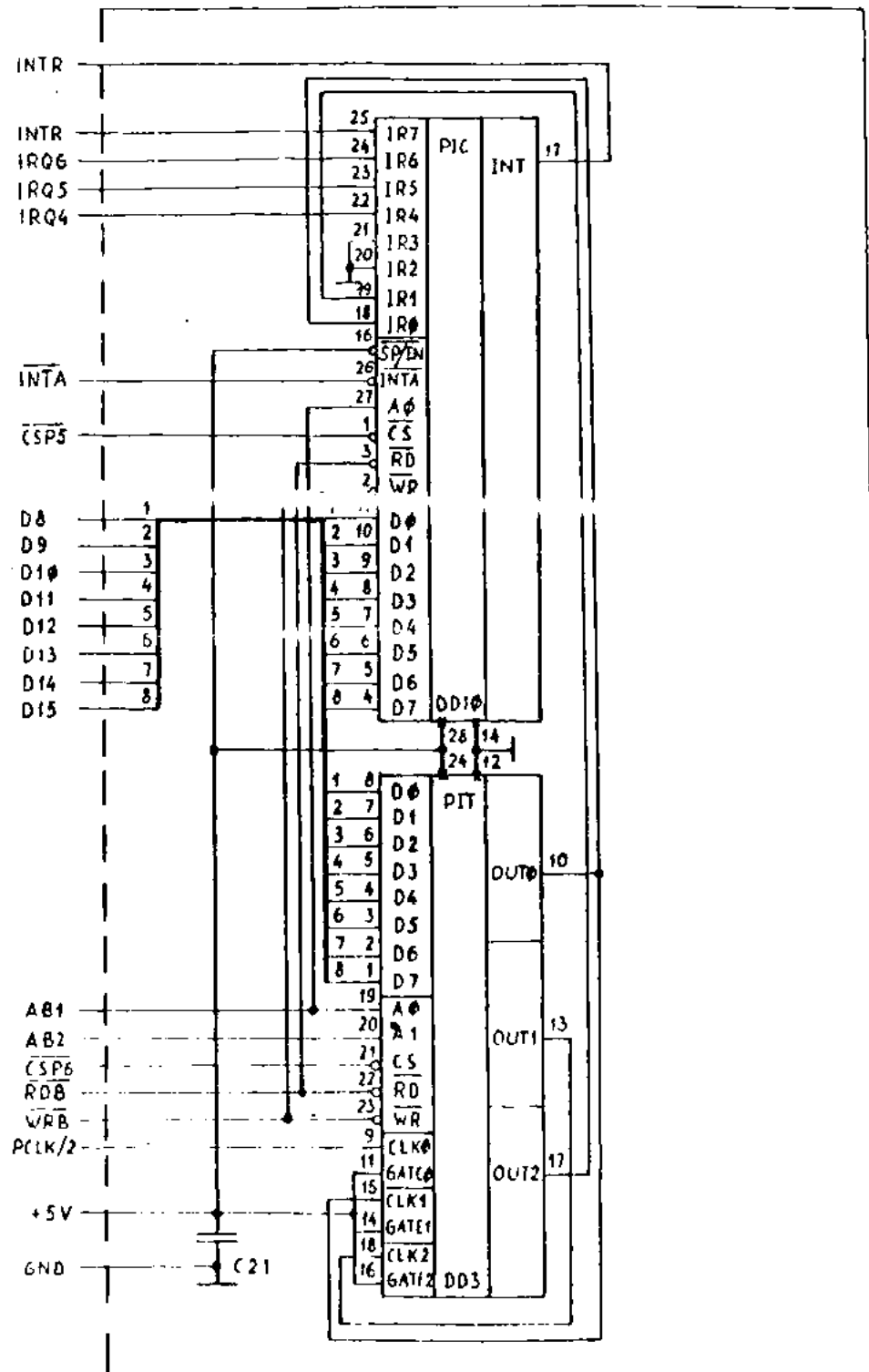


Рис 2 5 Процессорный модуль. (схема электрическая принципиальная (продолжение)).

KP1810 BM86A является 16-разрядным процессором третьего поколения, выполненным в л-МОП технологии, с 16-разрядной внешней магистралью для связи с памятью и устройствами ввода-вывода.

Работа микропроцессора синхронизирована тактовой частотой $f = 4,333$ МГц. Разрядность данных и команд – 8 или 16. Работает процессор в минимальном режиме, что обеспечивается подключением вывода мп/мх к шине +5 В.

Таблица 2.1
Спецификация деталей к рис. 2.2, 2.3, 2.4, 2.5

Позиц. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
Микросхемы			
DD1	KP1810 BM86A	1	Доп. зам. на I8086A
DD2	KP1810ГФРД	1	" " на D8084A
DD3	K555TM2	1	" " на KP1533TM2
DD4	K155AF3	1	
DD5	K155TM7	1	
DD6; DD34	K555ЛЛ1	2	Доп. зам на KP1533ЛЛ1
DD7; DD8	KP580BA86	2	
DD9	KP580BI53	1	
DD10	KP1810BH59A	1	
DD11; DD12	K555IP22	2	
DD13; DD24	K555ИД7	2	Доп. зам. на KP1533ИД7
DD14	K555ЛA2	1	" " на KP1533ЛA2
DD15	K555ЛH1	1	" " на KP1533ЛH1
DD16-DD23	K573PФ2	8	" " на 573PФ2
DD25	K555ИД4	1	" " на KP1533ИД4
DD26-DD33	KP537PY10	8	
Диоды			
VD1	KД503A	1	Доп. зам. на KД521

Позиц. обознач.	Наименование	Кол-во	Примечание

Конденсаторы			
C1; C14			
C16; C21	КМ-6а-Н90-1мкФ	4	
C2-C13;			
C15; C17	КМ-6а-Н90-0,33 мкФ	14	
C19; C20	К53-4-22мкФ+-30%-15В	2	
C18	К53-4 47мкФ: 20% 6В	1	
C22	К10-7В-М750-56пФ	1	
C23	К10-23-М75-91пФ+-20%	1	
C24	К53-4-4,7мкФ+-30%-20В	1	
Резисторы			
R1; R2	МЛТ-0,125 510 Ом	2	
R3	МЛТ-0,125-1 МОм	1	
R4	МЛТ-0,125-11 кОм	1	
R5-R10	МЛТ-0,125-1 кОм	6	
Разъемы			
X1.1-X3.1	Розетка Р6-16	3	
X1.2-X3.2	Розетка Р6-16	3	
X4	Розетка Р6-16	1	
X5; X6	Припаянные провода		

2.3.4. Генератор тактовой частоты DD2 (рис.2.2.) стабилизирован кварцевым резонатором с $f_0=13$ МГц. Соотношение длительности выходного тактового импульса к периоду - 1 к 3, частотой 4,333 МГц (выход 8), на выходе 2 - 2,167 МГц. В схеме генератора включены также схемы формирования сигнала начальной установки "RESET" и схема привязки к такту сигнала готовности "READY" из схем ввода-вывода. Сигнал "READY" в процессор поступает с учетом задержки, выполненной на DD4 (рис.2.2.).

2.3.5. Адресные регистры DD11, DD12 и DD5 (рис. 2.2.) предназначены для демultipлексирования шин "адрес-данные" процессора и запоминания адресов A0...A15 и сигнала \overline{BHE} на время выполнения операции.

Запись адреса в регистры производится по сигналу \overline{ALE} с выхода 5 DD1 (рис. 2.2.). Формирователи шины данных DD7 и DD8 (рис. 2.4.) обеспечивают двухнаправленный обмен данными между процессором и памятью.

2.3.6. ОЗУ выполнено на микросхемах DD26-DD33 (рис. 2.3.) объемом 2 кбайта каждая. Выбор ОЗУ осуществляется при наличии физического адреса от 0000H до 3FFFH на адресной шине. Дешифратор выбора выполнен на микросхеме DD25 (рис. 2.3.). Одновременно можно выбирать 2 кбайта или 4 кбайта из ОЗУ.

2.3.7. ПЗУ выполнено на микросхемах DD16-DD23 (рис. 2.4.) объемом 2 кбайта каждая. Выбор ПЗУ осуществляется при наличии физического адреса от C000H до FFFFH на адресной шине. Информация из ПЗУ всегда выбирается 16-разрядным словом данных, которое записано в паре корпусов, в каждом корпусе пары располагаются только младшие или старшие байты слова. Дешифратор выбора ПЗУ выполнен на микросхеме DD24 (рис. 2.4.)

В ПЗУ записана программа начальной установки (инициализация) системы, программы обмена данными через интерфейс ИРПС, программа управления дисплейного модуля, программа управления АЦП и все программы обработки измеряемых данных и оценки ситуации.

2.3.8. Программируемый контроллер прерываний DD10 (рис. 2.5) предназначен для формирования запроса прерывания и выдачи в процессор 8-битного номера вектора прерывания при выполнении процессором цикла "INTA". Для контроллера имеется место в основной плате.

2.3.9. Программируемый таймер DD9 (рис. 2.5) состоит из трех независимых программируемых 16-разрядных счетчиков. Синхронизация таймера осуществляется тактовой последовательностью с выхода делителя DD3 (рис. 2.2) с $f = 1,083$ МГц и периодом $T = 923$ нс. Период повторения импульсов на выходе первого счетчика (OUT0) задается числом, записанным в счетчик. Выход первого счетчика соединен с входом второго счетчика и выход второго счетчика с входом третьего счетчика.

Для таймера имеется место в основной плате контроллера.

2.3.10. В основной плате предусмотрены разъемы для подключения:

- 1) аналого-цифрового преобразователя;
- 2) модуля для последовательного обмена данными;
- 3) модуля светодиодного дисплея.

2.3.11. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) осуществляет:

- 1) байтовый обмен информацией с процессором;
- 2) преобразование мгновенных значений сигналов датчиков аналоговой информации в двоичный код.

Технические данные АЦП:

- 1) число двоичных разрядов 10;
- 2) диапазон измеряемых напряжений 0...5 В;
- 3) ошибка преобразования ± 2 младших разрядов;
- 4) младшему разряду соответствует напряжение 5 мВ;
- 5) количество измеряемых каналов до 32;
- 6) выбор каналов произвольный;
- 7) входное сопротивление 1 МОм;
- 8) время преобразования не более 100 мкс.

Аналого-цифровой преобразователь содержит:

- 1) 32-канальный коммутатор аналоговых напряжений DA1-DA4 (рис.2.6), который позволяет подключить любой из этих каналов на вход измерительного усилителя;
- 2) измерительный усилитель DA5 (рис. 2.6) для двухкратного усиления входного напряжения;
- 3) 10-разрядный АЦП DA6 (рис. 2.6) ;
- 4) 24-битовый (три 8-битовые) параллельный порт DD1 (рис. 2.6.), с помощью которого происходит выбор измерительного канала, управление циклом преобразования и ввод выходной информации АЦП в процессор.

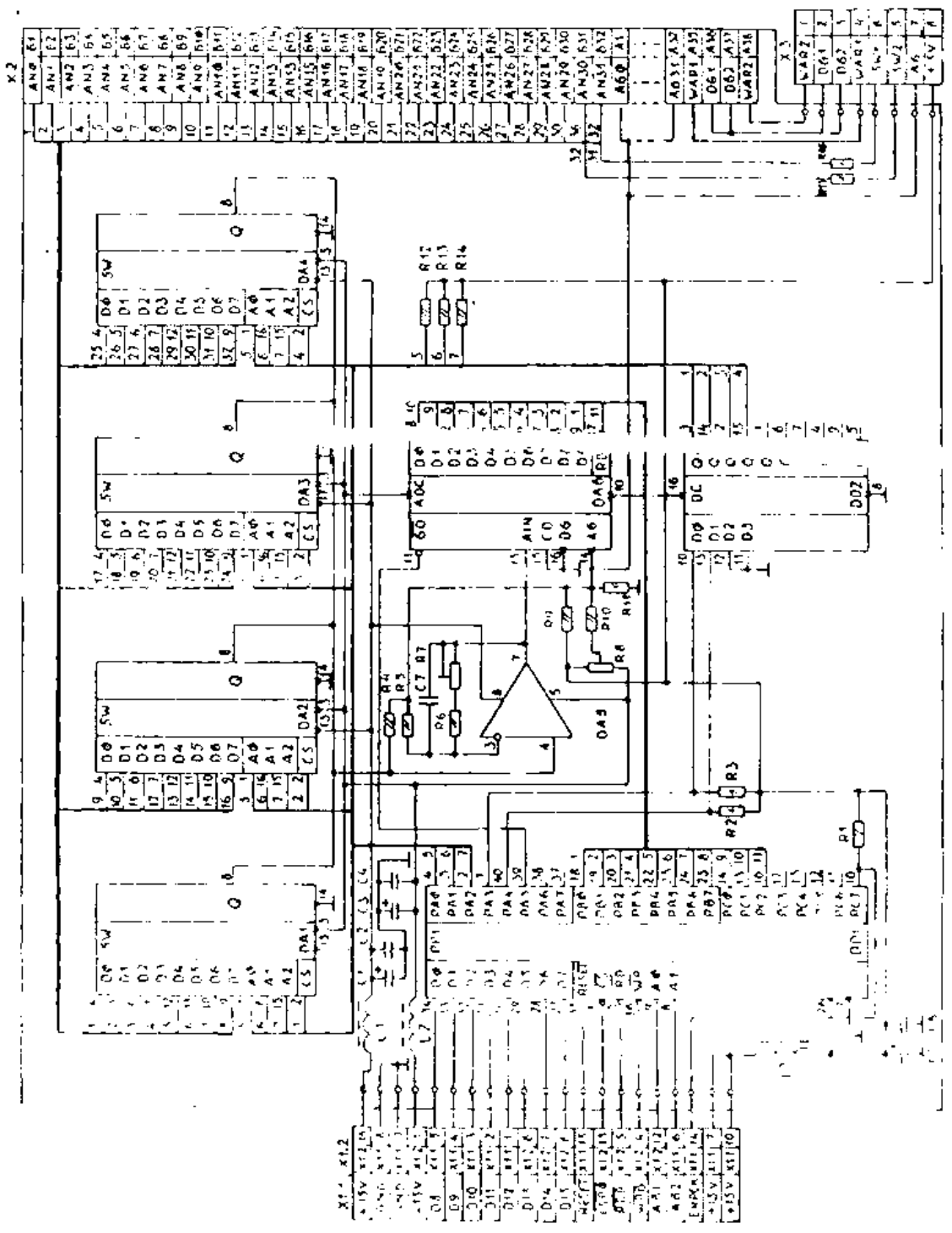


Fig. 2.6. Analog-to-digital converter (8-bit) circuit diagram

Спецификация деталей к рис. 2.6

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
Микросхемы			
DA1-DA4	КР590 КН6	4	
DA5	К140УД17А	1	Доп. зам. на К140УД17Б
DA6	1113ПВ1А	1	
DD1	КР580ВВ55А	1	
Конденсаторы			
C1; C3	К53-4-4,7 мкФ+-30%-20В	2	
C2; C4	КМ-6Б-0,33 мкФ-Н90	2	
C5	К52-1Б-15 мкФ+-10%-6,3В	1	
C6	КМ-6Б-0,33 мкФ-Н90	1	
C7	К10-23-3,9 нФ-МПО	1	
Резисторы			
R1-R3	МЛТ-0,125-10 кОм	3	
R4	С2-29В-1М0м+-1%	1	
R5	С2-29В-10 кОм+-1%	1	
R6	С2-29В-9,1 кОм+-1%	1	
R7	СП5-3-3,3 кОм+-10%	1	
R8	СП5-3-15 кОм+-10%	1	
R9	С2-29В-7,5 кОм+-1%	1	
R10	С2-29В-4,7 кОм+-1%	1	
R11	С2-29В-100 м+-1%	1	
R12-R14	МЛТ-0,125-10 кОм	3	
R15; R16	МЛТ-0,125-10 кОм	2	
Разъемы			
X1,1; X1.2	Вилка В6-16	2	
X2	ГРППМ7-90П-В	1	
X3	Припаянные провода		
Дроссели			
L1-L3	ДМ-0,1-75 мкГн+-5%	3	

2.3.12. Модуль последовательного обмена данными осуществляет:

- 1) байтовый обмен информацией с процессором;
- 2) последовательный обмен данными через канал ИРПС ("токовая петля")

МПО обеспечивает следующие технические параметры при работе по каналам ИРПС:

- 1) прием и передача данных – асинхронная
- 2) скорость передачи данных до 50, 100, 200, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 бит/с – устанавливается программным способом
- 3) дальность передачи – до 100 м
- 4) структура символа:

Число стартовых битов – 1; число информационных битов – 5, 6, 7, 8 – устанавливается программным способом;

Число битов контроля по четности или нечетности – 1 или 0 – устанавливается программным способом;

Число стоп-битов – 1; 1,5; 2 – устанавливается программным способом.

МПО состоит из:

- 1) специальной микросхемы DD1 (рис. 2.7) для реализации протокола последовательного обмена данными и
- 2) таймера DD2 (рис. 2.7) для выбора подходящей для обмена частоты.

2.3.13. Модуль светодиодного дисплея предназначен для индикации состояния каждого из 30 датчиков и имеет 3 отдельных индикатора для индикации состояния "нормально", "внимание" и "тревога".

Электрическая схема дисплейного модуля приведена на рис. 2.8

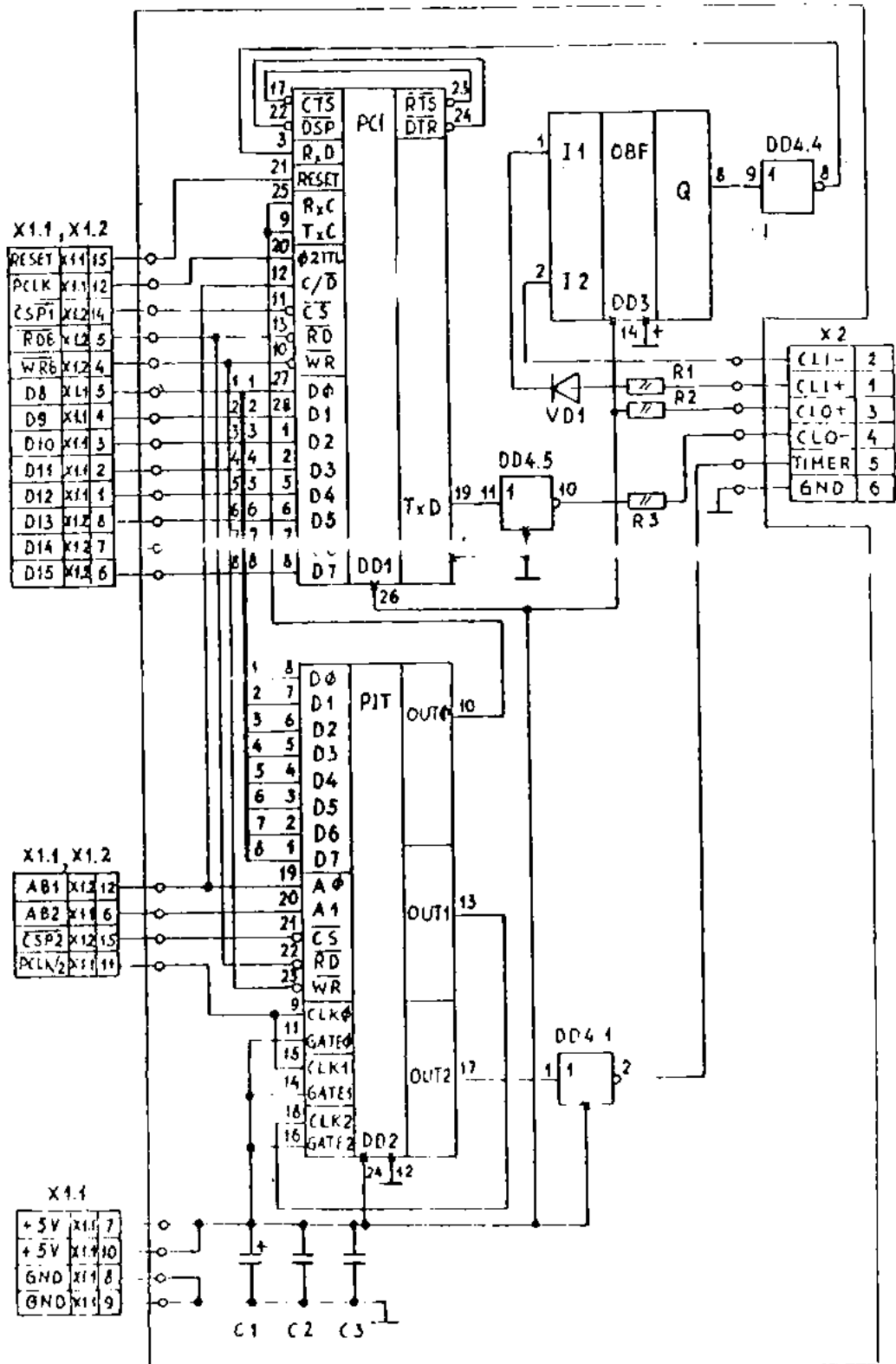


Рис 2.7. Последовательный интерфейс. Схема электрическая принципиальная

Спецификация деталей к рис. 2.7

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
Микросхемы			
DD1	КР580ВВ51А	1	
DD2	КР580ВВ53	1	
DD3	К293ЛП1	1	
DD4	К555ЛН1	1	
Диоды			
VD1	КД522Б	1	
Конденсаторы			
C1	К53-4-10 мкФ-6,3В	1	
C2; C3	КМ-66-0,1 мкФ	2	
Резисторы			
R1; R3	МЛТ-0,125-560м	2	
R2	МЛТ-0,125-100 Ом	1	
Разъемы			
X1.1; X1.2	Вилка В6-16	2	
X2	РС7АТ-В	1	

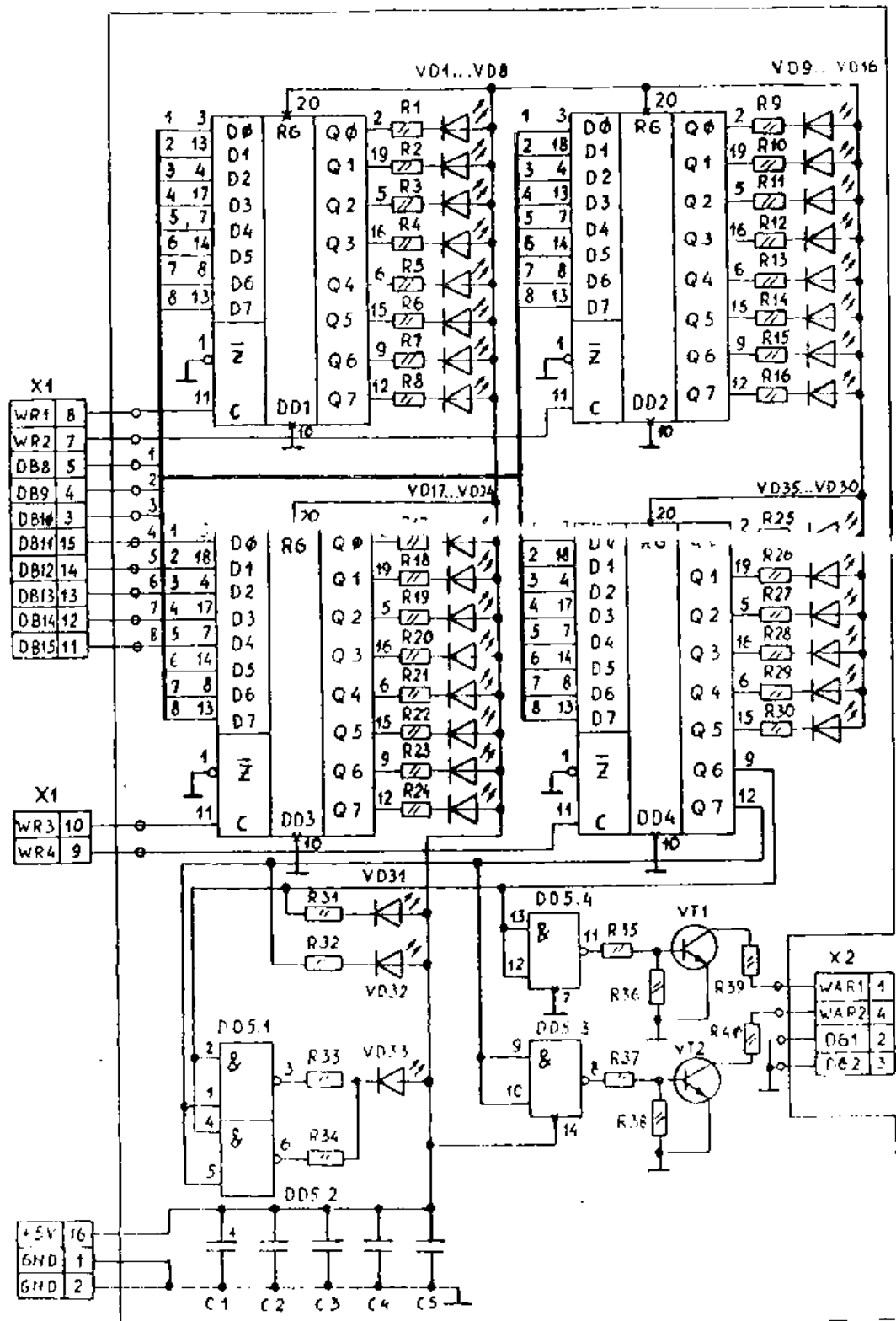


Рис. 28. Дисплейный модуль. Схема электрическая принципиальная.

Таблица 2.7

Спецификация деталей к рис. 2.8

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
Микросхемы			
DD1-DD4	K555 ИР27	4	Доп. зам. на K555ИР23
DD5	K555ЛАЗ	1	
Транзисторы			
VT1; VT2	2Т831А	2	
Диоды			
VD1-VД33	АЛ307БМ	33	
Конденсаторы			
С1	K53-4-4,7 мкФ-20 В	1	
С2-С5	КМ-66-0,1 мкФ	4	
Резисторы			
R1-R32	МЛТ-0,125-240 Ом	32	
R33; R34	МЛТ-0,125-4700м	2	
R35-R38	МЛТ-0,125-10 кОм	4	
R39; R40	МЛТ-0,125-56 Ом	2	
Разъемы			
X1	Вилка В6-16	1	
X2	Припаянные провода		

2.3.14. Блок питания обеспечивает стабильное питание контроллера от источников постоянного тока напряжением 27 ± 7 В при скачках напряжения $\pm 4,5$ В (в пределах 23...34 В) при длительности переднего фронта не менее 1 мс с частотой следования скачков не более 1 раза в минуту. Кпд. 60 – 64 %.

Блок питания содержит:

1) импульсный стабилизатор напряжения с выходным напряжением +5 В и током до 3 А. Стабилизатор имеет защиту от короткого замыкания и перенапряжения;

2) преобразователь напряжения, который служит для преобразования постоянного напряжения +5В в постоянные напряжения +15 В и -15В максимальным током 100 мА.

Электрическая принципиальная схема блока питания (рис.2.9) содержит:

- 1) сетевой фильтр,
- 2) импульсный стабилизатор,
- 3) схему защиты от короткого замыкания,
- 4) схему защиты от перенапряжения,
- 5) преобразователь постоянного напряжения +5В в переменное,
- 6) повышающий трансформатор и выпрямитель,
- 7) выходные фильтры для каждого выходного напряжения.

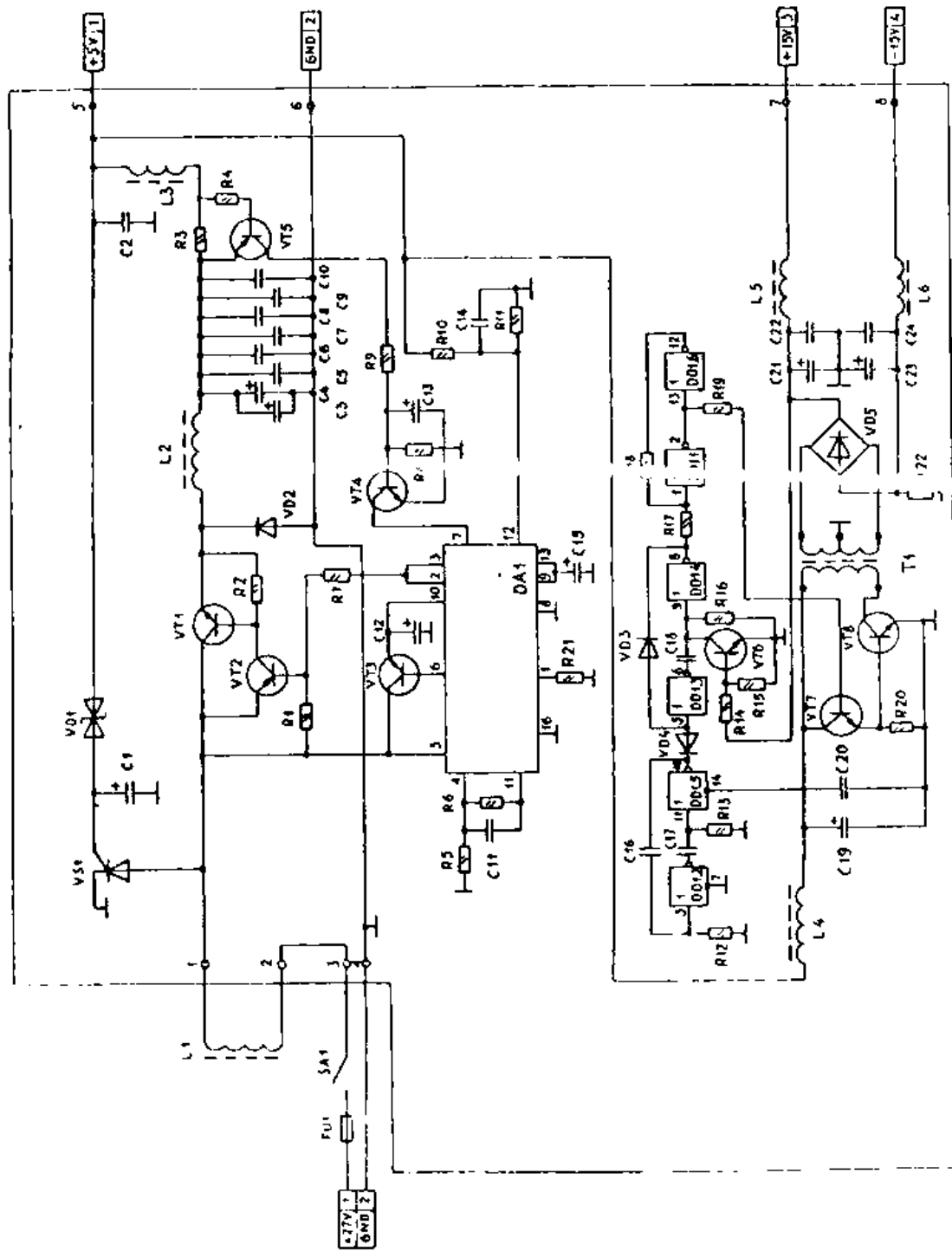


Рис. 2.9 блок лампы. Схема электрическая принципиальная

Таблица 2.10

Спецификация деталей к рис. 2.9

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
Микросхемы			
DA1	K142EP1A	1	
DD1	K155ЛН1		
Транзисторы			
VT1	КТ805Б	1	Доп. зам. на КТ805А
VT2	2Т830А	1	
VT3	2Т831А	1	
VT4, VT6	КТ342Б	2	
VT5	КТ501Д	1	
VT7, VT8	КТ961А	2	
Тиристоры			
VS1	КУ 223 А	1	
Диоды			
VD1	КС162А	1	
VD2	КД213А	1	Доп. зам. на КД2999
VD3; VD4	КД522Б	2	
VD5	КЦ407А	1	
Конденсаторы			
C1	К52-1Б-100мкФ+-20%-16В	1	
C2; C5-C10	К10-9-0,1мкФ-Н90-25В	7	
C3; C4	К50-24-10000мкФ-6,3В	2	
C11; C18	КМ-5а-10нФ	1	
C12; C15	К52-1Б-10мкФ-16В	2	
C13	К53-4-4,7мкФ+-30%-20В	1	
C14	КМ-5б-1,2 нФ	1	
C16; C17	КМ-5а-2,2 нФ	2	
C19	К50-1б-200мкФ-10В	1	
C20; C22; C24	КМ-5б-0,15мкФ	3	
C21; C23	К50-1б-200 мкФ-16В	2	

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание

Резисторы			
R1	МЛТ-0,125-200 Ом	1	
R2	МЛТ-0,125-62 Ом	1	
R3	С5-16МВ-2Вт-0,20м+-1%	1	
R4; R7	МЛТ-0,125-1кОм	2	
R5; R8; R9	МЛТ-0,125-10 кОм	3	
R6	МЛТ-0,125-3кОм	1	
R10	МЛТ-0,125-2кОм	1	Выбираемый
R11	МЛТ-0,125-1,5кОм	1	
R12; R13	МЛТ-0,125-4,7 кОм	2	
R14	МЛТ-0,125-5,1 кОм	1	
R15	МЛТ-0,125-240 Ом	1	Выбираемый
R16; R18	МЛТ-0,125-2,2 кОм	2	
R17	МЛТ-0,125-680 Ом	1	
R19	МЛТ-0,125-2,7 кОм	1	
R20; R21	МЛТ-0,125-300 Ом	2	
R22	МЛТ-0,125-10 кОм	1	
Дроссели			
L1	П-феррит-3000НМС-100вит.	1	специальный
L2	Кольцо альсиферное, 40 вит.	1	" - "
L3	Кольцо ферритовое 28x15x9-		
	М3000 НМ-А -8 витков	1	" - "
L4	ДПМ-0,5-50 мкГн+-5%	1	
L5; L6	ДПМ-0,1-500 мкГн	2	
Трансформаторы			
T1	броневой, 19+2x60 витков	1	специальный
Предохранители			
FU1	Пр2А	1	
Переключатели			
SA1	MT1	1	

2.4. Конструкция макета контроллера

2.4.1. Все узлы электрической схемы контроллера выполнены в виде пяти плат печатного монтажа из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита размерами: 190x195 мм² – модуль процессора, 95x140 мм² – модуль АЦП, 70x80 мм² – модуль последовательного обмена данными, 90x140 мм² – дисплейный модуль, 90x200 мм² – блок питания.

Межплатные соединения выполнены разъемами или отпаянными к соответствующим контактам проводами (см. в спецификациях). Соединения с разъемами сделаны отпаянными проводами.

Блок питания расположен в отдельном отсеке корпуса.

2.4.2. Все платы электрической схемы контроллера расположены в металлическом корпусе внешними размерами 312x204x52 мм³. Корпус изготовлен из листового алюминия толщиной 2 мм. Дно и крышку корпуса контроллера можно при необходимости открутить. По всем платам покрытия корпуса просверлены отверстия для обеспечения охлаждения элементов схемы при работе.

2.4.3. На передней панели корпуса расположены: разъем для подключения датчиков и дополнительных сигнализирующих устройств, а также два переключателя, помогающие идентифицировать ситуации.

На задней панели корпуса расположены разъем для подключения кабеля ИРПС и переключатель начального запуска.

На правой боковой панели расположены: выключатель сети (27 В), разъем для подключения сетевого кабеля и гнездо сетевого предохранителя.

На крыше корпуса расположен светодиодный дисплей.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЛЕРА

3.1. Структура и инициализация системы программ

При создании системы программ использовались языки программирования Ассемблер и Си /9/, и учитывались общие рекомендации к программированию микропроцессора 8086, изложенные, например, в книге /15/.

В ПЗУ контроллера записаны программы для инициализации системы, управляющие программы для АЦП, светодиодного дисплея и телекоммуникационного интерфейса, а также основная программа идентификации нестандартных ситуаций. Все программы для ПЗУ были в конечном виде написаны на языке Ассемблер.

Инициализация системы совершается каждый раз после включения питания или после нажатия на соответствующую кнопку на задней панели контроллера. В ходе инициализации программируются все микросхемы ввода-вывода и организуется нужное распределение памяти.

3.2. Программы измерения и обмена данными

3.2.1. Программа измерения

Программы для управления аналого-цифровым преобразованием и для управления светодиодным дисплеем оформлены как прерывающие программы (используются программные прерывания). Для измерения с помощью АЦП в регистр AL процессора записывается номер измеряемого канала и в регистр AH – режим измерения; после возврата из прерывания в регистре AX процессора расположено измеренное напряжение соответствующего канала в двоичном виде. Для измерения используется прерывание INT5.

Для вывода информации на светодиодный дисплей используется программное прерывание INT6. При обращении к прерыванию в регистрах процессора AX и BX должна находиться передаваемая к светодиодам информация (для каждого диода один бит). В регистре AX находится информация о состоянии 16 младших каналов и в регистре BX информация о состоянии 16 старших каналов.

3.2.2. Обмен данными

Телекоммуникационный интерфейс (ИРПС) программируется для последовательного обмена данными со скоростью 600 битов в секунду, с одним стоп-битом, передаваемое слово 8 битов, контроль паритета не используется.

Приведем в качестве примера подпрограммы ввода-вывода, написанные на языке Ассемблер.

Подпрограмма ввода одного символа из телекоммуникационного интерфейса:

```

BAIT_IN: MOV DX, TEL_JS
          IN  AL, DX
          TEST AL, 2
          JZ  BAIT_IN
          DEC DX
          DEC DX
          IN  AL, DX
          RET

```

Подпрограмма вывода одного символа в телекоммуникационный интерфейс:

```

BAIT_OUT: MOV DX, TEL_JS
           PUSH AX
           IN  AL, DX
           TEST AL, 1
           JZ  BAIT_OUT
           DEC DX
           DEC DX
           POP AX
           OUT DX, AL
           RET

```

В программе управления телекоммуникационным интерфейсом реализованы три управляющие процедуры:

- 1) вывод содержания памяти из контроллера в ЭВМ;
- 2) ввод информации в память контроллера из ЭВМ;
- 3) старт программы с указанного адреса.

3.3. Программа идентификации нестандартных ситуаций

Приводимая ниже версия программы написана с использованием специально ограниченного подмножества языка Си. Ограничение языковых средств служит повышению эффективности объектного кода, получаемого в результате компиляции.

Программа содержит специальные дополнения, необходимые в стадии отладки и убранные перед компилированием рабочей версии программы. В случае настоящей разработки рабочая версия была скомпилирована вручную, используя при этом Ассемблер в качестве орудия.

Программа представляется ниже в виде, пригодном для непосредственной обработки компилятором фирмы LATTICE

```
/* LOGICAL CHART OF PROGRAM:
```

```
Declaration of ROM variables and arrays;
```

```
Declaration of RAM variables and arrays;
```

```
(Declaration and initialization of temporary variables)
```

```
Initialization of RAM variables and arrays;
```

```
experience = 0;
```

```

----> for (i = 0; i < n2; i++) { oldsignal [i] = signal [i];
|           if (i < n1)         oldstatus [i] = status [i]; }
|
|   Measurement of input;
|   training = input [30] < 512 ? 1 : 0;
|   licence  = input [31] < 512 ? 1 : 0;
|   Logical analysis of status and situation;
|   Elaboration of output;
|   if (licence) Display output;
|   Transformation of input to signal;
|   Standardization of signal;
|   if (training && experience) {
|       Renewal of sensor statistics;
|       Renewal of information matrix; }
|   Examination of multivariate information;
|   situation = 0;
|   if (learned) {
|       Computing of Mahalanobis statistic;
|       Testing of situation; }
|   (* situation = 0 - normal,
|       1 - warning,
|       2 - alarm *)
|   experience = 1;
|-----*/

```

```
#include <math.h>
```

```
#include <stdio.h> /* temporary for debug */
```

```

/* DECLARATION OF ROM VARIABLES AND ARRAYS */

int          n1 =    10; /* Number of sensors */
int          n2 =    20; /* 2*n1 */
float maxnumber = 9999; /* Acceptable number of trials */

float gausslevel [2] = {1.28155, 2.32635}; /* (10%, 1%) */
/* Warning and alarm levels for Gauss distribution */

int asymmetry [30] = {
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0 };
/* Labels for statistical asymmetry correction */

int lowalarm [30] = {
    100,100,100,100,100,100,100,100,100,100,100,
    100,100,100,100,100,100,100,100,100,100,
    100,100,100,100,100,100,100,100,100,100 };
int lowwarning [30] = {
    200,200,200,200,200,200,200,200,200,200,200,
    200,200,200,200,200,200,200,200,200,200,
    200,200,200,200,200,200,200,200,200,200 };
int highwarning [30] = {
    800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,
    800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,
    800,800,800,800,800,800,800,800,800,800 };
int highalarm [30] = {
    900,900,900,900,900,900,900,900,900,900,
    900,900,900,900,900,900,900,900,900,900,
    900,900,900,900,900,900,900,900,900,900 };
/* logical test levels for input */

```

```
/* DECLARATION OF RAM VARIABLES AND ARRAYS */
```

```
int    experience, training, vibrator, licence, situation, mark;
int    i, j, k, wa;
float  n, p, q, s, t, x;
float  learned, level;
float  f;          /* Function value */
float  d2, fw, fa; /* Mahalanobis and test levels */

int          input [32];
char         output [32];
char         status [60];
char         oldstatus [30];
float        signal [60];
float        oldsignal [60];
float        number [60];
float        mean [30];
float        sigma [60];
float        autocorrelation [60];
float        v [60];
float        a [1830];
```

```
/* TEMPORARY VARIABLES FOR DEBUG */
```

```
int  r50, variant, n3;
float rnda, rndb;
float  b [21];
float  c [21];
```



```

/* START OF INFINITE LOOP */

for (experience = 0 ;; experience = 1) {
/* The body is written without indent */

/* MEMORIZING OF SIGNAL AND STATUS */

for (i = 0; i < n2; i++) { oldsignal [i] = signal [i];
    if (i < n1)          oldstatus [i] = status [i]; }

/* MEASUREMENT OF INPUT */

/* Values of input [0] ... input [31] in range 0 ... 1023 */

/* Beginning of temporary imitator */
for (i = 0; i < n1; i++) {
    for (j = 0, s = 0; j < 5; j++) {
        s = s + rnda;
        x = rnda; rnda = rnda + rndb; rndb = x;
        if (rnda > 1) rnda--; }
    input [i] = 200 * s; }
input [30] = 0;
input [31] = 0; /* End of imitator */

input [vibrator++] ++;
if (vibrator == n1) vibrator = 0;
if (input [vibrator]) input [vibrator] --;
training = input [30] < 512 ? 1 : 0;
licence = input [31] < 512 ? 1 : 0;

```

```

/* LOGICAL ANALYSIS OF STATUS AND SITUATION */

for (i = 0; i < n1; i++) {
    status [i] = 0;
    if (input [i] < lowwarning [i] ||
        input [i] > highwarning [i]) status [i] = 1;
    if (input [i] < lowalarm [i] ||
        input [i] > highalarm [i]) status [i] = 2;
/* debug' */      if (variant != 1) status [i] = 0;
    status [i + n1] = (status [i] > oldstatus [i]) ?
        status [i] : oldstatus [i];

    if ((situation < status [i]) && (oldstatus [i] < 2))
        situation = status [i];

    if (training && (status [i] == 2)) { number [i] = 1.0;
        number [n1 + i] = 1.0; } }

/* ELABORATION OF OUTPUT */

for (i = 0; i < n1; i++)
    output [i] = ((situation == 0) && (status [i] == 2)) ||
        (situation && status [i] && oldstatus [i] < 2) ? 1 : 0;

for (i = n1; i < 30; i++) output [i] = 0;

if (situation && mark < n2) output [mark % n1] = 1;

output [30] = (situation == 1) ? 1 : 0;
output [31] = (situation == 2) ? 1 : 0;

```



```

if (licence) {          /* DISPLAY OUTPUT */
    /* Temporarily replaced by debugging display */

if (variant) {
    for (i = 0; i < 32; i++) if (output [i]) putchar (X);
                          else          putchar ('.');
    printf ("%4.0f%4.0f%4.0f".d2,sqrt(fw),sqrt(fa));
    /* fw & fa = warning & alarm level of d2*d2 */
    printf ("%4.0f",learned);
    printf ("%4.0f%4d%4.0f%4.0f%4.0f%4.0f%5.0f\n",
        100 * signal [1], status [1], 100 * sigma [1],
        100 * autocorrelation [1], 100 * a[1], 100 * a[2],
        number [1]);
if (situation) {
    for (i = 0; (i < n1) && (i < 10); i++)
        printf ("%5d", input [i]);
        printf ("\n"); }

k = number [1];
if (k % 25 == 5 || d2 < 0) {
    for (i = 0; i < 15; i++) printf ("%5.0f", 100 * a [i]);
        printf ("\n");
    for (i = 0; i < 15; i++) printf ("%5.0f", 100 * c [i]);
        printf ("\n");
    for (i = 0; i < 15; i++) printf ("%5.0f", 100 * b [i]);
        printf ("\n"); }
else {
    if (learned >n1) printf ("%1d", situation);
        else putchar ('.');
if (++r50 == 50) { r50 = 0; printf ("\n"); } }

```

```

/* TRANSFORMATION OF INPUT TO SIGNAL */

for (i = 0; i < n1; i++) {
    k = asymmetry [i]; if (k < 0) k = -k;
    p = input [i]; p = p / 1023;
    if (k) {
        p = (asymmetry [i] > 0) ? 1 + p : 2 - p; q = 2;
        for (j = 0; j < k; j++) { p = p * p; q = q * q; }
        p = (p - 1) / (q - 1); }
    q = sigma [i] * oldsignal [i] + mean [i];
    signal [i] = p;
    signal [i + n1] = p - q; }

/* STANDARDIZATION OF SIGNAL */

for (i = 0; i < n1; i++) signal [i] = signal [i] - mean [i];
for (i = 0; i < n2; i++) signal [i] = signal [i] / sigma [i];

if (training && experience) {

/* RENEWAL OF SENSOR STATISTICS */

for (i = 0; i < n2; i++) {
    if (status [i] == 0) {
        n = number [i]; t = ++ number [i];
        if (t > maxnumber) -- number [i];
        x = signal [i]; s = sigma [i];
        if (i < n1) mean [i] = mean [i] + s * x / t;
        p = (n + x * x) / t;
        q = (1 + p) / 4 + p / (1 + p); /* sqrt (p) */
        sigma [i] = ((q + p / q) / 2) * s;
        autocorrelation [i] =
            (n * autocorrelation [i] + x * oldsignal [i]) / t; }
    if (status [i] == 2 && number [i] > 1) number [i] --; }

```

```

/* RENEWAL OF INFORMATION MATRIX */

for (i = 0, n = 0, t = 0, p = 0; i < n2; i++) {
  for (j = 0, k = (i*(i+1))/2, s = 0; j < n2; j++, k++) {
    if (status [j] == 0) s = s + a [k] * signal [j];
    if (j >= i) k = k + j; }
  v [i] = s;
  if (status [i] == 0) {
    n = n + number [i]; t++;
    p = p + signal [i] * s; } }
if (t) {
  n = n / t; q = (n + 1) / n;
  for (i = 0, k = 0; i < n2; i++) {
    t = v [i] / (n + 1 + p);
    for (j = 0; j <= i; j++, k++)
      a [k] = q * (a [k] - t * v [j]); } }

/* RENEWAL OF COVARIANCE MATRIX AND TEST */
/* debug page! */

if (t) {
  for (i = 0; i < n3; i++)
    for (j = 0; j <= i; j++) {
      k = i * (i + 1) / 2 + j;
      if (status [i] + status [j] == 0)
        c [k] = c [k] + signal [i] * signal [j] / (n + 1);
      c [k] = c [k] / q; } }

for (i = 0; i < n3; i++)
for (j = 0; j <= i; j++) {
  s = 0;
  for (k = 0; k < n3; k++)
    s = s + a [i>k ? i*(i+1)/2 + k : k*(k+1)/2 + i]
      * c [j>k ? j*(j+1)/2 + k : k*(k+1)/2 + j];
  b [i * (i + 1) / 2 + j] = s; } }

```

```

/* ESTIMATION OF EDUCATION LEVEL */

for (i = 0, t = 0, n = 0; i < n2; i++) if (status [i] < 2) {
    x = autocorrelation [i]; if (x < 0) x = -x;
    q = (1 - x) * number [i];
    if (q > n2) { n = n + q; t++; } }
if (t) n = n / t; /* active number */
level = (n > n2 + 2) ? 2.0 + n2 * (2.0 - n2 / n) : maxnumber;

```

```

/* EXAMINATION OF LEARNED SIGNALS */

for (i = 0, learned = 0, p = 0, mark = 77; i < n2; i++) {
    v [i] = 0;
    if (status [i] < 2) {
        x = autocorrelation [i]; if (x < 0) x = -x;
        if ((1 - x) * number [i] > level) {
            v [i] = 1;
            learned++;
            x = signal [i]; if (x < 0) x = -x;
            if (x > p) { p = x; mark = i; } } } }

if (learned <= n1) mark = 77;

/* learned = number of learned signals,
   v [i] = (learned signal) ? 1 : 0 */

/* debug! */ if (variant != 1) mark = 77;

```

```

/* CALCULATION OF TEST LEVELS */

if (learned > n1)
for (i = 0, fw = 0, fa = 0; i < n2; i++)
if (v [i]) {
    x = autocorrelation [i]; if (x < 0) x = -x;
    n = (1 - x) * number [i] - learned;
    for (wa = 0; wa < 2; wa++) {
        q = n + 1 / (n * n) + 1 / (5 + n * learned);
        q = q + 1 / (8 + n / learned);
        p = learned + 2 / (learned * learned) + 5 / (q * learned);
        q = 1 / (q - 1);
        p = 1 / (p - 1);
        x = gausslevel [wa];
        s = (q + p) * (2 + (q + p) * (x * x - 3) / 6);
        for (k = 0, f = 0.1; k < 9; k++) f = (f + s / f) / 2;
        s = f * x + (q - p) * (2 + x * x - 2 * (q + p)) / 3;
        k = 0; f = 1;
        while (s > 1) { s--; k++; }
        if (s > 0.500) { s = s - 0.500; f = f * 1.6847213; }
        if (s > 0.250) { s = s - 0.250; f = f * 1.2840255; }
        if (s > 0.125) { s = s - 0.125; f = f * 1.1331485; }
        f = f * (1 + s*(1 + s*(1 + s*(1 + s/4) / 3) / 2));
        while (k > 0) { f = f * 2.7182818; k--; }
        f = f * (n + learned) / n; f = learned * f * f;
        if (wa == 0) fw = fw + f; else fa = fa + f; }
v [i] = signal [i]; }

```

```

/* COMPUTING AND TEST OF MAHALANOBIS STATISTIC */

for (i = 0, d2 = 0; i < n2; i++)
for (j = 0, k = (i*(i+1))/2; j < n2; j++, k++) {
    d2 = d2 + v[i] * a[k] * v[j];
    if (j >= i) k = k + j; }

        situation = 0;
if (learned > n1) {
    if (d2 * d2 > fw)    situation = 1;
    if (d2 * d2 > fa) { situation = 2;
        if (training && (mark < n2))
            number [mark] = 1; } }

if (situation == 0) mark = 77;

} /* infinite loop */

} /* main () */

```

4. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

4.1. Устройство сопряжения аэрозольного спектрометра с ЭВМ ИСКРА-226/6 УТ-8711

4.1.1. Назначение устройства сопряжения

Устройство сопряжения (УС) аэрозольного спектрометра с ЭВМ типа "Искра-226/6" предназначено для обеспечения возможности подключения аэрозольного спектрометра УТ-8616, предусмотренного для работы на линии с ЭВМ "Электроника ДЗ-28", к ЭВМ типа "Искра-226", исполнение 6.

Устройство предназначено для работы в комплекте с блоком интерфейсным функциональным "ИСКРА 015-83", входящим в комплект ЭВМ "Искра-226", исполнение 6.

Устройство позволяет присоединить к ЭВМ "Искра-226/6" и другие средства, предназначенные для работы на линии с ЭВМ "Электроника ДЗ-28", если они не используют прерывания ЭВМ.

4.1.2. Основные технические характеристики

4.1.2.1. Устройство обеспечивает:

- 1) побайтный обмен информацией с блоком интерфейсным функциональным (БИФ) "ИСКРА 015-83";
- 2) побайтный обмен информацией с электрическим аэрозольным спектрометром (ЭАС) УТ-8616;
- 3) формирование управляющих сигналов для БИФ "ИСКРА 015-83" и ЭАС УТ-8616.

4.1.2.2. Устройство сохраняет все возможности управления и приема информации с ЭАС УТ-8616 при условии замены ЭВМ типа "Электроника ДЗ-28" на ЭВМ "Искра-226", исполнение 6.

4.1.2.3. Габаритные размеры устройства 190x185x65 мм,
масса 1,5 кг.

4.1.2.4. Питание от сети переменного тока 220 В, 50 Гц,
потребляемая мощность не более 12 Вт.

4.1.2.5. Условия работы - лабораторные (III группа по ГОСТ 6763-67).

4.1.3. Принцип работы

Используемые в этом и в следующих пунктах обозначения и сокращения, если они не описаны до использования, описаны в паспорте блока интерфейсного функционального "ИСКРА 015-83".

Устройство сопряжения (ниже УС) совместно с ЭВМ "Искра-226/6", укомплектованной блоком интерфейсным функциональным (БИФ) "Искра 015-83", обеспечивает использование ЭСА УТ-8616 на линии с ЭВМ "Искра 226/6", не ограничивая возможностей ЭСА. Блок-схема УС представлена на рис. 4.1. УС можно условно разделить на 5 субблоков:

- 1) схема синхронизации и управления;
- 2) регистр и буфер адреса;
- 3) регистр и буфер вывода;
- 4) регистр и буфер ввода;
- 5) блок питания.

Обмен информацией между БИФ "Искра 015-83" и УС осуществляется по магистрали так называемого приборного интерфейса (международное обозначение - IEEE 488) побайтно с использованием команд, применяемых в приборном интерфейсе. УС не соответствует стандарту используемого для приборов приборного интерфейса, и поэтому запрещается параллельно с УС включать другие приборы к БИФ "Искра 015-83". Обмен информацией осуществляется по магистрали ввода-вывода УС в соответствии с протоколом обмена информацией ЭВМ "Электроника ДЗ-28".

УС не использует следующих сигналов приборного интерфейса: \overline{IFC} , \overline{EOI} , \overline{SRQ} . Линии этих сигналов электрически не соединены. Сигнал приборного интерфейса \overline{REN} определяет направление передачи информации. При $\overline{REN} = 0$ УС в режиме приема информации от БИФ "Искра 015-83". При $\overline{REN} = 1$ УС в режиме передачи информации к БИФ "Искра 015-83".

Данные, передаваемые в приборном интерфейсе как управляющая информация (интерфейсное сообщение) (см. паспорт БИФ "Искра 015-83") интерпретируются как информация для шины адреса (шины управления) и записываются в адресный регистр УС. (При передаче управляющей информации от БИФ "Искра 015-83" должно быть выполнено условие: $\overline{REN} = 0$).

Данные, передаваемые в приборном интерфейсе от БИФ "Искра 015-83" (приборное сообщение) записываются в регистр вывода УС (должно быть выполнено условие: $\overline{REN} = 0$).

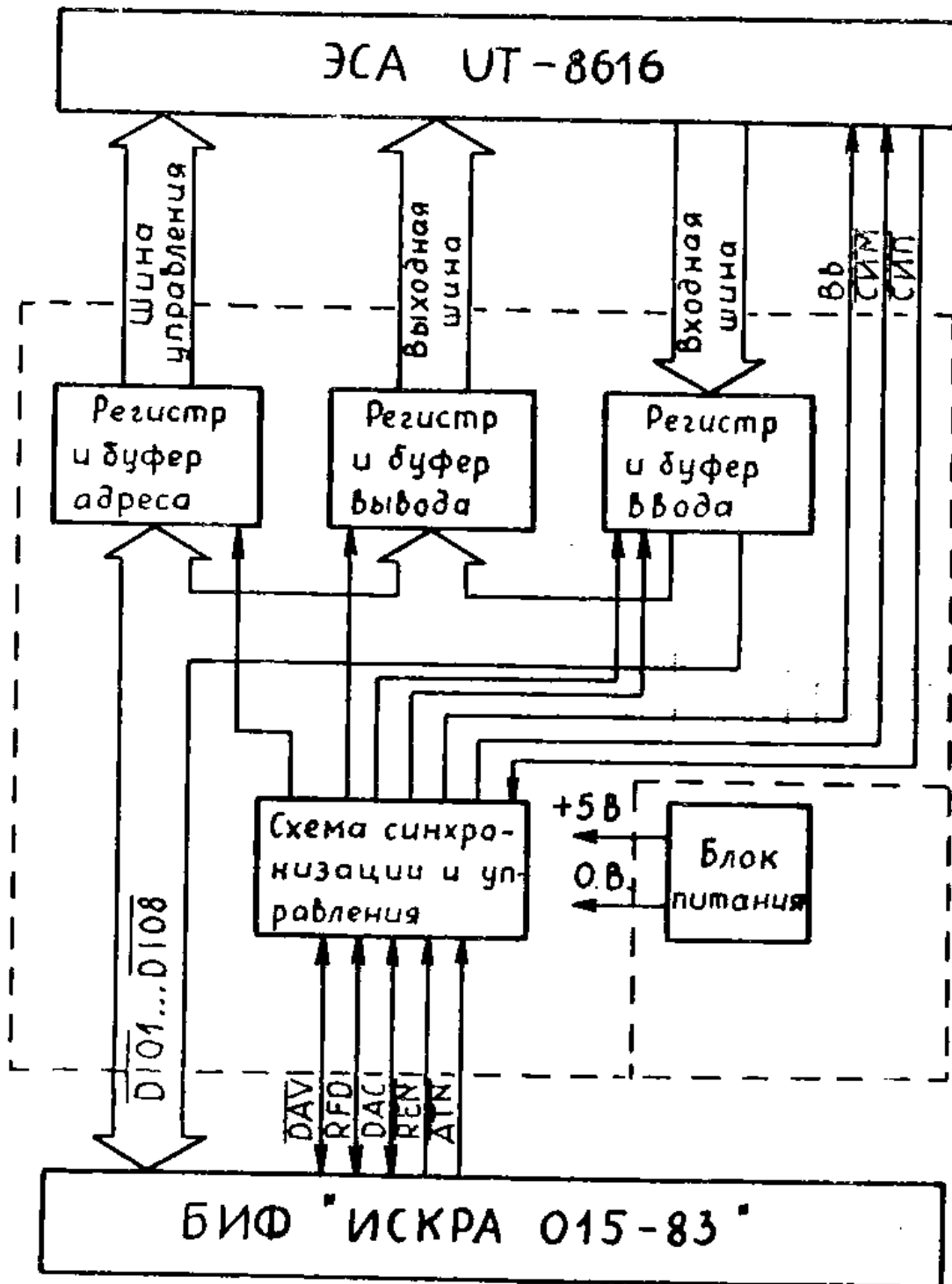


Рис. 4.1. Блок-схема устройства.

Во время передачи информации от УС к БИФ "Искра 015-83" (приборное сообщение) УС передает в магистраль приборного интерфейса содержание регистра ввода (рис. 4.1.) (при приеме информации должно быть выполнено условие: $\overline{REN} = 1$).

Схема синхронизации и управления (рис. 4.1.) синхронизирует асинхронный обмен информацией между УС и БИФ "Искра 015-83" и между ЭСА УТ-8616 и УС.

4.1.4. Электрическая схема

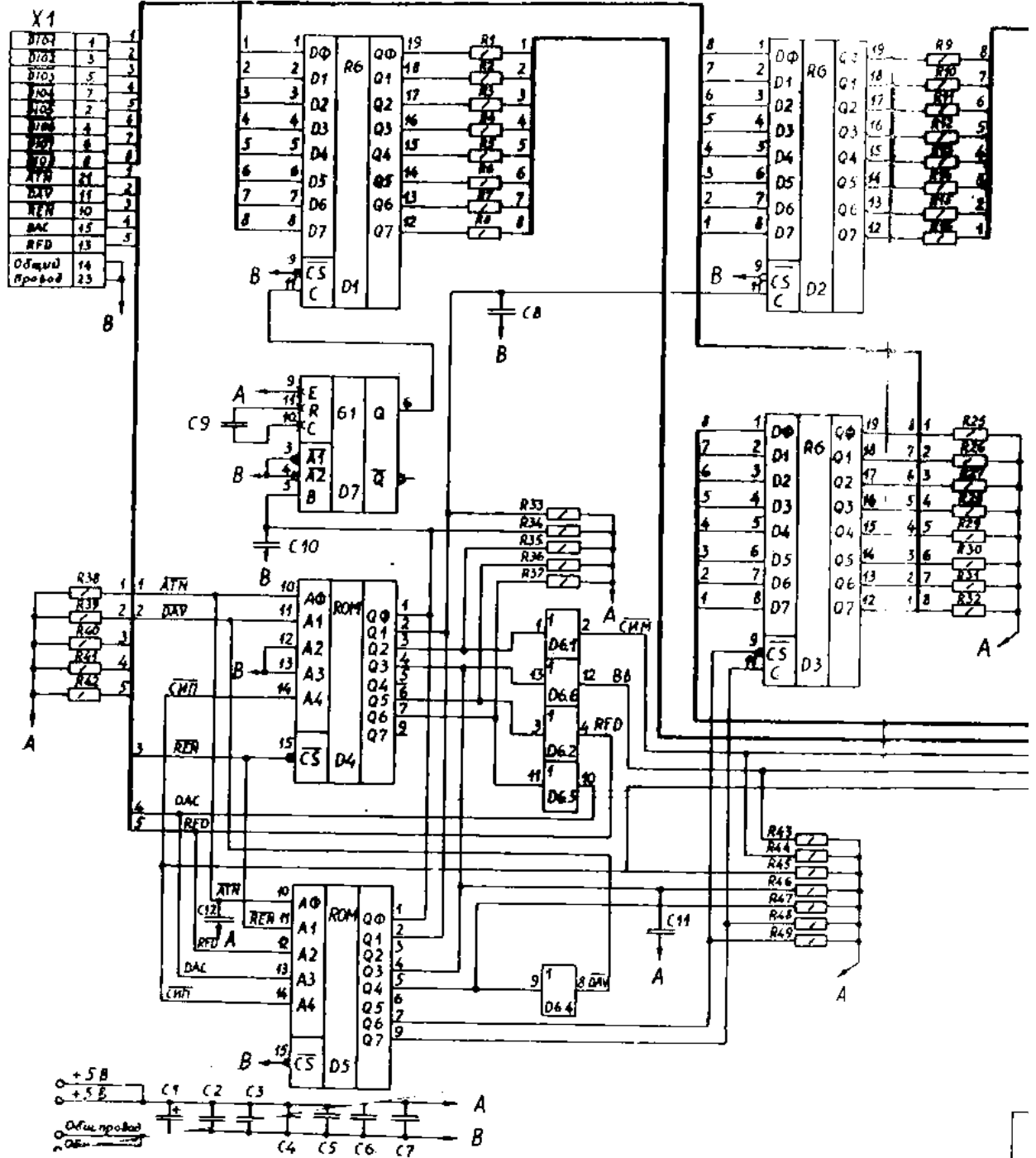
Принципиальная электрическая схема УС и спецификация использованных деталей приведены на рис. 4.2. Схема блока питания изображена отдельно на рис. 4.3.

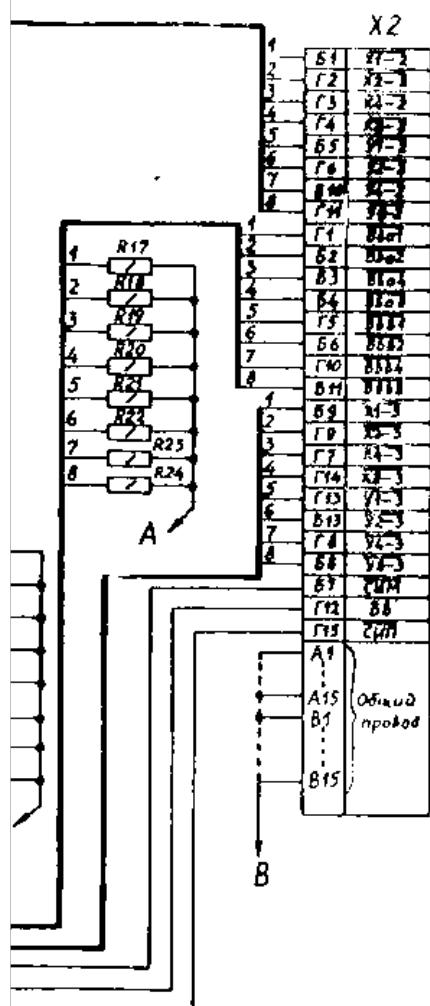
Схема синхронизации и управления (рис. 4.2.) реализована на микросхемах ППЗУ D4, D5, одновибраторе (формирователе импульса) D7 и на буфере управляющих сигналов D6. Все сигналы, управляющие работой и обменом данными формируются микросхемами ППЗУ D4 и D5, запрограммированными заранее согласно табл. 4.1. и табл. 4.2. В таблице 4.1. приведена кодировка ППЗУ D4, в таблице 4.2. - кодировка ППЗУ D5. Микросхема D7 формирует короткий импульс для записи информации в адресном регистре УС. На микросхеме D6 собран буфер для сигналов \overline{SIM} , \overline{Vb} , \overline{RFD} , \overline{DAC} и \overline{DAV} , которые поступают на шину.

Таблица 4.1.

Кодировка ППЗУ D4

Адрес	Данные	Адрес	Данные	Адрес	Данные	Адрес	Данные
HEX	HEX	HEX	HEX	HEX	HEX	HEX	HEX
00	0C	08	00	10	4D	18	00
01	40	09	00	11	02	19	00
02	0C	0A	00	12	2C	1A	00
03	0C	0B	00	13	2C	1B	00
04	00	0C	00	14	00	1C	00
05	00	0D	00	15	00	1D	00
06	00	0E	00	16	00	1E	00
07	00	0F	00	17	00	1F	00





Позиц. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
	Конденсаторы		
C1	K53-4-68-47 мкФ	1	
C2-C7	KM 6-1190-033 мкФ	6	
C8, C12	K10-76-1175-100 пФ ± 20%	2	
C9	K10-76-11500-470 пФ ± 20%	1	
C10, C11	K24-7-1110-330 пФ ± 5%	2	
	Микросхемы		
D1-D3	KD580 ИР82	3	дополнительно-заказ
D4, D5	K155 PE3	2	
D6	K155 AP9	1	
D7	K155 AP1	1	
	Резисторы		
R1-R16	РМТ-025-910 Ω ± 20%	16	
R17-R49	МЛТ-025-43 кОм ± 5%	33	
	Драйверы		
X1	РПМ7-24Ш-ПБ-В	1	
X2	ГРПМ3-62 ГШ02	1	

Дополнительное включение микросхем.

- 7-ой контакт микросхем поз. D6, D7;
8-ой контакт микросхем поз. D4, D5;
10-ый контакт микросхем поз. D1-D3 подключить к шине В (общий провод).
- 14-ый контакт микросхем поз. D6, D7;
16-ый контакт микросхем поз. D4, D5;
20-ый контакт микросхем поз. D1-D3 подключить к шине А (+5В).

Условные сокращения и обозначения

Сокращения и обозначения по описанию

Рис. 4.2
Устройство сопряжения аэрозольного спектрометра с ЭВМ „Искра 226/6“.

Схема электрическая принципиальная

Таблица 4.2.

Кодировка ППЗУ D5.

Адрес HEX	Данные HEX	Адрес HEX	Данные HEX	Адрес HEX	Данные HEX	Адрес HEX	Данные HEX
00	58	08	58	10	59	18	59
01	58	09	58	11	5A	19	5A
02	58	0A	58	12	58	1A	58
03	80	0B	58	13	58	1B	58
04	58	0C	58	14	59	1C	59
05	58	0D	58	15	5A	1D	5A
06	58	0E	58	16	58	1E	58
07	80	0F	58	17	90	1F	58

Регистр и буфер адреса реализованы на микросхеме D1 и резисторах R1...R8, которые защищают от короткого замыкания в шине управления ($\overline{X1-3}$, $\overline{X2-3}$, $\overline{X4-3}$, $\overline{X8-3}$, $\overline{Y1-3}$, $\overline{Y2-3}$, $\overline{Y4-3}$, $\overline{Y8-3}$).

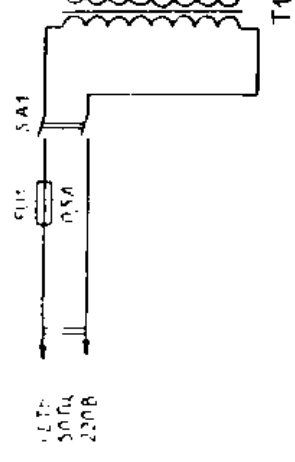
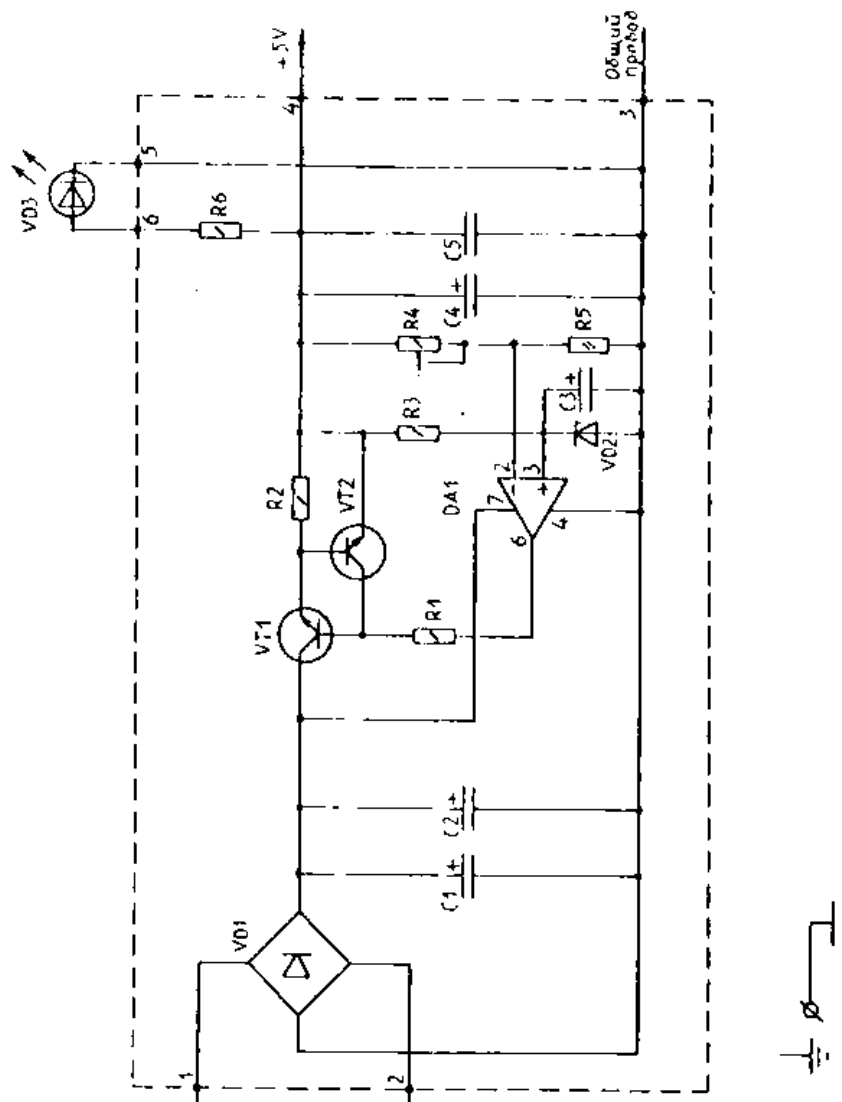
Регистр и буфер вывода реализованы на микросхеме D2 и резисторах R9...R16, которые защищают от короткого замыкания в входной шине ($\overline{X1-2}$, $\overline{X2-2}$, $\overline{X4-2}$, $\overline{X8-2}$, $\overline{Y1-2}$, $\overline{Y2-2}$, $\overline{Y4-2}$, $\overline{Y8-2}$).

Регистр и буфер ввода собраны на микросхеме D3; при вводе информации с входной шины ($\overline{Vba1}$, $\overline{Vba2}$, $\overline{Vba4}$, $\overline{Vba8}$, $\overline{Vbb1}$, $\overline{Vbb2}$, $\overline{Vbb4}$, $\overline{Vbb8}$) подключают на шину приборного интерфейса ($\overline{DI01}$... $\overline{DI08}$) входную шину УС.

Принципиальная электрическая схема блока питания и спецификация использованных деталей изображены на рис. 4.3. Стабилизатор выполнен по классической схеме на операционном усилителе. Стабилизатор напряжения имеет защиту от короткого замыкания. Стабилизатор напряжения автоматически ограничивает ток потребления до значения 0,6 А.

Основные расхождения комплекта ИСКРА-226 + ИСКРА 015-83 + UT8711 от ЭВМ "Электроника ДЗ-28" при обмене данными следующие:

- 1) не реализованы прерывания ЭВМ "Электроника ДЗ-28" и соответствующие линии разъема не соединены;
- 2) не реализованы режим дистанционного управления ЭВМ "Электроника ДЗ-28", соответствующая линия не соединена;



Поз. обозн.	НАИМЕНОВАНИЕ	Кол.	Примечание
T1	ТРАНСФОРМАТОР	1	100В-220В
R1	МЛТ-0,25-510М ±10%	1	
R2	С2-10-0,25-200М ±5%	1	
R3	МЛТ-0,25-3300М ±10%	1	
R4	СЛС-200-0,25-270М ±10%	1	
R5	МЛТ-0,25-3300М ±10%	1	
R6	МЛТ-0,25-3300М ±10%	1	
C1, C2	ПОЛИЭТАЛОН	2	
C3	КСО-6-10А-2000 мкФ	1	
C4	Фролут-10А-220 мкФ	1	Возм. за-менить К50-16
C5	Фролут-0,33-22 мкФ	1	
DA1	ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА	1	Возм. за-менить К168УА6
V01	ПРИБОРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ		
V02	КВ-31Т	1	
V03	АЛ307Б	1	
SA1	Выключатель с предохранителем	1	

Рис. 4.3.
Устройство сопряжения аэрозольного спектрометра с ЭВМ "Искра 226/6"

Блок питания. Схема электрическая

3) обмен информацией между ЭВМ ИСКРА-226/6 и ЭСА УТ-8616 через УС происходит 10...100 раз медленнее, чем между ЭВМ "Электроника ДЗ-28" и ЭСА УТ-8616. Конкретная скорость обмена зависит от выбранного программного обеспечения;

4) при замене ЭСА УТ-8616 другими аппаратами, которые предназначены для работы на линии с ЭВМ "Электроника ДЗ-28", надо гарантировать, чтобы эти аппараты сняли сигнал СИП не более, чем 40 мкс после окончания сигнала Вв.

4.1.5. Процедуры управления

Весь процесс обмена информацией между БИФ ИСКРА 015-83 - УС - ЭСА УТ-8616 происходит под управлением ЭВМ ИСКРА 226/6. Обмен производится с помощью процедур управления интерфейса БИФ ИСКРА 015-83.

При выводе информации от ЭВМ ИСКРА 226/6 к УС сигнал приборного интерфейса \overline{REN} должен быть низкого уровня (0), при вводе информации от УС сигнал \overline{REN} должен быть высокого уровня (1). Записывание информации на шину управления УС (аналог шины управления ЭВМ "Электроника ДЗ-28") происходит при передаче от ЭВМ ИСКРА 226/6 на БИФ ИСКРА 015-83 одного байта информации после выдачи на БИФ процедуры передачи интерфейсных сообщений. Записывание информации на выходную шину УС (аналог выходной шины ЭВМ "Электроника ДЗ-28") происходит при передаче выходной информации после выдачи на БИФ процедуры передачи приборных сообщений. Ввод информации с входной шины УС (аналог входной шины ЭВМ "Электроника ДЗ-28") происходит без дополнительной процедуры при помощи оператора DATA LOAD BT.

Процедура начальной установки приводит БИФ ИСКРА 015-83 в исходное состояние, все процедуры и режимы обмена отменяются. Процедура непосредственно на УС не воздействует.

Процедура выдачи сигнала IFC не воздействует на УС.

Процедура установки сигнала \overline{REN} ("дистанционное управление") на магистраль приборного интерфейса переводит УС в режим вывода данных на выходную шину или на шину управления УС после выдачи на БИФ соответствующих процедур.

Процедура снятия сигнала \overline{REN} с магистрали приборного интерфейса переводит УС в режим ввода данных с входной шины. Ввод данных происходит при помощи оператора DATA LOAD BT.

Использование процедуры параллельного опроса разрешается, состояние УС может оказаться неопределенным при использовании этой процедуры.

Структура действующих процедур следующая:

- 1) процедура начальной установки
 - 1 байт - HEX(1B) - заголовок процедуры,
 - 2 байт - HEX(13) - идентификатор процедуры.
- 2) Процедура установления сигнала REN
 - 1 байт - HEX(1B) - заголовок процедуры,
 - 2 байт - HEX(14) - идентификатор процедуры.
- 3) Процедура снятия сигнала REN
 - 1 байт - HEX(1B) - заголовок процедуры,
 - 2 байт - HEX(15) - идентификатор процедуры.
- 4) Процедура передачи интерфейсных сообщений
 - 1 байт - HEX(1B) - заголовок процедуры,
 - 2 байт - HEX(10) - идентификатор процедуры,
 - 3 байт, 4 байт - код длины передаваемого в приборы сообщения.
- 5) Процедура передачи приборных сообщений
 - 1 байт - HEX(1B) - заголовок процедуры,
 - 2 байт - HEX(11) - идентификатор процедуры,
 - 3 байт, 4 байт - код длины передаваемого в приборы сообщения.

В процедурах передачи данных два последующих байта вслед за идентификатором процедуры интерпретируются как код длины сообщения, причем старшая часть кода содержится в третьем байте, а младшая - в четвертом. Код n длины сообщения, задаваемый в двоичном виде, соответствует длине сообщения $n+1$. Максимальная длина передаваемого сообщения - 2^{16} байта.

4.1.6. Подпрограммы управления и обмена данными

4.1.6.1. Установка адреса на шину управления УС

Обращение к подпрограмме: GOSUB '197(x α), где 1-ый байт переменной x α содержит выдаваемый адрес. Текст подпрограммы:

```
9000 DEFFN ' 197(x8 $\alpha$ )
9001 x9 $\alpha$ =(1B131B141B100000)
9002 STR(x9 $\alpha$ ,9,1)=STR(x8 $\alpha$ ,1,1)
9003 DATA SAVE BT /2E,STR(x9 $\alpha$ ,1,9):RETURN
```

4.1.6.2. Выдача данных на выходную шину УС.

Обращение к подпрограмме: GOSUB ' 198(x α ,x), где в переменной x α содержится выводимая информация, а в переменной x - количество выводимых байтов.

Текст подпрограммы:

```
9010 DEFFN ' 198(x8 $\alpha$ , x8)
9011 x9 $\alpha$ =HEX(1B131B141B11):BIN(STR(x9 $\alpha$ ,7,2),2)=x8-1
9012 DATA SAVE BT /2E, STR(x9 $\alpha$ ,1,8)
9013 DATA SAVE BT /2E, STR(x8 $\alpha$ ,1,x8):RETURN
```

4.1.6.3. Ввод данных с входной шины УС.

Обращение к подпрограмме: GOSUB ' 199(x α ,x), где переменная x α - буфер вводимой информации, а переменная x - количество вводимых байтов.

Текст подпрограммы:

```
9020 DEFFN ' 199(x8 $\alpha$ , x8)
9021 x9 $\alpha$ =HEX(1B131B15):DATA SAVE BT /2E,STR(x9 $\alpha$ ,1,4)
9022 DATA LOAD BT /2E,STR(x8 $\alpha$ ,1,x8):x9 $\alpha$ =HEX(1B14)
9023 DATA SAVE BT /2E,STR(x9 $\alpha$ ,1,2):RETURN
```

4.2. Датчик отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов УТ-8805

4.2.1. Назначение датчика

Датчик отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов УТ-8805 предназначен для выработки электрического сигнала, функционально зависящего от отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов, с целью идентификации нестандартных ситуаций по появлению в воздухе следов газов с повышенным сродством к электрону или протону.

Прибор предназначен для работы в комплекте с ЭВМ или специализированным контроллером, обрабатывающим и анализирующим аналоговый сигнал по напряжению 0...5 В.

4.2.2. Технические данные

4.2.2.1. Выходной сигнал 0...5 В, внутреннее сопротивление не более 100 Ом, допустимая нагрузка не менее 10 кОм и не более 0,1 мкФ.

4.2.2.2. Выходной сигнал является однозначной монотонной функцией отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов, имеющих возраст около 10 мс.

4.2.2.3. Питание от сети постоянного напряжения 23...34 В, допустимы произвольные скачки напряжения в отмеченном диапазоне, потребляемый ток 60 мА, потребляемая мощность не более 2 Вт.

4.2.2.4. Генерирование примесей воздуха:

озон – не более 50 нг/с,

окислы азота – не более 5 нг/с.

4.2.2.5. Габаритные размеры: 170x100x70 мм, масса 0,6 кг.

4.2.3. Физические основы и принцип работы

4.2.3.1. Путем экспериментальных и теоретических исследований выяснено, что появление следов некоторых газов в воздухе приводит к существенным сдвигам в спектре подвижности положительных или отрицательных легких аэроионов. При этом наблюдается сверхчувствительность к следам галоидов и некоторых соединений галоидов, пиридиновых оснований, газов выделяющихся из некоторых изоляционных материалов при их нагревании и т.д. Выяснено также, что сдвиг в спектре подвижности почти всегда сопровождается заметным сдвигом средней подвижности. Средняя подвижность может быть зарегистрирована с помощью аппаратуры, которая существенно проще аппаратуры для регистрации спектра подвижности, и тем самым позволяет достичь экономии в габаритах и потребляемой мощности, а также обеспечить повышенную по сравнению со спектрометрами эксплуатационную надежность.

Средняя подвижность легких аэроионов, кроме химического состава воздуха существенно зависит еще от температуры и давления воздуха. Поэтому датчик средней подвижности легких аэроионов реагирует также на изменения температуры и давления воздуха. В принципе эти реакции могут быть скомпенсированы в системе, которая дополнительно включает датчики температуры и давления воздуха. Осуществление компенсации ведет к усложнению системы и понижению ее эксплуатационных параметров.

Физически наиболее совершенным методом компенсации зависимости от температуры и давления воздуха является измерение средних подвижностей легких аэроионов обеих полярностей и вычисление отношения подвижностей. Это обосновано тем, что зависимость подвижности от температуры и давления является одинаковой для обеих полярностей, а появление примесей, как правило, воздействует на подвижность либо положительных, либо только отрицательных легких аэроионов.

Использование отношения подвижностей легких аэроионов разных полярностей расширяет множество примесей воздуха, на которые датчик выдает реакцию. Например, некоторые соединения фтора действуют только на подвижность отрицательных легких аэроионов, а вещества, выделяющиеся из полихлорвиниловой изоляции при нагревании последней, только на подвижность положительных легких аэроионов. Датчик отношения подвижностей реагирует на обе указанные примеси.

4.2.3.2. Принцип работы датчика иллюстрирует блок-схема на рис. 4.4. Центральным узлом датчика является открытая спаренная плоская ионная камера, изображенная в верхней части рисунка.

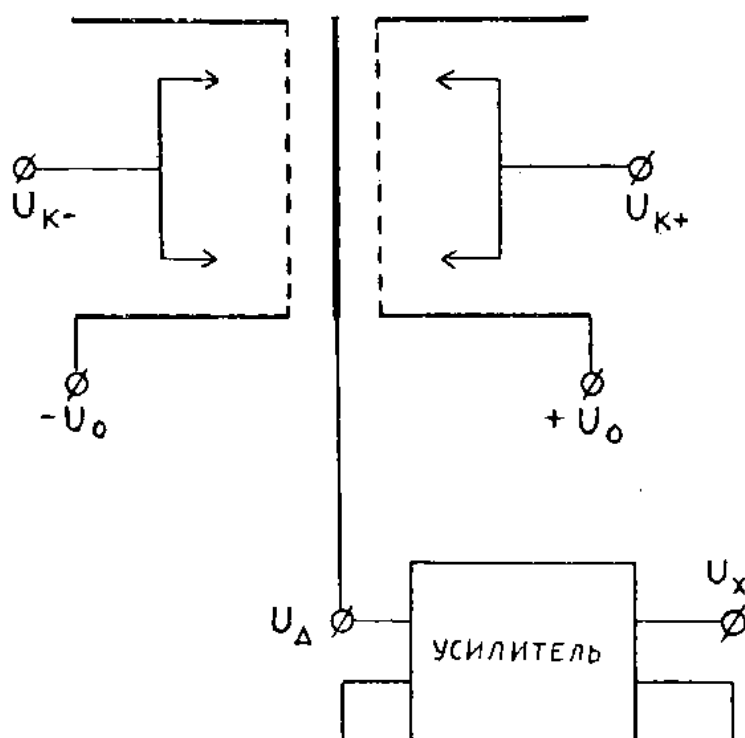


Рис. 4.4. Принцип устройства датчика отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов.

Аэроионы создаются в двух ионизационных боксах отрицательным и положительным коронным разрядом на остриях. Силы тока коронного разряда в обоих боксах поддерживаются равными методом полного изолирования источника высокого напряжения от земли. Изображенные пунктиром на рисунке стенки бокса изготовлены из металлической сетки. Сетка насыщена током аэроионов с бокса в том смысле, что сила тока в плоских ионных камерах, образующихся между сетками и плоским центральным электродом, вычисляется по теории идеальной плоской квазикороны при нулевой начальной напряженности. Допустимость такого предложения обеспечена выбором конструктивных параметров устройства на основе специально проведенных экспериментальных исследований.

По теории квазикорони сила тока в ионной камере

$$I = \frac{9 \text{ ерс } k U^2 S}{8 h^3}$$

где ерс – электрическая постоянная, k – средняя подвижность аэроионов, U – напряжение между сеткой и электродом, S – площадь электрода, h – расстояние между сеткой и электродом.

Если усилитель, передающий потенциал электрода, имеет пренебрежимо малое потребление входного тока, то потенциал электрода образуется так, что ток аэроионов в правой ионной камере равен току в левой ионной камере. При симметричной конструкции уравнение баланса имеет вид

$$(k+) (U_0 - U_D)^2 = (k-) (U_0 + U_D)^2,$$

где U_0 – абсолютное значение потенциала сетки (в настоящем изделии около 13В), $k+$ и $k-$ – подвижности аэроионов и U_D – потенциал электрода. Решение уравнения

$$U_D = U_0 (\text{sqrt} (k+/k-) - 1)^2 / (k+/k-)$$

определяет теоретическую модель функциональной зависимости потенциала электрода от отношения подвижностей аэроионов разных полярностей. Иллюстрация этой модели приведена в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Потенциал электрода датчика при $U_0=13$ В

$k+ / k-$	$U_D : \text{В}$
=====	=====
0,4	-2,93
0,5	-2,23
0,6	-1,65
0,7	-1,16
0,8	-0,72
0,9	-0,34
1,0	0,00

Данные, приведенные в табл. 4.3, соответствуют реальному диапазону изменения отношения k^+/k^- . Соответствующий диапазон напряжения $-3...0$ В не соответствует предусмотренному диапазону выходного напряжения датчика $0...5$ В. Поэтому усилитель, показанный на рис. 4.4, преобразует сигнал к предусмотренному диапазону.

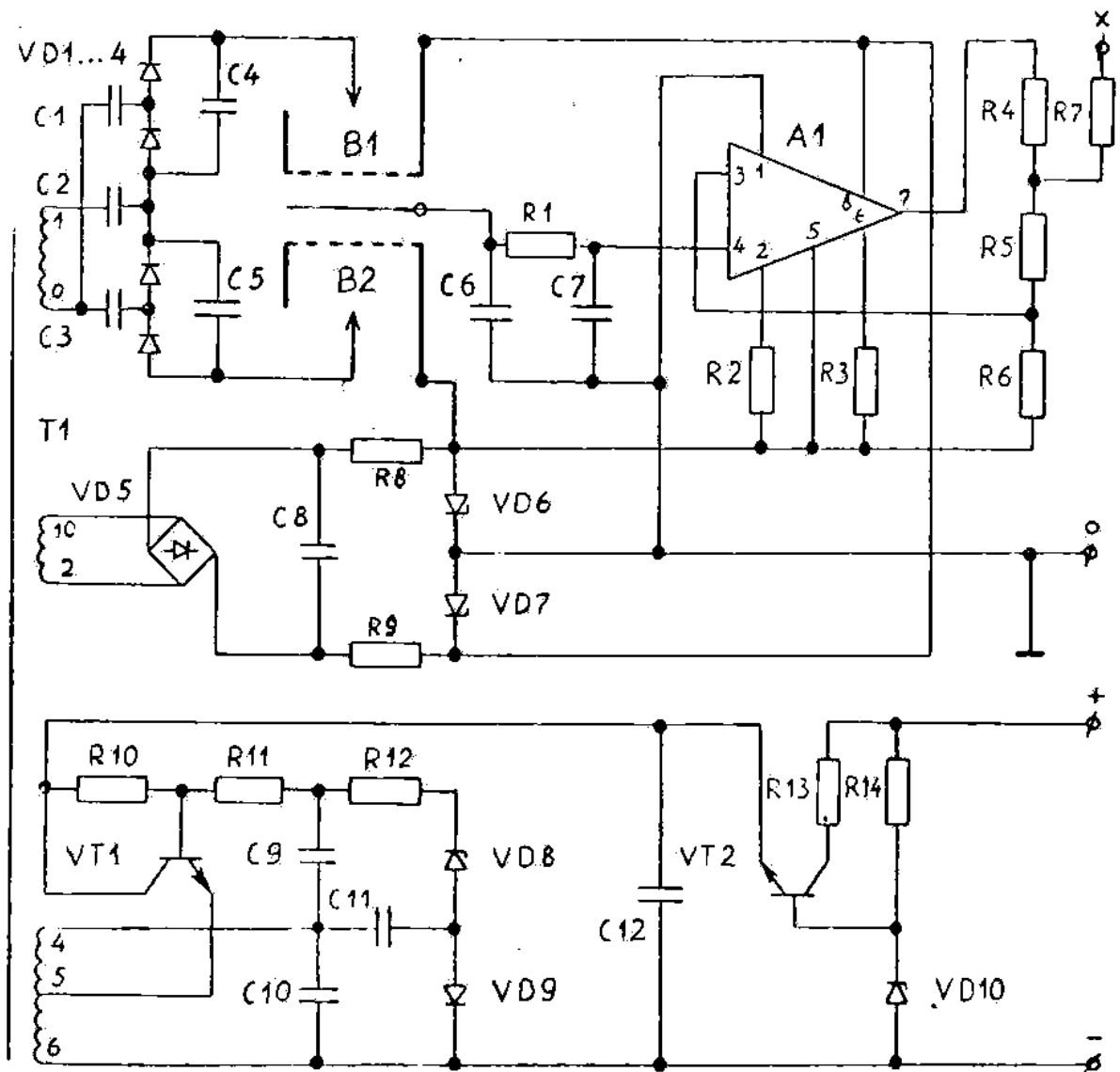


Рис. 4.5. Принципиальная электрическая схема датчика отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов.

4.2.4. Электрическая схема

Принципиальная электрическая схема датчика отношения подвижностей положительных и отрицательных легких аэроионов приведена на рис. 4.5.

Аэроионы создаются в боксах В1 и В2. Коробки и сетки боксов поддерживаются под напряжением $+13$ В и -13 В, формируемыми стабилитронами VD7 и VD6. Коронирующие острия питаются от высоковольтного выпрямителя, построенного на высоковольтных диодных столбцах VD1...VD4 и высоковольтных конденсаторах C1...C5. Особенность высоковольтного выпрямителя - полная изоляция от остальной электрической схемы, реализованная конденсаторами C1...C3, а также трансформатором T1. В результате изоляции потенциалы коронирующих острий в боксах В1 и В2 образуются по принципу баланса коронных токов. Это устраняет негативные последствия асимметрии, вызванной различием в напряжениях зажигания положительного и отрицательного коронного разряда и выравнивает питание сеток, эмиттирующих аэроионы, током коронного разряда.

Напряжение между остриями разных полярностей составляет 4,8 кВ, потребление тока коронирующими остриями 2,7 мкА.

Потенциал электрода, расположенного между сетками боксов, регистрируется операционным усилителем DA1. Входной ток операционного усилителя на три порядка величины уступает току аэроионов в камерах, образованных сетками боксов и электродом. Поэтому операционный усилитель практически не воздействует на потенциал электрода, образующийся на основе баланса токов аэроионов разных полярностей.

Цепь R1, C6, C7 служит для сглаживания пульсации сигнала, создаваемой генератором блока питания. Нуль операционного усилителя устанавливается однократно при налаживании изделия и фиксируется подбираемыми резисторами R2 и R3.

Резистор R4 служит для защиты операционного усилителя в случае ошибочного включения внешней цепи. Резисторы R5 и R6 определяют преобразование потенциала электрода во выходной сигнал. Резистор R7 служит для обеспечения допустимости емкостной нагрузки.

Операционный усилитель и боксы питаются от общего источника напряжения, построенного на диодном мосте VD5, конденсаторе C8, резисторах R8, R9 и стабилитронах VD6, VD8. Описанный источник напряжения, а также высоковольтный источник напряжения для питания коронирующих острий, питаются через общий высокочастотный трансформатор T1 от генератора, собранного на транзисторе VT1. Генератор включен по индуктивной трехточечной схеме и стабилизируется цепью, состоящей из выпрямителя на диоде VD9 и стабилитрона VD8. Частота генератора около 35 кГц, режим генерирования непрерывный. Генератор питается от бортовой сети через стабилизатор, собранный по схеме эмиттерного повторителя на транзисторе VT2. Такое решение заодно предотвращает попадание помехи частоты генератора обратно в бортовую сеть.

Использованная схема питания обеспечивает гальваническую развязку измерительной цепи от цепи питания.

5. СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ ЗА АЭРОИОННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХА

5.1. Аппаратура

5.1.1. Общая характеристика аппаратуры

Нижеописанная аппаратура предназначена для регистрации спектра подвижности аэроионов в широком диапазоне от $3 \cdot 10^{-4}$ до $3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Кроме этого регистрируются основные метеорологические величины (температура, давление и относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра).

Аппаратура установлена в относительно чистых условиях сельской местности, в наблюдательном пункте Тахкузе в 27 км к северо-востоку от г. Пярну, ЭССР /17, 18/. Аппаратура разработана и изготовлена с учетом ранее проведенных работ /19, 20, 21/.

5.1.2. Состав аппаратуры

Основные составные узлы аппаратуры в виде блок-схемы показаны на рис. 5.1.

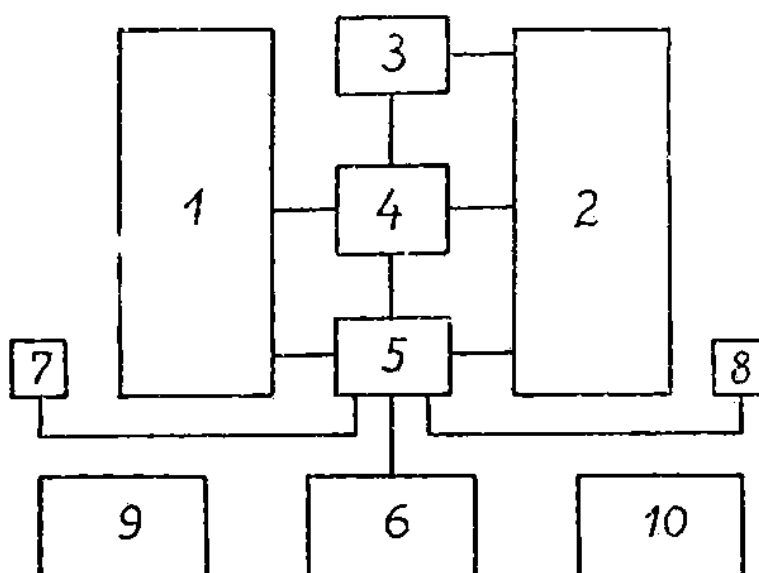


Рис.5.1. Блок-схема аппаратуры

Для измерения спектра подвижности аэроионов служат шестиканальный спектрометр аэроионов 1 (сокращенно С-6) и десятиканальный спектрометр аэроионов 2 (С-10). Один из измерительных конденсаторов С-10 снабжен зарядным устройством 3 для обеспечения оценки спектра размеров частиц аэрозоля. Необходимые постоянные напряжения на измерительные конденсаторы (ИК) подается от источника напряжений 4, управляемого сигналами из контроллера 5. Контроллер осуществляет функции управления отдельными блоками аппаратуры, а также считывания и передачи сигналов. Контроллер работает под управлением ЭВМ "Электроника ДЭ-28" 6. Детальная программа измерений, первичной обработки и записи информации на магнитную ленту определяется программой, загруженной в ЭВМ.

Кроме спектрометров используется множество датчиков 7 метеорологических величин и некоторых параметров аппаратуры. Для индикации результатов, для изменения режима измерений, а также для ввода дополнительной информации имеется выносной пульт управления 8. Спектрометры аэроионов включены в общий тракт исследуемого воздуха 9 с общей воздуходувкой. Для сохранения записанной программы во время выключения сетевого электропитания, ЭВМ, контроллер и источник напряжений подключены к устройству бесперебойного питания 10.

Вышеперечисленные блоки, кроме датчиков метеорологических величин, заключены в теплоизоляционную камеру, в которой поддерживаются необходимые климатические условия в любое время года.

5.1.3. Шестиканальный спектрометр аэроионов

Устройство измерительного конденсатора С-6 совпадает с устройством, описанным в работе /21/. Электрометрические усилители же описаны в работе /22/.

В цепь обратной связи усилителя включены резистор и параллельно с ним конденсатор с ориентировочными значениями сопротивления и емкости 1 ТОМ и 50 пФ. Уточненные значения сопротивления и емкости определены для каждого усилителя. Используются два значения напряжения на ИК: 47,5 В и 150,3 В, а также 400 В на предварительном конденсаторе.

Входящий поток воздуха разделяется на две части с помощью предварительного конденсатора. Внешний коаксиальный слой деионизируется, а центральный поток проходит в натуральном

состоянии. Для обеспечения эффективности предварительного конденсатора, значение и полярность напряжения на последнем подбираются согласно рекомендациям работ /23,24/.

Полный расход воздуха $9900 \text{ см}^3/\text{с}$, а расход внешнего деионизированного кольцевого слоя $8200 \text{ см}^3/\text{с}$.

Собирающих обкладок 6, соответствующие каналы нумеруются по потоку воздуха 0...5. В таблице 5.1. приведены пределы подвижности аэроионов, измеряемых в отдельных каналах

Таблица 5.1.

Пределы подвижности С-6, в $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

№ канала	0	1	2	3	4	5
при 47,5В	от 2,5	2,0	1,6	1,26	1,0	0,8
	до 3,2	2,5	2,0	1,6	1,26	1,0
при 150,3В	от 0,8	0,63	0,5	0,4	0,32	0,25
	до 1,0	0,8	0,63	0,5	0,4	0,32

Принципы обработки сигналов описаны ниже в разделе 5.3. Предельная подвижность предварительного конденсатора ориентировочно в два раза меньше минимального предела подвижности С-6.

5.1.4. Десятиканальный спектрометр аэроионов

В основном, устройство С-10 отвечает описанию, опубликованному в статье /19/. Единственное существенное дополнение к описанному устройству С-10 – приспособление к входам ИК предварительных конденсаторов (ПК), придающих спектрометру качество дифференциального спектрометра второго порядка /25/. Устройство ПК схематически приведено на рис. 5.2.

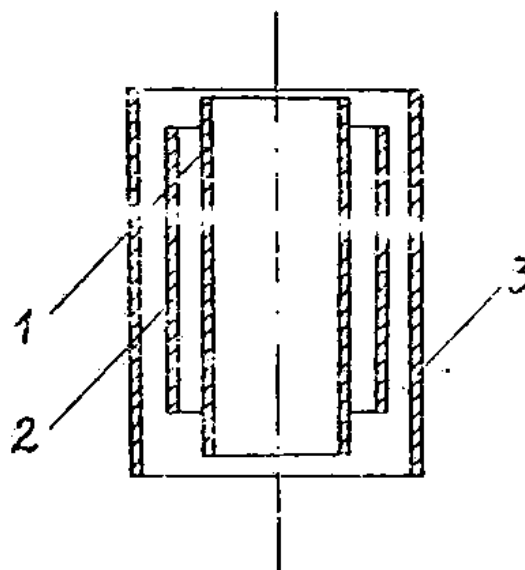


Рис.5.2. Предварительный конденсатор для С-10.
1,2,3 - обкладки.

Обкладки 1 и 3 заземлены. На обкладку 2 подается постоянное напряжение. Воздух между обкладками 1-2 и 2-3 деионизируется, а сквозь обкладку 1 проходит в натуральном виде.

Для более эффективной фильтрации, значение и полярность напряжения на ПК подбираются согласно рекомендациям работ [23, 24].

С-10 имеет два ИК: ИК_л - для легких и средних ионов (каналы 6...10), ИК_т - для тяжелых ионов (каналы 11...15). Напряжение на ИК_л 406 В, на ПК_л 420 В, полный расход воздуха 4750 см³/с, расход внешнего слоя 2450 см³/с. Напряжение на ИК_т 890 В, на ПК_т 1800 В, полный расход воздуха 1210 см³/с, расход внешнего слоя 624 см³/с.

Пределы подвижности аэроионов С-10 приведены в таблице 5.2

Таблица 5.2

Пределы подвижности С-10, в $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$					
N канала	6	7	8	9	10
	от 0,4	0,15	0,07	0,032	0,015
ИК _д	до ∞	0,32	0,15	0,07	0,032
N канала	11	12	13	14	15
	от 0,007	0,0032	0,0015	0,0007	0,00032
ИК _т	до 0,015	0,007	0,0032	0,0015	0,0007

Канал 6 обладает интегральной характеристикой, остальные – дифференциальные. Принципы обработки канальных сигналов описаны ниже, в разделе 5.3.

Предельные подвижности ПК в 8 и 4 раза ниже, чем соответствующие минимальные пределы подвижности ИК_д и ИК_т.

5.1.5. Зарядное устройство

Зарядное устройство предусмотрено для осуществления управляемой зарядки аэрозольных частиц с целью получения дополнительной информации о спектре размеров частиц атмосферного аэрозоля, а также об электрических свойствах атмосферных аэрозолей. Зарядное устройство может быть по программе ЭВМ в разных фазах: измерения выключена, включена на зарядку частиц положительными или отрицательными легкими аэроионами.

При проектировании зарядного устройства были поставлены две основные задачи. Первая задача – обеспечить возможность теоретического расчета процесса зарядки аэрозольных частиц в устройстве. Вторая задача – достичь хорошего приближения к идеальному режиму униполярной диффузионной зарядки частиц легкими аэроионами. В основу решения этих задач принята теоретическая модель идеального трансверсального зарядника, описанная в работе /26/.

Устройство зарядника иллюстрировано на рис. 5.3.

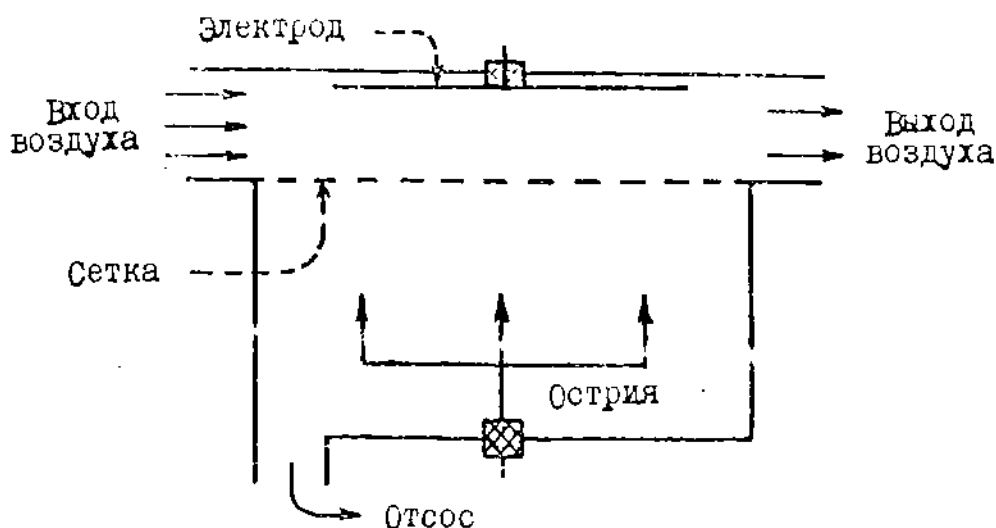


Рис. 5.3. Схема зарядного устройства.

Зона зарядки ограничена сверху плоским электродом, который подключен к электрометрическому усилителю, а снизу плоской сеткой, через которую подаются легкие аэроионы. Длина зоны 200 мм, ширина 120 мм и высота 50 мм. Расход входящего воздуха около 1,5 л/с, выходящего около 1,2 л/с и отсасываемого через сетку около 0,3 л/с. Отсос предусмотрен для подавления попадания химических продуктов коронного разряда в зону зарядки. Между сеткой и электродом приложено напряжение 200 В. Соответствующая напряженность будет 40 В/см. В случае незагрязненной сетки (при напряжении 3 кВ на коронирующих остриях) обеспечивается значение безразмерного параметра зарядки (см. /26/) около 20 или $n_0 t$ около $8 \cdot 10^6$ эл.зар.жс/см³. При загрязнении сетки пылью и ворсинками значение параметра уменьшается.

Действительное значение параметра зарядки вычисляется по действительному значению силы тока легких аэроионов через верхний электрод зарядника, которое регистрируется аппаратурой.

5.1.6. Источник напряжений

Источник напряжений обеспечивает измерительные и предварительные конденсаторы и зарядное устройство необходимыми высокостабильными напряжениями 400 В, 890 В, 1,8 кВ и 3 кВ.

Для формирования высокостабильных напряжений используется выпрямление высокочастотного напряжения, полученного от стабилизированного генератора. Окончательная стабилизация производится с помощью параметрических стабилитронов типа СГ301С и СГ302С.

Напряжения на ИК-спектрометрах подаются с одного и того же высокостабильного источника на 890 В через делитель напряжения с суммарным сопротивлением 61 МОм.

Управление источником напряжений, т.е. включение, выключение и переключение полярности напряжений, осуществляется сигналами контроллера. Для физического переключения высоких напряжений используются специальные реле.

5.1.7. Контроллер

Контроллер, построенный для данного измерительного комплекса, является аналогом контроллера описанного в работе /20/.

Контроллер состоит из блока управления, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с многоканальным коммутатором, схемы защиты электрометрических усилителей спектрометров, триггеров и силовых реле для коммутации устройств, таймера, предварительного усилителя с коэффициентом усиления $k=100$ и ввода кода с пульта управления.

Под управлением ЭВМ "Электроника ДЗ-28" контроллер выполняет различные функции управления блоками аппаратуры: управляет ключами, замыкающими через схемы защиты входы электрометрических усилителей, и источником напряжения предварительных и измерительных конденсаторов и зарядного устройства, через силовые реле замыкает входы измерительных схем некоторых датчиков, подвергаемых к контролю нуля выходного сигнала.

По командам ЭВМ контроллер с помощью многоканального коммутатора подключает к АЦП соответствующие каналы, снимает сигналы с датчиков и выходов электрометрических усилителей, преобразует эти сигналы в код и передает ЭВМ.

С помощью ввода кода с пульта управления в контроллере реализована возможность проникновения в выполнение программы ЭВМ - выбор режима измерения и индикации. Для подавления помех контроллер подключается к ЭВМ через блок гальванической развязки.

Работа ЭВМ с контроллером осуществляется программой, написанной на языке высокого уровня BASIC, с использованием подпрограмм в машинных кодах (см.раздел 5.2). Для связи с внешними устройствами в контроллере имеется 64 канала, соответствующие кодам управления 0...63. В связи с различным

характером внешних устройств каналы разделены на три группы. Первая группа – так называемые электрометрические каналы, т.е. каналы аналоговых сигналов, имеющие предохранительные схемы защиты от входного сигнала высокого уровня. Вторая группа – цифровые каналы и каналы управления устройствами. Третья группа – контрольные каналы, т.е. аналоговые каналы напряжений для входных сигналов ограниченного динамического диапазона. Часть аналоговых каналов ориентирована на подключение резистивных датчиков.

Для всех аналоговых каналов диапазон измерения на входе АЦП составляет $-10 \text{ В} \dots 10 \text{ В}$, конкретный поддиапазон измерения 1 В или 10 В выбирается автоматически, результат представляется в дискретах диапазона 1 В и составляет 0,25 мВ. К информации АЦП (знак и 11 разрядов), добавляется информация об исправности канала и диапазона измерения. Точность измерения АЦП в диапазоне измерения 1 В и 10 В составляет соответственно 0,5 мВ и 5 мВ. Время измерения одного канала составляет около 20 мс и не может быть уменьшено по причине инертности электромеханических реле коммутатора.

В контроллере предусмотрена возможность измерения милливольт-сигналов использованием предварительного усилителя ($K=100$). При этом полный диапазон измерения составляет $-0,1 \text{ В} \dots 0,1 \text{ В}$, результат представляется в дискретах 2,5 мкВ, теоретическая точность измерения АЦП в диапазонах измерения 10 мВ и 0,1 В соответственно 5 мкВ и 50 мкВ.

5.1.8. Датчики

Датчики, задействованные в измерительном комплексе, по их назначению можно разделить на три группы: датчики метеорологических величин, датчики атмосферно-электрических величин и датчики прослеживающие за техническими параметрами измерительного комплекса.

К первой группе относятся датчики: направления и скорости ветра – анеморумбометр М63М-1 /27/ (с приспособленным дополнительным блоком для получения электрического выхода); относительной влажности воздуха – гигрометр сорбционный ГС-210 и волосной гигрометр; температуры воздуха, земли и теплоизолированной камеры – градуированные терморезисторы ММТ-4, номинальным сопротивлением 15 кОм; атмосферного давления – унифицированный датчик давления системы КРАМС /27, 28/; регистратор

метеорологической дальности видимости РДВ-2 /27, 28/: датчик измерения суммарной радиации - термоэлектрический пиранометр М-80М /27/.

Датчики температуры и влажности воздуха находятся в специальном принудительно проветриваемом воздушном канале, расположенном у входа основного тракта воздуха. Фотометрический блок датчика РДВ-2 установлен в специальной будке на высоте около 2 м от земли, призмный отражатель с дополнительным металлическим защитным кожухом прикреплен к бетонному столбу на высоте 3,5 м в удалении 100 м от фотометрического блока РДВ-2. Датчик направления и скорости ветра установлен на мачте на высоте 10 м от земли.

Вторая группа состоит из датчика напряженности электрического поля Поле-2 /29/ и датчика близких гроз. Датчик близких гроз построен по примеру датчика близких гроз измерительной системы КРАМС /28/, имеет два предела чувствительности, рассчитанные на радиус действия гроз 10 км и 30 км. Датчики напряженности электрического поля и близких гроз расположены в удалении друг от друга и от остальных датчиков согласно предъявленным условиям эксплуатации.

Датчики третьей группы, прослеживающие за техническими параметрами измерительного комплекса, представлены датчиком силы тока зарядника и датчиком минимального значения сетевого напряжения.

К датчикам третьей группы можно отнести и блок диагностики электрометрических усилителей. Блок диагностики подключается непосредственно к контроллеру и соединяется с входами напряжения внутренних обкладок ИК спектрометров. С помощью специальной программы, создаваемой в ЭВМ, используя данные о действующих емкостях ИК, по характеру изменения напряжения на внутренней обкладке и выходного напряжения электрометрических усилителей, определяются сопротивление, емкость и другие параметры всех электрометрических усилителей.

Описанный комплект датчиков не является окончательным. Контроллер обеспечивает подключение 12 дополнительных датчиков.

5.1.9. Пульт управления

Пульт управления, подключаемый к контроллеру, состоит из 8 ключей и одного одиннадцатипозиционного переключателя. Ключи используются для выбора режима записи данных на магнитную ленту.

ввода в запись дополнительной информации о состоянии окружающей среды и аппаратуры, выбора номера индицируемого канала. Имеется также ключ для установки нуля регистра таймера.

5.1.10. Тракт воздуха

Входное отверстие исследуемого воздуха находится в южном фронтоне здания, на высоте 5 м от земли и защищено от действия осадков металлическим кожухом. Металлический канал сечением в среднем $0,02 \text{ м}^2$ проводит воздух к измерительным приборам С-6 и С-10. Время прохода воздуха через входной канал около 1,5 с.

Приняты меры для подавления турбулентности потока воздуха. В канале расположены продольные стенки, а в коленах и в отводе – направляющие лопатки. Канал сужается по потоку.

Поток воздуха создается одной общей воздуходувкой. Распределительная камера во всасывающей стороне воздуходувки обеспечивает калиброванные расходы через ИК С-6, ИК_д, ИК_т и зарядное устройство. Для подавления действия ветра выходящий из воздуходувки поток воздуха направляется в тот же фронтон здания.

5.1.11. Устройство бесперебойного питания

Устройство бесперебойного питания содержит опорный генератор частоты 50 Гц, низкочастотный усилитель мощности, блок питания и буферные аккумуляторы.

Сигнал, вырабатываемый опорным генератором, усиливается 200-ваттным усилителем мощности с автоматическим регулированием выходного напряжения на 220 В и используется потребителями, подключенными к устройству. Генератор и усилитель мощности питаются от сети 220 В через блок питания и буферные аккумуляторы напряжением 24 В и емкостью 120 А·ч, обеспечивая бесперебойную работу потребителей в случае кратковременного отключения сетевого питания.

Через описанное устройство питаются ЭВМ, контроллер и источник напряжений. Устройство питания обеспечивает устойчивую работу комплекса при кратковременных сильных колебаниях сетевого напряжения, а также – сохранение программы и автоматическое возобновление действия комплекса при перебоях сетевого питания с продолжительностью до 3 часов.

5.2. Программное обеспечение

5.2.1. Введение

Процессы коммутации аппаратуры, измерения и записи результатов в обсерватории атмосферных ионов Тахкузе осуществляются под управлением ЭВМ (см. раздел 5.1.). Поэтому структура наблюдений и записей, а также некоторые элементы методики наблюдений определяются через программу управляющей ЭВМ.

Возможен подход, при котором программа управляющей ЭВМ рассматривается как внесистемный элемент, который может быть в любой момент создан заново или произвольным способом изменен в зависимости от конкретных интересов исследователя. Такой подход не может гарантировать единообразия методики наблюдений и структуры результатов наблюдений, а единообразие рассматривается как один из основных факторов ценности рядов наблюдений постоянно действующей обсерватории. Поэтому в обсерватории атмосферных ионов Тахкузе основное программное обеспечение рассматривается как фиксированная составляющая системы, которая должна быть длительно эксплуатирована без внесения изменений в программу.

Основное программное обеспечение состоит из программы наблюдений и программы обслуживания. Регулярные наблюдения выполняются под управлением программы наблюдений. Программа обслуживания обеспечит выполнение технической диагностики состояния спектрометров аэроионов и операций по формированию и преобразованию аппаратной таблицы. На время использования программы обслуживания регулярные наблюдения останавливаются. Регулярные наблюдения останавливаются также на время выполнения любых специальных программ, которые могут быть созданы для выполнения каких-либо эпизодических специальных исследований.

Программное обеспечение реализовано для ЭВМ "Электроника ДЗ-28", имеющий скромное общее математическое обеспечение. Для языков программирования высокого уровня доступен только интерпретатор языка Бэйсик. Быстродействие ЭВМ и набор операторов языка недостаточны для реализации используемых алгоритмов с помощью Бэйсик-интерпретатора. Поэтому использовалась следующая технология программирования:

- Бэйсик-интерпретатор был расширен дополнительным оператором обмена данных с контроллером, непосредственно управляющим аппаратурой;
- для реализации трех дополнительных операций ввода-вывода были написаны внешние подпрограммы на языке машинных команд;
- предварительная редакция программы была написана на языке Бэйсик и отлажена при условии заниженного темпа измерений;
- шесть сегментов программы были вручную переведены на язык машинных команд, что обеспечило необходимое ускорение вычислений.

ЭВМ "Электроника ДЗ-28" имеет собственное цифровое табло и клавиатуру. При работе по программе измерений ЭВМ используется без внешнего дисплея. Программа обслуживания может быть использована в двух режимах - с подключением к ЭВМ дисплея и без дисплея.

Ниже будут описаны основные структуры и операции программы наблюдений и операция диагностики. Предполагается, что читатель предварительно знаком с разделом 5.1., в котором описывается аппаратура обсерватории атмосферных ионов Тахкузе.

5.2.2. Структура наблюдений

Полный период измерений и обработки наблюдений длится один час. В течение периода данные накапливаются в оперативной памяти ЭВМ. В конце периода выполняется статистическая обработка накопленного материала и результаты записываются на магнитную ленту. В накопителе используются стандартные звукотехнические компактные кассеты, на одной кассете С90 помещаются результаты одного месяца непрерывных наблюдений.

Одночасовой период состоит из 12 пятиминутных циклов. Внутренняя структура каждого из циклов одинакова за исключением первого цикла периода, в котором дополнительно выполняется статистический анализ и запись результатов предыдущего периода.

В случае особого требования, которое задается нажатием соответствующей кнопки на пульте управления, на магнитную ленту записываются дополнительно результаты каждого отдельного цикла. Особое требование записи результатов по циклам задается только в исключительных случаях, поскольку это сопровождается десятикратным увеличением расхода магнитной ленты.

Пятиминутный цикл состоит из пяти одноминутных фаз. Спектрометры аэроионов (см. 5.1.) включаются в разных фазах в разные режимы соответственно табл. 5.3.

Таблица 5.3.

Режимы спектрометров в очереди смены фаз

Фаза	C-6 напряжение	C-10 полярность	Защелка, режим и полярность
-	-47,5 В	-	выключен
- -	-150,3 В	-	включен -
	0	напряжение=0	выключен
+ +	+150,3 В	+	включен +
+	+47,5 В	+	выключен

Структура действий внутри одноминутной фазы аналогична структуре действий, описанной в работе /21/ и описывается в табл. 5.4.

Таблица 5.4.

Структура одноминутной фазы

Секунда	действия
1	Блокирование электрометров в спектрометрах. Переключение реле быстрого контроля в состоянии А. Включение режима по табл. 1. Первичная обработка данных предыдущей минуты.
12	Деблокирование электрометров в спектрометрах.
20	Измерение и занесение результатов в вектор А. Переключение реле быстрого контроля в состояние В. Если первая минута цикла, то промежуточная обработка данных предыдущего цикла и если особое требование, то запись результатов цикла на магнитную ленту. Если первая минута периода и предыдущий период был полным, то статистическая обработка и запись результатов периода на магнитную ленту. Индикация текущих измерений на табло ЭВМ.
60	Измерение и занесение результатов в вектор В. Переход в начало следующей фазы по табл. 5.3.

5.2.3. Первичная обработка данных

Результатом измерения одной фазы являются векторы A и B , состоящие из сигналов всех каналов. Каналы распределяются на четыре категории:

- каналы спектрометра,
- каналы датчиков без контроля нуля,
- каналы датчиков с быстрым контролем нуля,
- каналы датчиков с медленным контролем нуля.

Быстрый контроль нуля осуществляется в каждой минуте с помощью реле, переключения которого описаны в табл. 5.4. Формальная операция записывается в виде $x_i = A_i - B_i$ или $x_i = B_i - A_i$ в зависимости от того, какое из состояний реле используется для включения датчика в режим проверки нуля. Медленный контроль осуществляется с помощью контактов другого реле, которое срабатывает с периодом в один час.

Сигналы каналов спектрометра приводятся к установившимся значениям с помощью метода, описанного в работе /26/. Формальное вычисление выполняется по формуле

$$x_i = a_i A_i + b_i B_i, \quad (5.1)$$

где a_i и b_i - множители, зависящие от постоянного времени электрометра.

Формула (5.1) универсальна в том смысле, что она позволяет осуществить также коррекцию нуля, выбирая для этого $a_i = 1$, $b_i = -1$ или $a_i = -1$, $b_i = 1$. В случае датчиков без контроля нуля можно задать $a_i = b_i = 0,5$. На основе изложенных соображений формула 5.1 принята в качестве универсальной формулы первичной обработки данных по всем каналам.

5.2.4. Аппаратурная таблица

В интересах универсальности программы измерений информация о параметрах электрометров спектрометра и о конкретном наборе датчиков выделена в аппаратную таблицу. Аппаратная таблица записывается независимо от программы на магнитную ленту как массив данных и она может быть скорригирована при любых изменениях в аппаратуре, что предотвращает необходимость внесения изменений в программу.

Аппаратура обсерватории Тахкузе содержит 17 каналов спектрометра и до 19 каналов для датчиков. В соответствии с этими ограничениями аппаратурная таблица содержит 94 числа, содержание которых указано в табл. 5.5.

Таблица 5.5.

Структура аппаратной таблицы

Номера чисел	Содержание
1...19	Номера физических каналов датчиков.
20...55	Постоянные a_i для первичной обработки.
56...91	Постоянные b_i для первичной обработки.
92	Действительное число датчиков диапазона 10 В.
93	Действительное число датчиков диапазона 100 В.
94	Условный номер конфигурации аппаратуры.

Все числа записываются в аппаратную таблицу в очереди логических номеров каналов. Различение физических и логических номеров обеспечит возможность произвольного включения датчиков к контроллеру с последующим фиксированием конкретного включения в аппаратурной таблице. Номера физических каналов датчиков с медленным контролем нуля отмечаются в таблице знаком минус перед номером физического канала.

Программа измерения вводит аппаратную таблицу с магнитной ленты сразу после пуска программы на исполнение.

5.2.5. Промежуточная и статистическая обработка данных

После накопления первичных данных для пятиминутного цикла дополняются:

- шесть статистических сумм для каждого спектрометрического канала (суммы сигналов всех фаз и сумма квадратов сигналов фазы Z);
- две статистические суммы для каждого канала датчиков (сумма сигналов и сумма квадратов сигналов).

После накопления статистических сумм на полный час:

- вычисляются средние значения и стандартные отклонения,
- формируется запись и записывается на магнитную ленту,
- обнуляются все статистические суммы.

5.2.6. Записи

Результаты одночасового периода или пятиминутного цикла записываются на магнитную ленту в виде одного дублированного блока данных. Данные представляются двухбайтовыми десятичными числами. В голове блока указывается длина блока, контрольная сумма, номер дня в учете с первого марта 1984 г., номер минуты в учете с начала суток, номер конфигурации аппаратуры, код ключей пульта управления. В случае записи для одночасового периода следуют:

- 17 стандартных отклонений нуля для спектрометрических каналов;
- 4x17 среднечасовых значений сигналов спектрометров для четырех режимов -, --, +, ++;
- N среднечасовых значений сигналов датчиков;
- N стандартных отклонений сигналов датчиков.

N обозначает число датчиков. В случае записи для пятиминутного цикла вышеописанное заменяется на:

- 4x17 значений сигналов спектрометров для четырех режимов -, --, +, ++;
- N значений сигналов датчиков.

Кодирование чисел в записях ориентировано на обработку и анализ наблюдений с помощью двухмашинной системы, описанной в работе /30/.

Во всех записях данные скорректированы на нуль по сигналам фазы Z. Экспериментально установлено существование малых сдвигов, не устранимых такой коррекцией. Поэтому методика наблюдений предусматривает проведение с трехмесячным периодом особых наблюдений, при которых поток воздуха через измерительные конденсаторы выключается. Результаты особых наблюдений учитываются в стадии обработки и анализа наблюдений, осуществляемого вне рамок описанной системы наблюдений и регистрации.

5.2.7. Диагностика спектрометров

На время выполнения диагностических измерений наблюдения приостанавливаются, вентилятор спектрометров выключается и внутренние обкладки измерительного конденсатора подключаются к управляемому источнику напряжения.

Для диагностики состояния спектрометров напряжение внутренних обкладок изменяют скачком от одного постоянного уровня к другому, и после этого изучают переходные процессы электрометров всех каналов. В случае исправного электрометра переходный процесс весьма точно соответствует теоретической экспоненциальной модели, а по значению скачка сигнала электрометра и постоянной времени переходного процесса можно определить измерительные емкость и сопротивление электрометра. В качестве опорной точки используется значение действующей емкости измерительного конденсатора. Действующие емкости измерительного конденсатора измеряются весьма точно при калибровке спектрометров и они не изменяются в процессе эксплуатации аппаратуры.

Процедура диагностики длится около одного часа и за это время выполняются десять повторных опытов изучения переходного процесса всех электрометров, а также некоторые дополнительные опыты. После необходимых вычислений ЭВМ выдает таблицу результатов диагностики, в которой для каждого спектрометрического канала указаны:

- измерительное сопротивление электрометра,
- измерительная емкость электрометра,
- нулевой отчет заблокированного электрометра,
- сдвиг нуля при деблокировании электрометра,
- сила тока ионизационной камеры в измерительном конденсаторе спектрометра.

Для всех отмеченных величин указываются также стандартные отклонения рассеивания значений в повторных опытах.

Значения измерительного сопротивления и емкости могут быть использованы для вычисления коэффициентов формулы 5.1. Информация о нулевом отсчете и сдвиге нуля необходима при оценке технического состояния электрометра и изолятора измерительного конденсатора. Ток ионизационной камеры является индикатором радиоактивной загрязненности измерительного конденсатора.

5.3. Принципы обработки сигналов спектрометров аэроионов

5.3.1. Общие формулы

Любой одноканальный спектрометр аэроионов описывается уравнением

$$I(\psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\psi, k) \cdot \varrho(k) dk, \quad (5.2)$$

где $I(\psi)$ – сила тока через собирающую обкладку ИК,

ψ – варьируемый режимный параметр спектрометра,

$G(\psi, k)$ – аппаратная функция,

k – подвижность аэроионов,

$\varrho(k)$ – спектральная функция полярной плотности заряда аэроионов /25/.

Предполагается, что величины ψ , k и $\varrho(k)$ могут иметь отрицательную и положительную полярность. Обычно, если полярность ψ не меняется, то $G(\psi, k) \neq 0$ только для аэроионов одной полярности. Тогда

$$I(\psi) = \int_0^{\infty} G(\psi, k) \varrho(k) dk. \quad (5.3)$$

В случае многоканального спектрометра, формула (5.3) действительна для каждого канала. Одновременно измеряется n значений силы тока, и должно быть известно n аппаратных функций. Аппаратные функции могут частично перекрываться. Сила тока в i -том канале

$$I_i = \int_0^{\infty} G_i(\psi_i, k) \varrho(k) dk. \quad (5.4)$$

Поскольку задача нахождения функции $\varrho(k)$ по конечному набору значений I_i в общем виде является некорректно поставленной, то нужно использовать априорную информацию о виде этой функции. Одна возможность – применить кусочно-линейную модель спектра /31/.

5.3.2. Кусочно-линейная модель спектра

Введение кусочно-линейной модели означает замену рассматриваемой непрерывной спектральной функции суммой элементарных спектров в виде треугольников (сплайнов единичного дефекта первой степени) /31/. Для введения n элементарных

спектров необходимо выбрать $n+2$ узлов аргумента спектра $k_0 < k_1 < k_2 < \dots < k_{n+1}$. Интервал между крайними узлами k_0 и k_{n+1} должен полностью охватить тот интервал аргумента, в котором нельзя принимать априорное допущение $g(k) = 0$.

Когда $k \rightarrow 0$, то нельзя утверждать, что $g(k) \rightarrow 0$. Поэтому целесообразнее использовать спектральную функцию проводимости

$$\lambda(k) = k g(k) \quad (5.5)$$

для представления спектра подвижности. В таком случае можно уверенно допустить $\lambda(0) = 0$. Кроме того, значения функции $\lambda(k)$ меньше варьируются в широком диапазоне k , что также благоприятствует аппроксимации.

5.3.3. Уравнение спектрометра

В случае применения кусочно-линейной модели спектра уравнение (5.3) превращается в матричную форму. Поскольку в настоящем измерительном комплексе используются разные значения расхода воздуха, то целесообразно перейти к условным концентрациям аэроионов

$$P_i = I_i / \Phi_i, \quad (5.6)$$

где Φ_i - характерный расход воздуха для данного канала. В таком случае уравнение спектрометра имеет вид

$$P_i = \sum_j G_{ij}^\lambda \lambda_j, \quad (5.7)$$

G_{ij}^λ - элементы аппаратной матрицы для проводимости,

λ_j - множители элементарных спектров.

5.3.4. Аппаратная матрица для проводимости

Элементами аппаратной матрицы для проводимости будут каналные сигналы, соответствующие элементарным спектрам

$$G_{ij}^\lambda = \int G_i^\lambda(k) \lambda_j^i(k) dk, \quad (5.8)$$

где $G_i^\lambda(k)$ - аппаратная функция для i -того канала,

$$G_i^\lambda(k) = G_i(k) / (k \cdot \Phi_i). \quad (5.9)$$

Аппаратные функции для отдельных каналов настоящих спектрометров, как правило, имеют трапециoidalную форму, как показано на рис. 5.4.

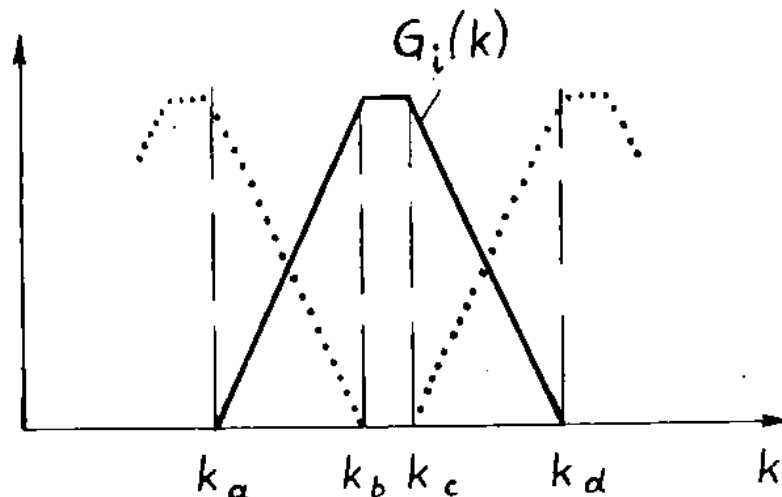


Рис. 5.4. Аппаратная функция

Поскольку предельные подвижности k_b и k_c близки друг к другу, то для упрощения промежуточных расчетов указанная на рис. аппаратная функция заменена функцией треугольной формы, объединив средние предельные подвижности по формуле

$$k_{bc} = \sqrt{k_b \cdot k_c} \quad (5.10)$$

Функции $G_i^{\lambda}(k)$, согласно формуле (5.9) имеют криволинейную форму.

В итоге упразднения аппаратных функций получен ряд предельных подвижностей от k_1 до k_{22} .

Аппаратные функции для плотности заряда имеют вид треугольников с координатами вершин, как правило, в трех ближайших точках: $G_1(k)$ в (k_1, k_2, k_3) , $G_2(k)$ в (k_2, k_3, k_4) и т.д. Особенность имеет $G_9(k)$, у которой правая вершина не входит в вышеуказанный ряд предельных подвижностей.

Аппаратные функции для проводимости можно записать в следующем виде:

$$G_i^\lambda(k) = \begin{cases} \frac{1 - k_i/k}{k_{i+1} - k_i}, & \text{если } k_i < k < k_{i+1} \\ \frac{k_{i+2}/k - 1}{k_{i+2} - k_{i+1}}, & \text{если } k_{i+1} < k < k_{i+2} \\ 0, & \text{если } k_i > k > k_{i+2} \end{cases} \quad (5.11)$$

Элементарные спектры $\lambda^j(k)$ имеют вид треугольника, т.е.

$$\lambda^j(k) = \begin{cases} \frac{k - k_j}{k_{j+1} - k_j}, & \text{если } k_j < k < k_{j+1} \\ \frac{k_{j+2} - k}{k_{j+2} - k_{j+1}}, & \text{если } k_{j+1} < k < k_{j+2} \\ 0, & \text{если } k_j > k > k_{j+2} \end{cases} \quad (5.12)$$

Узлами кусочно-линейной модели спектра целесообразно выбрать те же предельные подвижности, которые указаны выше для аппаратных функций. В порядке исключения k_1 заменена значением 0, т.к. спектр вероятно не превращается в нуль при значении k_1 .

Исходя из вышеуказанных формул (5.8), (5.11) и (5.12) аналитически выведены формулы для элементов аппаратной матрицы G_{ij}^λ , которые выражаются через значения предельных подвижностей.

5.3.5. Проявление спектра

Проявление спектра означает решение уравнения (5.7) относительно множителей λ_j . Это уравнение относится к линейным алгебраическим уравнениям. Решение этого уравнения принципиально нетрудно, проблемы были лишь в связи с нахождением максимально быстрого алгоритма решения и в связи с нахождением оценок ошибок измерения.

Алгоритм решения уравнения (5.7) разработан на основании метода Гаусса, с учетом упрощающих особенностей матрицы $\{G_{ij}^{\lambda}\}$ (почти диагональный вид). Для оценки ошибок измерения разработан специальный нестрогий алгоритм – ко всем канальным сигналам P_i прибавляются максимальные оценки ошибок только одного знака, а затем находятся приросты множителей λ_j .

Исходя из вышерассмотренной кусочно-линейной модели спектра проводимости, возможно вычислить различные другие модели спектра, например, фракционные модели спектра проводимости или спектра плотности заряда /31/.

6. ХАРАКТЕРИСТИКА АЭРОИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХА

6.1. Аэроионы и спектр подвижности аэроионов

6.1.1. Определение аэроиона

Аэроионом называется любая заряженная частица, средняя скорость которой по отношению к окружающему воздуху определяется в основном электрическими силами [25]. Химические и физические характеристики индивидуальных аэроионов могут быть весьма различными и могут варьироваться в широких пределах. Так, например, наименьшие аэроионы состоят из нескольких молекул и обладают, в основном, характеристиками свободных молекул (с добавлением электрического заряда). Наибольшие же аэроионы состоят из миллионов молекул и обладают свойствами частиц конденсированного жидкого или твердого вещества. Диапазон размеров (диаметров) аэроионов, соответственно, от порядка 1 нм до порядка 1 мкм. Массы аэроионов различаются, соответственно, до 9 порядков величины.

Из-за малых размеров, аэроионы трудно поддаются исследованию экспериментальными методами. Однако, именно наличие электрического заряда значительно содействует исследованию.

6.1.2. Подвижность аэроиона

В довольно широком диапазоне условий скорость w дрейфа аэроиона пропорциональна напряженности электрического поля E :

$$w = k'E, \quad (6.1.)$$

где множитель k' называется (электрической) подвижностью аэроиона. В нормальных условиях подвижность аэроионов начинает зависеть от напряженности поля лишь при 1500 В/м [32].

Подвижность аэроионов зависит также от внешних условий – от давления и температуры газа. В формуле подвижности ионов в первом приближении теории Чепмена-Энскога, которая в настоящих условиях достаточно точна, явно выражена обратная пропорциональность подвижности от плотности газа [32]. Плотность атмосферного воздуха пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре. Обратная пропорциональность

подвижности давлению в широком диапазоне экспериментально доказана еще в первой четверти XX столетия /33/. Что касается температуры, то зависимость не так проста. Подвижность зависит от температуры и при постоянной плотности газа. Эта зависимость определяется характером взаимодействия иона с нейтральной частицей. В общем, эта зависимость недостаточно известна. Анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что в области температур, часто встречающихся в приземном слое, зависимость подвижности ионов неизменной структуры от температуры приблизительно пропорциональна абсолютной температуре. Отклонения от пропорциональной зависимости имеются в обе стороны, но они относительно слабые.

Исходя из вышеизложенных соображений, можно считать обоснованным приведение измеренных (натуральных) подвижностей ионов к нормальным условиям по формуле

$$k = k' \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}, \quad (6.2)$$

где k' – натуральная подвижность,

p – давление,

T – абсолютная температура,

$p_0 = 101325$ Па и $T_0 = 273,15$ К – соответственно нормальные давление и температура.

Итак, в случае неизменности состава и структуры ионов ожидается независимость приведенной подвижности ионов от давления и приблизительная независимость от температуры.

Приведенная подвижность, таким образом, в основном характеризует только аэроионы. Зависимость приведенной подвижности от таких фундаментальных характеристик аэроиона, как его размер (диаметр) и масса, не является строго однозначной, однако, для приблизительных оценок эта зависимость достаточно хорошо известна /34/.

С другой стороны, именно подвижность аэроиона является самой доступной физической величиной экспериментальному исследованию, особенно в случае аэроионов малых размеров. В измерительных приборах аэроионы заставляют двигаться в определенных электрических полях в неподвижном или в текущем воздухе. По времени пролета или по параметрам траекторий аэроионов

определяют их скорость дрейфа и подвижность [25, 32]. К приборам такого назначения относятся и спектрометры, описанные в разделе 5.1.

6.1.3. Спектр подвижности аэроионов

Самой полной характеристикой, представляющей электрическое состояние ионизованного воздуха, является спектр подвижности аэроионов. Математически это можно представить в виде дифференциальной функции распределения плотности заряда по подвижности:

$$g(k) = \lim_{\Delta k \rightarrow 0} \frac{g(k, k + \Delta k)}{\Delta k}, \quad (6.3)$$

где $g(k, k + \Delta k)$ — плотность заряда аэроионов определенной полярности в интервале подвижности от k до $k + \Delta k$.

В общем случае спектр аэроионов определяется как при отрицательных, так и положительных значениях подвижности. По практическим результатам можно оценить, что спектр аэроионов в приземном слое воздуха находится ориентировочно между абсолютными значениями 10^{-5} и $2,5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

В природных условиях, в приземном слое атмосферы, усредненный спектр подвижности аэроионов обладает определенной структурой (максимумами и минимумами) это дает основание для физической классификации аэроионов.

6.1.4. Классификация аэроионов

До недавнего времени аэроионов классифицировались по подвижности на легкие, средние, ионы Ланжевена (тяжелые) и ультратяжелые (многда приводились и более подробные подклассы) [35, 36]. Анализ результатов работ по спектрометрии подвижности последнего времени, а также теоретические соображения позволяют предложить видоизмененную классификацию [37-41].

Достаточно четко в спектре подвижности аэроионов выделяются две группы. Одна группа занимает диапазон приблизительно от $0,5$ до $2,5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Это — кластерные ионы. Химический состав кластерных ионов в приземном слое атмосферы пока недостаточно выяснен. Количество молекулярных ионов относительно мало, и нет общепринятого признака классификации ионов на молекулярные и

кластерные. Поэтому молекулярные ионы целесообразно включить в группу кластерных ионов, название которых следует принимать как условное в описанном смысле.

Другая группа ионов имеет менее определенные границы, ориентировочно от $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ см²/(В·с) /39/. Это – аэрозольные ионы. Подразделение аэрозольных ионов на средние, тяжелые и ультратяжелые условно. Частицы всех этих трех классов по своей физической природе есть частицы аэрозоля, и не существует физического принципа их подразделения по подвижности. Возможно подразделение аэрозольных ионов по способу приобретения заряда. Подавляющая доля аэрозольных ионов образована прилипанием кластерных ионов к частицам аэрозоля, а такие частицы могут быть названы вторичными аэрозольными ионами /41/.

Измерения в приземном слое показывают, что иногда появляется особая группа ионов между вышеуказанными двумя группами /38, 41, 42/. Механизм возникновения аэроионов этой группы пока недостаточно выяснен. Гипотеза о прилипании кластерных ионов к нейтральным частицам аэрозоля считается маловероятной /38/. По другой гипотезе, эта особая группа рождается благодаря нуклеации на ионах, т.е. другими словами – конденсацией определенных веществ на кластерных ионах, а ионы этой группы названы конденсационными ионами /38/. В более широком смысле их можно назвать первичными аэрозольными ионами /41/.

Ниже рассмотрены в основном кластерные ионы, и в меньшей мере – первичные и вторичные аэрозольные ионы.

6.1.5. Общие закономерности эволюции спектра подвижности аэроионов

Под действием излучения радиоактивных элементов и космического излучения в приземном слое атмосферы возникают положительные первичные ионы и свободные электроны. Последние за время порядка 10^{-8} с прилипают к нейтральным молекулам, образуя отрицательные первичные ионы. Первичные ионы участвуют во множестве ионно-молекулярных реакций и становятся кластерными ионами (ионными кластерами), которые либо прилипают к частицам аэрозоля, либо (в особых случаях) превращаются в частицы аэрозоля, либо рекомбинируют. Аэроионы постоянно подвержены диффузии, дрейфу и переносу.

С учетом только трех процессов (ионизации, рекомбинации и прилипания к частицам аэрозоля), можно вывести уравнение баланса кластерных аэроионов /35, 43/

$$\frac{dn_{\pm}}{dt} = q - \alpha n_{-}n_{+} - \beta n_{\pm}Z, \quad (6.4)$$

где q – интенсивность ионообразования,

α – коэффициент рекомбинации,

n_{\pm} – концентрации кластерных ионов той или другой полярности,

β – эффективный коэффициент прилипания к частицам аэрозоля,

Z – полная концентрация частиц аэрозоля.

Поскольку первичные ионы возникают парами и исчезают приблизительно с равными скоростями для обеих полярностей, то и концентрации n_{-} и n_{+} обычно приблизительно равны. Неравенство возникает вблизи земной поверхности из-за электродного эффекта /35/. По непосредственным измерениям в деревне Тахкузе, на высоте 5 м от земной поверхности, средние концентрации около 360 (n_{-}) и 400 см^{-3} (n_{+}) /38/. Эти значения пока наиболее представительны для сельской местности.

В литературе часто приводятся следующие ориентировочные численные значения для приземного слоя: $q = 10$ пар ионов $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$, $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$. Значения β и Z существенно зависят от характеристик аэрозоля. Размеры частиц аэрозоля охватывают широкий диапазон от единиц нанометра до десятков микрометра. От формы распределения (спектра) размеров частиц зависит коэффициент β . В первом приближении β пропорционален среднему радиусу частиц аэрозоля /44/. Средний радиус частиц изменчив, но в средних условиях тропосферы, для оценок можно принять $\beta \approx \alpha$ /44/. Полная концентрация Z сильно изменчива. По данным измерения ядер конденсации, в условиях сельской местности $Z = 10000 \text{ см}^{-3}$, в крупных промышленных городах – на порядок больше /45/.

6.2. Результаты измерения спектра подвижности аэроионов

6.2.1. Спектр подвижности кластерных ионов

За всю примерно столетнюю историю исследования аэроионов проведено значительное число измерений спектров подвижности ионов как в естественных условиях атмосферы, так и в контролируемых лабораторных условиях. В настоящем подразделе сосредоточим внимание на измерениях в естественных условиях. В общем, картина разнообразная – измерены разные участки спектра, с разными разрешающими способностями и с разными статистическими объемами. Характерные примеры можно найти в литературе [46, 47].

В области кластерных ионов одной из последних систематических работ является измерение спектра в относительно чистом сельском воздухе в деревне Тахкузе ЭССР [18, 48, 49]. Средние спектры подвижности ионов в диапазоне от 0,32 до 3,2 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ приведены на рис. 6.1. Указанный диапазон подвижности логарифмически однородно разбит на 10 интервалов. Ордината графика отвечает концентрации ионов в соответствующем интервале подвижности.

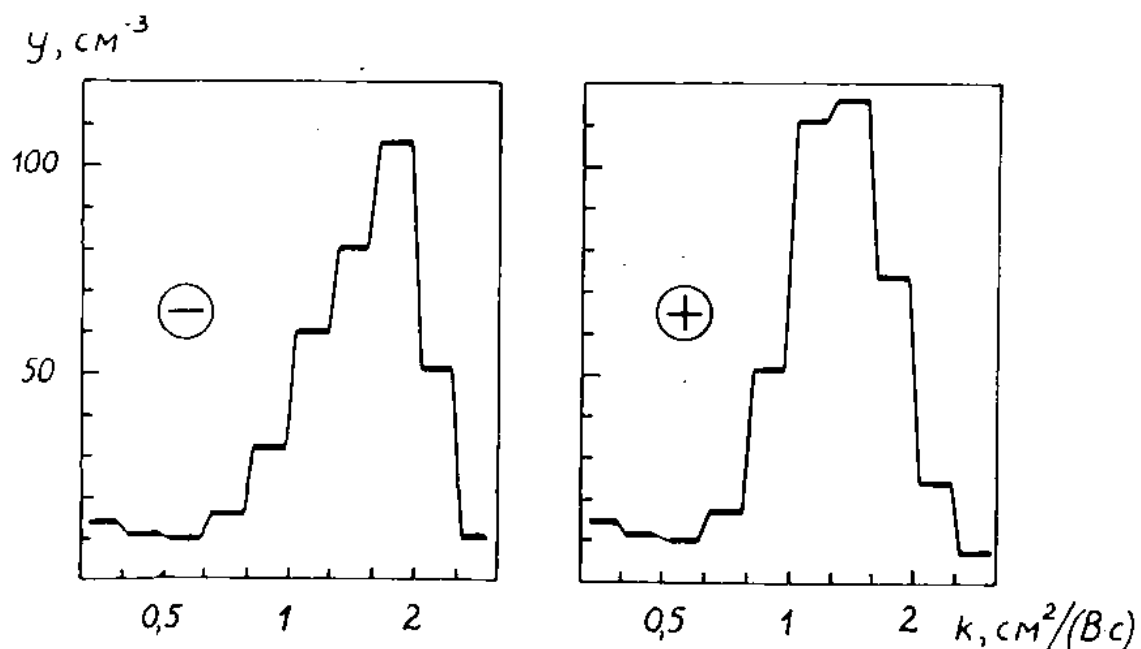


Рис. 6.1. Средние спектры подвижности аэроионов. На оси ординат фракционная концентрация.

Стандартное отклонение случайных ошибок измерения фракционных концентраций в отдельных среднечасовых спектрах порядка нескольких ионов в см^3 . Случайные ошибки в средних спектрах рис. 6.1 в десятки раз меньше. Однако не исключены заметные систематические ошибки. Одна возможная ошибка – остаточное аппаратное сглаживание спектра. Вполне вероятно, что положительный результат измерения в интервале с подвижностью выше $2,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ появляется только вследствие сглаживания, а таких ионов в естественных условиях приземного слоя нет. Результаты, указывающие на наличие высокоподвижных ионов в атмосфере, публиковались неоднократно, например, в работах /50-52/. Однако, во всех случаях не исключена возможность, что кажущееся наличие таких ионов является результатом низкой разрешающей способности аппаратуры и соответствующего сглаживания спектра.

В подавляющем большинстве спектров наблюдается минимум в районе $0,5-0,6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Минимум наблюдается также в средних спектрах (рис. 6.1).

Статистический анализ спектров показал, что концентрации двух разных спектральных фракций положительно скоррелированы, если подвижности обеих фракций или больше $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ или меньше этого значения. В других случаях существенной корреляции нет. Это явление можно объяснить различной физической природой ионов на обеих сторонах упомянутого значения. Значение подвижности $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ соответствует диаметру частицы ориентировочно 2 нм и массе 1500 а.е.м. Указанные значения согласуются с некоторыми другими данными о границе между кластерами и массивными частицами /53/.

Итак, можем резюмировать, что кластерные аэроионы в приземном слое атмосферы занимают диапазон приведенной подвижности от $0,5$ до $2,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Соответствующий диапазон диаметров от $0,85$ до 2 нм, а диапазон масс – от 40 до 1500 а.е.м. Среднегодовые средние значения приведенных подвижностей кластерных ионов были $\bar{k}_- = 1,56 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $\bar{k}_+ = 1,36 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Они соответствуют диаметрам $1,1$ и $1,15$ нм и массам 130 и 180 а.е.м. В литературе встречаются разные данные о средних подвижностях легких аэроионов, однако, при этом и методы измерений и условия измерений варьируются.

Специальным анализом доказано, что спектр подвижности кластерных ионов заметно зависит от состояния воздуха /18, 48/.

6.2.2. Зависимость спектра подвижности кластерных ионов от температуры

На наблюдательном пункте Тахкузе, кроме спектра подвижности аэроионов, зарегистрированы также температура, давление и относительная влажность воздуха; проанализированы данные измерений за годовой период /48/.

На рис. 6.2 приведены усредненные спектры для разных интервалов температуры. Поскольку изменение спектров при температурах ниже -4°C относительно слабое, то для этих температур представлен общий средний спектр, а для более высоких значений – по интервалам через каждые 6°C .

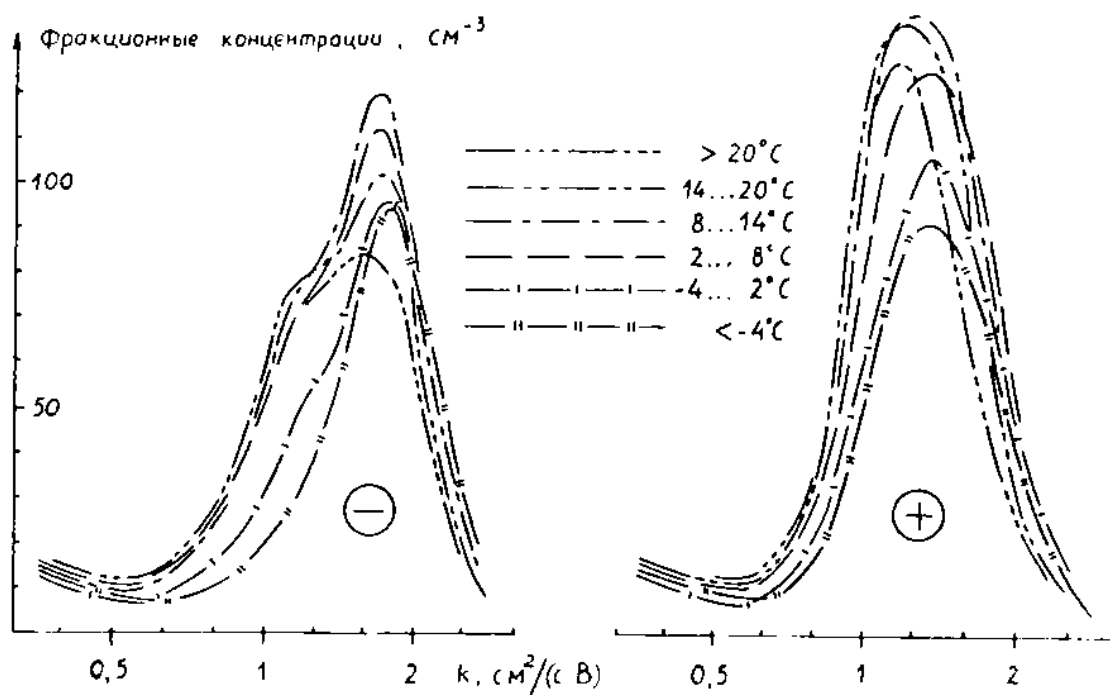


Рис. 6.2. Спектры подвижности аэроионов в разных интервалах температуры.

Как видно из рис. 6.2, с ростом температуры концентрация кластерных ионов в общем растет, а средняя приведенная подвижность – уменьшается. Спектр отрицательных кластерных ионов при этом заметно уширяется. Концентрации сначала растут с температурой, проходят максимум около $10-12^{\circ}\text{C}$ и начинают уменьшаться. Средние подвижности сначала почти постоянные, затем

уменьшаются с температурой. Соответствующие коэффициенты линейной корреляции $r_{k_{-}t} = -51\%$, $r_{k_{+}t} = -46\%$. Средняя приведенная подвижность кластерных ионов уменьшается приблизительно на 14% при росте абсолютной температуры на 10%. Это может быть объяснено ростом массы и размеров кластерных ионов по мере роста температуры.

Относительная ширина спектра отрицательных кластерных ионов растет приблизительно на 10% при росте абсолютной температуры на 10%, а в случае положительных аэроионов – почти постоянная. Асимметричной является также статистическая связь между относительной шириной спектра и средней подвижностью. В случае отрицательных аэроионов спектр уширяется с падением средней подвижности ($r_{s_{-}k_{-}} = -70\%$), а в случае же положительных аэроионов – связи нет ($r_{s_{+}k_{+}} = -4\%$).

Некоторым подтверждением правильности приведения подвижностей к нормальным условиям по формуле (6.6.) может являться то обстоятельство, что правые крылья спектров на рис. 6.2. достаточно хорошо совпадают. Аналогичное утверждение было выдвинуто и на основании результатов измерения спектров подвижности одnoseкундных аэроионов в природном воздухе /17/.

Сравнение настоящих результатов с результатами анализа летнего трехмесячного периода той же серии наблюдений /38/ показывает, что в летнее время в интервале температур от 0°C до 30°C приведенная средняя подвижность еще круче падает с ростом температуры, особенно в интервале от 0°C до 15°C.

На основании вышеприведенного материала можно заключить, что происходит укрупнение кластеров аэроионов с ростом температуры. Эта зависимость становится более крутой в области положительных температур, особенно – для летнего времени. Относительная ширина спектра размеров отрицательных кластеров увеличивается с ростом температуры.

Причины указанных температурных зависимостей пока не выяснены. Роль влажности воздуха кажется несущественной, что подтверждается следующими данными корреляционного анализа. Коэффициенты корреляции средних подвижностей k_{-} и k_{+} с абсолютной влажностью a отрицательные, но небольшие: $r_{k_{-}a} = -18\%$ и $r_{k_{+}a} = -11\%$. Эти коэффициенты могут скрывать косвенное влияние температуры. При элиминировании влияния температуры в предположении линейных регрессий, частные коэффициенты корреляции будут положительными: $r_{k_{-}a/t} = 15\%$, $r_{k_{+}a/t} = 25\%$.

Коэффициенты корреляции k с относительной влажностью R также положительны: $r_{k-R} = 39\%$, $r_{k+R} = 49\%$, что легко можно объяснить косвенным влиянием температуры.

Вероятно, при кластеризации аэроионов существенны какие-то микропримеси в воздухе, содержание которых скоррелировано с температурой. Температура, в свою очередь, скоррелирована с интенсивностью солнечной радиации, а также с активностью биологических процессов и человеческой деятельностью, которые могут быть рассмотрены, как гипотетические дополнительные факторы изменения состава воздуха.

7. ХАРАКТЕРИСТИКА АЭРОЗОЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХА

7.1. Атмосферные аэрозоли

Аэрозолем называется аэроколлоидная система составляющая смесь газов со взвешенными в ней частицами. В широком толковании аэрозолем можно считать всю приземную атмосферу. Все же наиболее частым является подход, когда под аэрозолем подразумевают совокупность взвешенных частиц в воздухе.

В предыдущей работе мы сосредоточимся в рассмотрении аэрозоля в приземном слое атмосферы. Каждый кубический сантиметр чистого атмосферного воздуха содержит 200–2000 аэрозольных частиц, каждый кубический сантиметр городского воздуха 500–150000 частиц. По размерам аэрозольные частицы покрывают широкую область от тысячных долей микрометра до нескольких десятков микрометров. Обычно их разделяют на три различные группы: большие ($d > 1$ мкм), субмикронные ($0,1$ мкм $< d < 1$ мкм) и мелкодисперсные ($d < 0,1$ мкм) аэрозоли. Последние в метеорологической литературе называют ядрами Айткена. Эти группы играют различную роль в образовании и поддержании аэрозольного состояния атмосферы.

Большие частицы попадают в воздух в результате процессов измельчения земли, морской воды и т.п. Их время жизни небольшое, т.к. они быстро оседают под действием гравитационной силы. Только в экстренных случаях (песчаные бури, извержения вулканов) их высокая концентрация поддерживается в течение нескольких дней. Число больших частиц не превышает 10 частиц в см³ даже в городском воздухе и составляет только 0,1–1% от числа всех частиц /54/. Зато их массовая доля в аэрозоле может составлять от 50% до 99%.

Мелкодисперсные частицы по количеству составляют более 90% всех частиц, по массе менее 20%. Они являются продуктами генерации аэрозоля в результате фотохимических реакций и гетерогенной или гомогенной конденсации вещества. Именно мелкодисперсные частицы являются индикаторами мощности генерации аэрозоля и загрязненности воздуха. Устойчивость мелкодисперсных частиц в атмосфере невысокая. Они постоянно рождаются, но быстро трансформируются в более крупные частицы скоагулируясь между

собой или оседаясь на крупных частицах.

Наиболее устойчивой среди всех частиц является группа субмикронных частиц. Это группа постоянно пополняется со стороны мелкодисперсных частиц но с другой стороны еще не охвачена интенсивным осаждением выводящим частицы из атмосферы. К этой группе, например, относится большинство дымов и туманов.

Таким образом, аэрозольные частицы лежат в огромном интервале размеров и не удивительно, что переход от нижнего предела к верхнему сопровождается не только изменением их физических свойств но даже изменением характера законов, выражающих эти изменения.

7.2. Методы описания аэрозольного состояния воздуха

7.2.1. Функции распределения частиц

Ввиду большой полидисперсности аэрозоля недостаточно его описание только через средний размер частиц. Распределение размеров частиц может быть выражено несколькими способами /55/. Можно задать долю dn числа частиц, радиусы которых лежат в пределах $(r, r+dr)$:

$$dn = n(r)dr \quad (7.1)$$

при условии

$$\int_0^{\infty} n(r)dr = 1, \quad (7.2)$$

или аналогично можно задать весовую долю dg частиц с радиусом $(r, r+dr)$:

$$dg = g(r)dr \quad (7.3)$$

при условии

$$\int_0^{\infty} g(r)dr = 1, \quad (7.4)$$

Тогда $n(r)$ и $g(r)$ называются дифференциальными функциями распределения размеров частиц или функциями плотности распределения соответственно по концентрации и по массе.

В некоторых случаях целесообразно пользоваться обобщенной функцией плотности распределения или спектром p -того порядка:

$$n_p(r) = r^p n(r) \quad (7.5)$$

где p положительное или отрицательное целое число. Так, например, при описании коагуляции частиц необходимо знать численное распределение размеров $n(r)$. Скорость испарения аэрозоля в каждый момент времени определяется линейным распределением размеров $rn(r)$. При описании рассеяния света большими частицами применяют квадратичное распределение размеров $r^2n(r)$ и т.п.

Наряду с дифференциальными распределениями применяют интегральные (кумулятивные) функции распределения. Они показывают, какая доля частиц (по счету или по весу) обладает радиусом больше или меньше данного радиуса r . Интегральные функции распределения получаем, например, для численного распределения путем интегрирования $n(r)$ от r до ∞ или от 0 до r :

$$N(r) = \int_r^{\infty} n(r) dr \quad \text{или} \quad N(r) = \int_0^r n(r) dr \quad (7.6)$$

Выбор того или иного способа выражения для распределения размеров частиц в аэрозолях зависит от того, какие свойства аэрозолей нужно характеризовать.

Существует множество конкретных формул для распределения $n(r)$. Большинство из них эмпирические, полученные на основе измерительных данных. Одним наиболее часто применяемым распределением является логарифмически-нормальное распределение выраженное формулой:

$$n(r) dr = \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right] d \ln r, \quad (7.7)$$

где $\ln r_g = \frac{\sum \ln r}{N}$, r_g - среднее геометрическое радиусов частиц. $(\ln \sigma_g)^2 = \frac{\sum (\ln r - \ln r_g)^2}{N}$ представляет собой среднее квадратичное отклонение логарифма радиусов. σ_g называется стандартным геометрическим отклонением.

В отличие от многих других это распределение имеет и теоретическое значение. Как показал Колмогоров /56/ в процессе дробления частиц по мере хода измельчения распределение размеров частиц стремится к логарифмически-нормальному.

7.2.2. Модели спектра атмосферного аэрозоля

Для описания стационарного распределения размеров атмосферного аэрозоля существует множество эмпирических и небольшое число теоретических моделей.

Исторически одной из первых была эмпирическая модель Юнге /57/, описывающая численную концентрацию частиц в диапазоне радиусов частиц $r > 0,1$ мкм как степенную функцию

$$n(r) \sim r^{-4} \quad (7.8)$$

Модель Юнге широко известна и ее с успехом применяют для описания спектра атмосферного аэрозоля.

Для такого же интервала радиусов ($0,1 < r < 20$ мкм) В.И. Смирновым /58/ получена теоретическая модель спектра размеров атмосферного аэрозоля в виде двух асимптот:

$$\varphi(r) = \begin{cases} \varphi_b(r) = 0,235 \left(\frac{\eta^P}{\xi kT} \right)^{1/2} r^{-5/2} & \text{для } r_0 \leq r \leq r^* \\ \varphi_g(r) = 0,573 \xi^{-1} \left(\frac{\eta^P}{g} \right)^{1/2} r^{-9/2} & \text{для } r^* \leq r \leq r_{\text{макс}}, \end{cases} \quad (7.9)$$

где η - вязкость среды, ξ - упругость частицы и $r^* = 1,56(kT/\xi g)^{1/4}$ найден из условия сшивания $\varphi_b(r^*) = \varphi_g(r^*)$. Модель получена в результате аналитического решения задачи стационарной броуновской коагуляции с учетом источника с узким спектром и гравитационного осаждения частиц. Модельный коагуляционный спектр представлен на рис. 7.1 и отличается от эмпирической модели, предложенной Юнге.

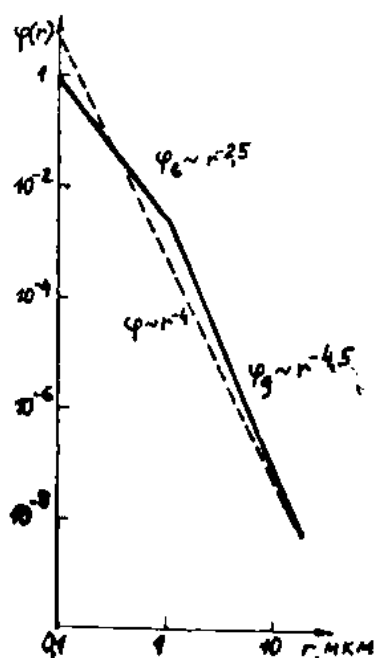


Рис. 7.1. Модели спектра размеров частиц атмосферного аэрозоля в диапазоне радиусов 0,1 – 20 мкм.

---- спектр Юнге,

— теоретический спектр В.И.Смирнова /58/.

Описанные модели не применимы в области мелкодисперсных частиц, где концентрация частиц по ним будет беспредельно расти.

Для описания распределения аэрозоля в широком диапазоне размеров можно пользоваться суммой логнормальных распределений (7.7)

$$N(r) = \sum n_s f_s(r) , \quad (7.10)$$

где n_s концентрация s -того слагаемого и $f_s(r)$ нормализованное логнормальное распределение. В литературе предложены трехмодальные модели спектра атмосферного аэрозоля представляющие собой сумму трех логнормальных распределений /59/.

В статье /60/ рассматриваются и сравниваются некоторые модельные распределения, предназначенные для описания тропосферного аэрозоля в широком диапазоне размеров. Выражения модельных функций $n_1(r) = r^n f(r)$ приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1.

Модельные распределения для тропосферного аэрозоля

Условное

обозначение: Выражение

МГ	$ar^\alpha \exp(-br^\beta)$
С1А	$ar^{-k} \exp(-br^{-s})$
С1Б	$a_1 (\hat{r}_1/r)^k \exp(k/s(1-(\hat{r}_1/r)^s))$
С2	$ar^{-k} \exp(-b/r-cr)$
KL0	$a/((r/r_x)^k + (r_x/r)^l)$
KL1	$a_1(k+1)/(1+(r/\hat{r}_1)^k + k(\hat{r}_1/r)^l)$
СМЕ	$a(\exp(-k r-\hat{r}_1 /r^{\nu'}) / (\hat{r}_1^{\nu'} + r-\hat{r}_1 ^{\nu*}))$

Анализ модельного распределения обычно начинается с изучения его асимптот. При этом учитываются некоторые теоретические и эмпирические предпосылки. Например, в теории Смолуховского коагуляционного роста частиц в условиях однородной нуклеации левая асимптота (малые размеры) следует степенному закону, а эмпирический закон Юнге указывает на степенную зависимость для правой асимптоты.

Краткие комментарии к распределениям, приведенным в табл.7.1., таковы.

МГ - широко известное модифицированное гамма-распределение. Оно имеет степенную левую асимптоту, но существенно отклоняется от закона Юнге на правом фланге.

С1А - подробно описано и проанализировано в работе /61/ В.И.Смирнова.

С1Б - получено из С1А элементарного преобразования набора параметров:

$$\hat{r}_1 = (bs/k)^{1/s}, \quad a_1 = a\hat{r}_1^{-k} \exp(-k/s). \quad (7.11)$$

При анализе вида кривой и точности аппроксимации распределения С1А и С1Б совпадают и обозначены С1. Различие двух вариантов проявляется только при анализе устойчивости.

CI получается из MГ путем инверсии знаков перед показателями степени. Поэтому показатели степени в выражениях MГ и CI должны быть рассмотрены как неотрицательные величины по определению. CI имеет степенную асимптоту на правом фланге, что позволяет рассмотреть его как обобщение закона Юнге.

Распределения MГ и CI как разновидности одного общего распределения, в котором показатели степени могут иметь ту или иную полярность, были определены в работе К.С.Шифрина /62/.

C2 предложено в работе /63/ В.И.Смирнова в качестве слагаемого составного распределения.

Распределения KLO и KL1 связаны между собой таким же образом, как CIA и CIB. Общее их обозначение – KL.

Преобразование набора параметров следующее:

$$\hat{r}_1 = (1/k)^{1/(k+1)} r_x, \quad a_1 = a_1^{1/(k+1)} k^{k/(k+1)} / (k+1). \quad (7.12)$$

Л.Г.Махоткин /64/ предложил следующую оценку среднего спектра тропосферного аэрозоля:

$$n_1(r) = \frac{r^{0,5}}{1 + br^{3,5}} \quad (7.13)$$

которая является хорошим приближением оценки В.А.Смеркалова, представленной в более сложной форме /65/. KL – распределение может быть рассмотрено как обобщение распределения (7.13).

Модельное распределение CME введено в работе /65/. Предложенное в представлении CME выражение среднего спектра тропосферного аэрозоля нашло признание, однако известных применений самого модельного распределения как орудия аппроксимации наблюдений нет, что объясняется явным математическим неудобством модели.

7.2.3. Геометрические и аналитические свойства KL-модели

KL-распределение имеет степенные асимптоты как на левом, так и на правом флангах. Все параметры распределения имеют простую интерпретацию при графическом изображении кривой $n_1(r)$ в логарифмической координатной сетке, что показано на рис. 7.2.

Моменты распределения существуют при условии $-1 < q < k$ и они выражаются в элементарных функциях.

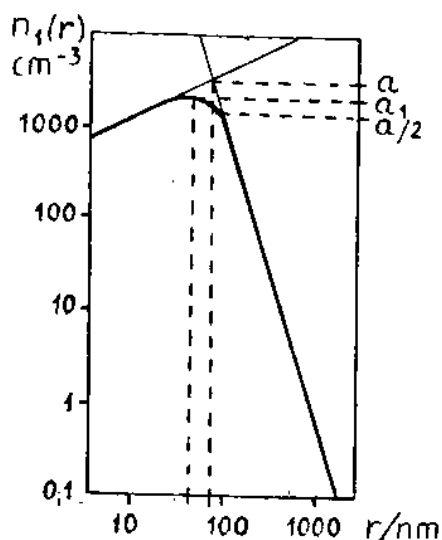


Рис. 7.2. KL- распределение. a, r_x - координаты точки пересечения асимптот, a_1, r_x - координаты точки максимума $n_1(r)$, l - крутизна подъема левой асимптоты, k - крутизна спада правой асимптоты. Значения параметров соответствуют табл. 7.1.

Распределение KL_1 определено при $k > 0$ и $l > 0$. Область определения распределения KL_0 ограничивается только условием $k+1 > 0$. В практике это - существенное преимущество варианта KL_0 , поскольку нередко встречаются эмпирические распределения, хорошо аппроксимируемые распределением KL при отрицательных значениях параметра l .

В физике атмосферы KL -распределение может быть использовано в диапазоне радиусов от нескольких нанометров до верхнего предела применимости закона Юнге.

Модельные распределения приведенные в табл. 7.1. были сравнены по своим качественным и количественным характеристикам: по аналитической сложности модели, по ее познавательной ценности, по устойчивости, точности и вычислительной сложности. Наилучшим из рассматриваемых распределений оказалось KL -распределение.

7.2.4. Кусочно-линейная модель спектра

Остановимся еще на одной модели спектра, предложенной Тамметом в /31/ и применяемой в электрическом спектрометре аэрозоля Тартуского университета (ЭСА ТУ) /66/.

Спектр описывается при помощи функции плотности распределения $\varphi = \varphi(x)$.

Для определения кусочно-линейной функции необходимо выбирать $n+2$ узлов аргумента спектра $x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n+1}$. Интервал между крайними узлами x_0 и x_{n+1} должен полностью охватить тот интервал аргумента, в котором нельзя принимать априорное допущение $\varphi(x) = 0$. Это условие позволяет нам договориться, что

$$\varphi(x_0) = \varphi(x_{n+1}) = 0. \quad (7.14)$$

Определим n элементарных спектров $\varphi^1(x), \varphi^2(x), \dots, \varphi^n(x)$ следующим образом

$$\varphi^i(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_{i-1} \\ (x - x_{i-1}) / (x_i - x_{i-1}) & \text{при } x_{i-1} < x \leq x_i \\ (x_{i+1} - x) / (x_{i+1} - x_i) & \text{при } x_i < x < x_{i+1} \\ 0 & \text{при } x_{i+1} \leq x \end{cases} \quad (7.15)$$

Тогда произвольная кусочно-линейная функция, удовлетворяющая условию (7.14), разлагается по элементарным спектрам

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i \varphi^i(x), \quad (7.16)$$

причем множители φ_i равны значениям спектральной функции в узлах

$$\varphi_i = \varphi(x_i). \quad (7.17)$$

Описанная модель спектра иллюстрируется рис. 7.3.



Рис. 7.3. Кусочно-линейный спектр и элементарный спектр.

Элементарные спектры (7.15) нормированы по амплитуде и не нормированы по интегралу. Интеграл через элементарный спектр будет

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^i(x) dx = (x_{i+1} - x_{i-1})/2 \quad (7.18)$$

В случае нормирования элементарных спектров по интегралу мы потеряли бы свойство (7.17).

Кусочно-линейная модель имеет следующее полезное в спектрометрии свойство:

значения спектральной функции всюду неотрицательны тогда и только тогда, когда все множители разложения (7.16) неотрицательны.

Это свойство обеспечит эквивалентность требований неотрицательности проявления непрерывного спектра $\varphi(x)$ и конечномерного спектра $\{\varphi_i\}$. Волнистые скобки указывают, что рассматривается множество всех элементов φ_i . Попытка кусочно-линейного приближения конкретной функции распределения по размерам $f(r)$ не увенчается легким успехом. Здесь приходится искать некоторое преобразование координат, которое придавало бы спектральным кривым желаемые свойства.

Согласно Юнге /45/ грубая фракция атмосферного аэрозоля ($r > 0,1$ мкм) подчиняется закону $f(r) \sim 1/r^4$. Поэтому целесообразно использовать следующее преобразование

$$\begin{cases} x = 1/r \\ \varphi(x) = g(r) \end{cases} \quad (7.19)$$

Согласно закону Юнге при $x \rightarrow 0$ наблюдается $\varphi(x) \sim x$, что и необходимо для того, чтобы получить возможность выбрать крайним узлом $x = 0$ при соблюдении условия (7.14).

Примем для элементарного спектра в шкале x выражение (7.15). Тогда элементарный спектр в шкале размеров будет следующий:

$$g^i(r) = \begin{cases} 0 & \text{при } r_{i-1} \leq r \\ r_i(r_{i-1}/r - 1)/(r_{i-1} - r_i) & \text{при } r_i \leq r \leq r_{i-1} \\ r_i(1 - r_{i+1}/r)/(r_i - r_{i+1}) & \text{при } r_{i+1} \leq r \leq r_i \\ 0 & \text{при } r \leq r_{i+1} \end{cases} \quad (7.20)$$

Рассмотрим теперь интервал размеров между двумя соседними узлами r_{i+1} и r_i в которых функция $\varphi(x)$ принимает значения φ_{i+1} и φ_i , а функция $g(r)$ — значения g_{i+1} и g_i . Согласно принятой модели внутри интервала

$$\varphi(x) = \left[(x_{i+1} - x) \varphi_i + (x - x_i) \varphi_{i+1} \right] / (x_{i+1} - x_i), \quad (7.21)$$

откуда

$$g(r) = \frac{r_i r_{i+1}}{r_i - r_{i+1}} \left[\left(\frac{1}{r_{i+1}} - \frac{1}{r} \right) g_i + \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_i} \right) g_{i+1} \right], \quad (7.22)$$

Путем интегрирования выражения $r^{-3}g(r)$ легко вычислить фракционную численную концентрацию частиц

$$n(r_{i+1}, r_i) = \frac{r_i - r_{i+1}}{6 r_i^2 r_{i+1}^2} \left[(r_i + 2 r_{i+1}) g_i + (2 r_i + r_{i+1}) g_{i+1} \right]. \quad (7.23)$$

Эта формула связывает наиболее известную в аэрозольной спектрометрии фракционную модель численной концентрации с кусочно-линейной моделью функции $g(1/r)$.

В аэрозольном спектрометре ЭСА ТГУ спектр получается в виде набора 12 фракционных численных концентраций частиц. Измерительный предел покрывает радиусы частиц от 0,005 мкм до 5 мкм. Узловые радиусы начинаются с 0,005 мкм и выбраны по закону

$$r_i = r_{i-1} \sqrt[4]{10}, \quad (7.24)$$

где $i = 2 \dots 13$.

7.3. Аэрозольное состояние приземного атмосферного воздуха

7.3.1. Типичные спектры атмосферного аэрозоля.

Аэрозольное состояние воздуха данной местности в большой мере определено географическим положением местности. В результате многочисленных измерений различных исследователей становлены типичные аэрозольные спектры типичных местностей, некоторые из них приведены на рис. 7.4. /67/ и 7.5 /68/. По ним видно, что аэрозоли большого города (1) и пустыни (5), удаленного континентального (3) или полярного (4) региона существенно отличаются друг от друга и по виду спектра и по уровню концентрации частиц.

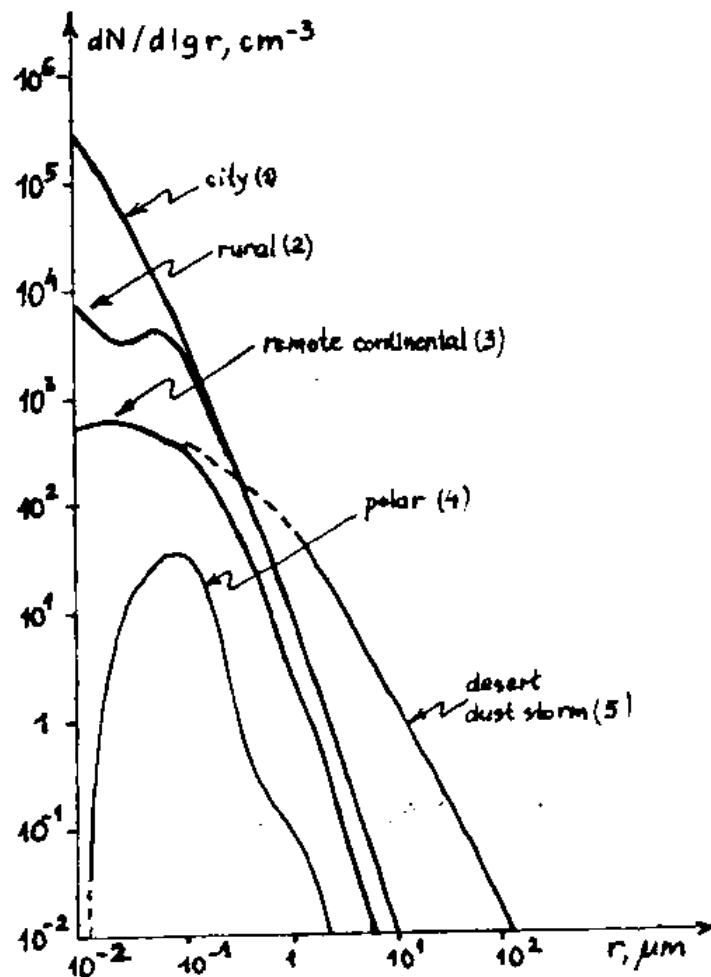


Рис. 7.4. Типичные спектры атмосферного аэрозоля /67/.

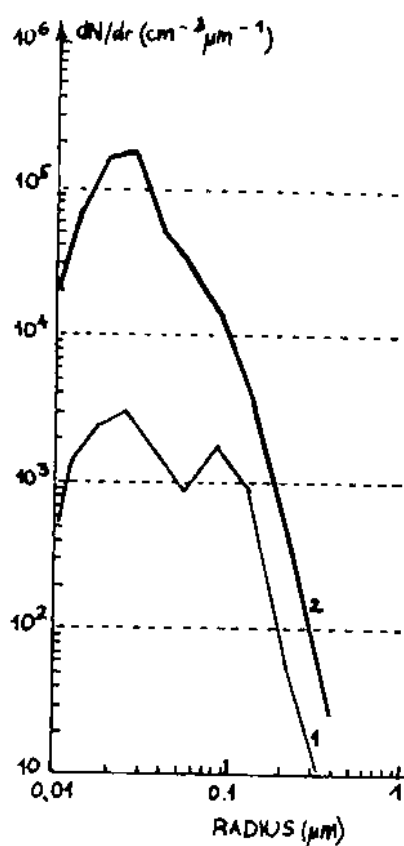


Рис. 7.5. Средние спектры аэрозоля над Атлантическим океаном /68/.

- 1 - аэрозоль с многосуточной предысторией над океаном,
2 - аэрозоль, происходящий с континента.

Все спектры близки друг другу в области размеров больше 0,1 мкм. Существенное различие формы спектров наблюдается в мелкодисперсной области, где происходит генерация новых частиц. Над океаном и полярным льдом, где интенсивность генерации аэрозоля наименьшая, наблюдается общая маленькая концентрация частиц и резкое убывание левой части спектра. В то же время мелкодисперсная часть спектра городского аэрозоля сильно поднята и концентрация частиц в городе на несколько порядков выше концентрации естественного природного аэрозоля.

Спектры, приведенные на рис. 7.5 измерены Хоппелем с сотрудниками /68/ на Атлантическом океане. Обращаем внимание на существенное различие в спектрах чисто-морского аэрозоля, находившегося над океаном 8-10 дней -1 и аэрозоля, несущегося с континента -2.

Аэрозольный спектр конкретной местности образуется как

комбинация типичных спектров. Он устанавливается содействием дальнего переноса, вертикального и турбулентного перемешивания воздуха и локальных источников.

7.3.2. Средние спектры аэрозоля приземного слоя над сушей

В дальнейшем рассматриваются спектры аэрозоля в диапазоне радиусов частиц от 0,005 мкм до 5 мкм измеренные электрическим спектрометром ЭСА ТУ.

Они получены во время четырех измерительных циклов с длительностью 7-10 суток каждый и объемом 1600-2200 спектров измеренных через каждые 5 минут. Измерения проведены в Эстонии в городе Тарту (зимой и летом) и в сельской местности Вооре, а также поблизости Москвы в дачном районе города Звенигорода.

На рис. 7.6. представлены средние спектры в виде гистограмм 12 фракционных численных концентраций частиц. Отдельно выведены средние спектры дневного (от восхода до восхода солнца) и ночного времени. На гистограммах приведены средние суммарные концентрации частиц (от 0,01 до 10 мкм) за дневное и ночное время.

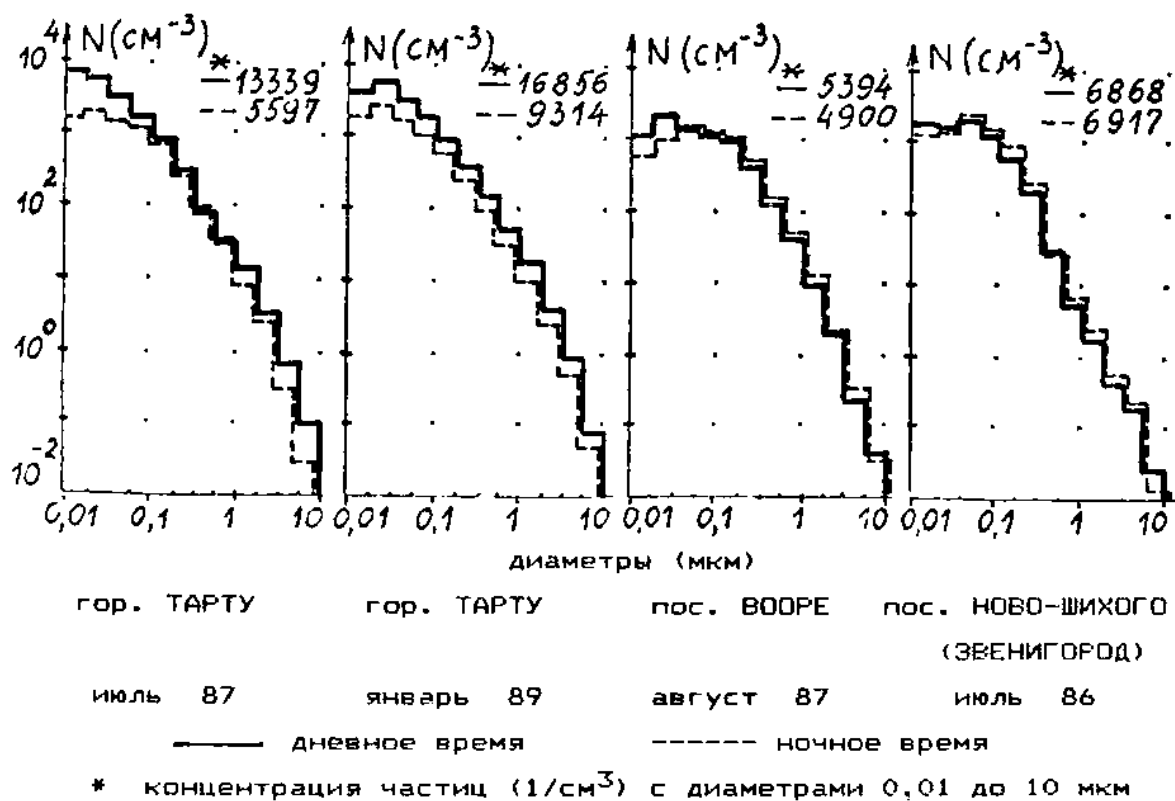


Рис. 7.6. Средние спектры численной концентрации атмосферного аэрозоля.

Средние спектры ночного и дневного времени отличаются друг от друга во всех местностях. Сравнение между собой дневных спектров различных местностей показывает, что городской аэрозоль отличается от сельского повышенной на 2-3 раза суммарной концентрацией частиц, а также сильно поднятой областью мелкодисперсных частиц.

Сравнение спектров городского аэрозоля зимой и летом показывает особо интенсивную генерацию в первой фракции частиц летом и спектр наиболее "устарелого" аэрозоля с максимумом во второй фракции зимой. Среднесуточные суммарные концентрации аэрозоля летом и зимой мало отличаются друг от друга (см. табл. 7.4). Разность в двух сельских спектрах (Вооре и Звенигород) невелика. Общая концентрация частиц в Звенигороде немного превышает концентрацию в Вооре, что по-видимому отражает близость Москвы. В спектрах сельского аэрозоля первая фракция понижена по сравнению со второй и третьей, характеризуя более слабую генерацию аэрозоля по сравнению с городом.

Итак, можно сделать вывод, что полученные средние спектры характерны для данной местности и что в образовании спектра городского аэрозоля первую роль играет локальный источник частиц т.е. продукты городской жизни.

7.3.3. Аппроксимация спектров с модельными распределениями

Была изучена применимость некоторых модельных распределений для аппроксимации измеренных спектров. 15-минутные средние спектры Вооре и Тарту 87 были аппроксимированы модельным KL-распределением:

$$n_1(r) = \frac{a}{\left(\frac{r}{r_x}\right)^k + \left(\frac{r_x}{r}\right)^l} \quad (7.25)$$

Полученные средние параметры KL-распределения приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2.

Средние параметры KL-распределения для Тарту 87 и Вооре

Спектр	% спектров подающихся аппроксимации	Параметры			
		a	r_x	k	l
Тарту 87	100%	11882	36	2,0	0,6
Вооре	94%	6929	51,5	2,2	1,7

Результаты утверждают хорошую применимость KL-распределения для описания спектров атмосферного аэрозоля. Через параметры KL-распределения также явно как при сравнении гистограмм выражены различия городского и сельского аэрозоля в мелкодисперсной области.

В диапазоне радиусов $r > 0,1$ мкм была проведена аппроксимация средних спектров с функцией $\varphi(r) = ar^b$. В таблице 7.3. представлены результаты аппроксимации и сравнение их с параметрами модельных распределений В.И.Смирнова (7.9), Юнге (7.8) и KLO (7.23).

Таблица 7.3.

Аппроксимация средних спектров функцией $\varphi(r) = ar^b$

Спектр	Функция параметр	$\varphi(r) = ar^b$		KLO	
		b		k	
		Пределы радиуса в мкм			
		0,1-10	0,1-1	1-10	>0,1
Вооре		-3,48	-2,8	-4,2	3,2
Тарту 87		-3,19	-2,9	-4,0	3,0
Тарту 89		-3,24	-2,7	-4,1	
Смирнов			-2,5	-4,5	
Юнге		-4			

Параметр k в табл. 7.3. отличается от того же параметра в табл. 7.2. на единицу в результате применения другой шкалы аргумента.

Видно, что в этой области спектра параметры слабо варьируются в зависимости от местности и что двухасимптотическая модель В.И.Смирнова лучше других описывает измеренные спектры.

7.3.4. Вариативность и устойчивость атмосферного аэрозоля

Аэрозольная ситуация в данный момент времени определяется очень многими факторами (неоднородность источников аэрозоля, поле температуры и скоростей ветра, турбулентное перемешивание и т.п.) Временная изменчивость атмосферного аэрозоля большая и поэтому некоторые авторы считают наилучшим стохастическое описание аэрозольного состояния /69/.

С другой стороны, многочисленные измерения показывают относительную устойчивость и регулярность изменений спектра аэрозоля данной местности. Это подтверждается, впрочем, и возможностью аппроксимировать измеренные спектры стационарными модельными спектрами.

В таблице 7.4. представлены средние спектры фракционных численных концентраций и их вариации (стандартное отклонение деленное на среднюю величину фракции). Приведены пределы фракции в мкм и под названиями мест измерения, число обработанных спектров.

Вариации фракционных концентраций зависят от размера фракции имея наименьшую величину 0,5-0,7 в области диаметров 0,1-0,5 мкм и достигая величину 0,9-1,1 для самых маленьких и самых больших фракций. В среднем вариации спектра в городе превышают вариации в сельской местности.

Была изучена временная устойчивость аэрозоля корреляционным анализом временных рядов фракционных концентраций /70/. На рис. 7.7. приведены автокорреляционные функции фракционных концентраций $\gamma_{N_i N_i}(t)$ рассчитанные на базе данных Звенигорода.

Таблица 7.4.

Средние спектры численных концентраций Ni (см^{-3})
и их вариации σ/Ni

N	Пределы фракций d (мкм)	Звенигород (1660)		Вооре (1600)		Тарту 87 (1695)		Тарту 89 (2128)	
		Ni	σ/Ni	Ni	σ/Ni	Ni	σ/Ni	Ni	σ/Ni
1	0,010-0,018	1464	1,11	625	1,93	3688	0,94	2685	0,95
2	0,018-0,032	1592	0,75	1144	1,35	3584	0,91	3852	0,82
3	0,032-0,056	1744	0,61	1191	0,68	2074	0,80	2405	0,68
4	0,056-0,100	1196	0,66	985	0,50	1210	0,79	1345	0,70
5	0,10 -0,18	625	0,53	763	0,60	600	0,74	731	0,75
6	0,18 -0,32	199	0,62	327	0,68	217	0,67	295	0,87
7	0,32 -0,56	26	0,78	102	0,66	62	0,68	112	0,85
8	0,56 -1,0	4,3	0,73	35	0,64	23	0,79	39	0,75
9	1,0 - 1,8	1,9	0,60	8,7	0,68	9,8	0,88	13,2	0,78
10	1,8 - 3,2	0,5	0,60	1,4	0,63	2,7	0,69	3,1	0,59
11	3,2 - 5,6	0,20	0,65	0,27	0,66	0,55	0,76	0,61	0,87
12	5,6 -10,0	0,01	3,07	0,03	1,11	0,05	0,92	0,06	1,09
	0.01-10	6884	0,62	5207	0,66	11610	0,78	11484	0,79

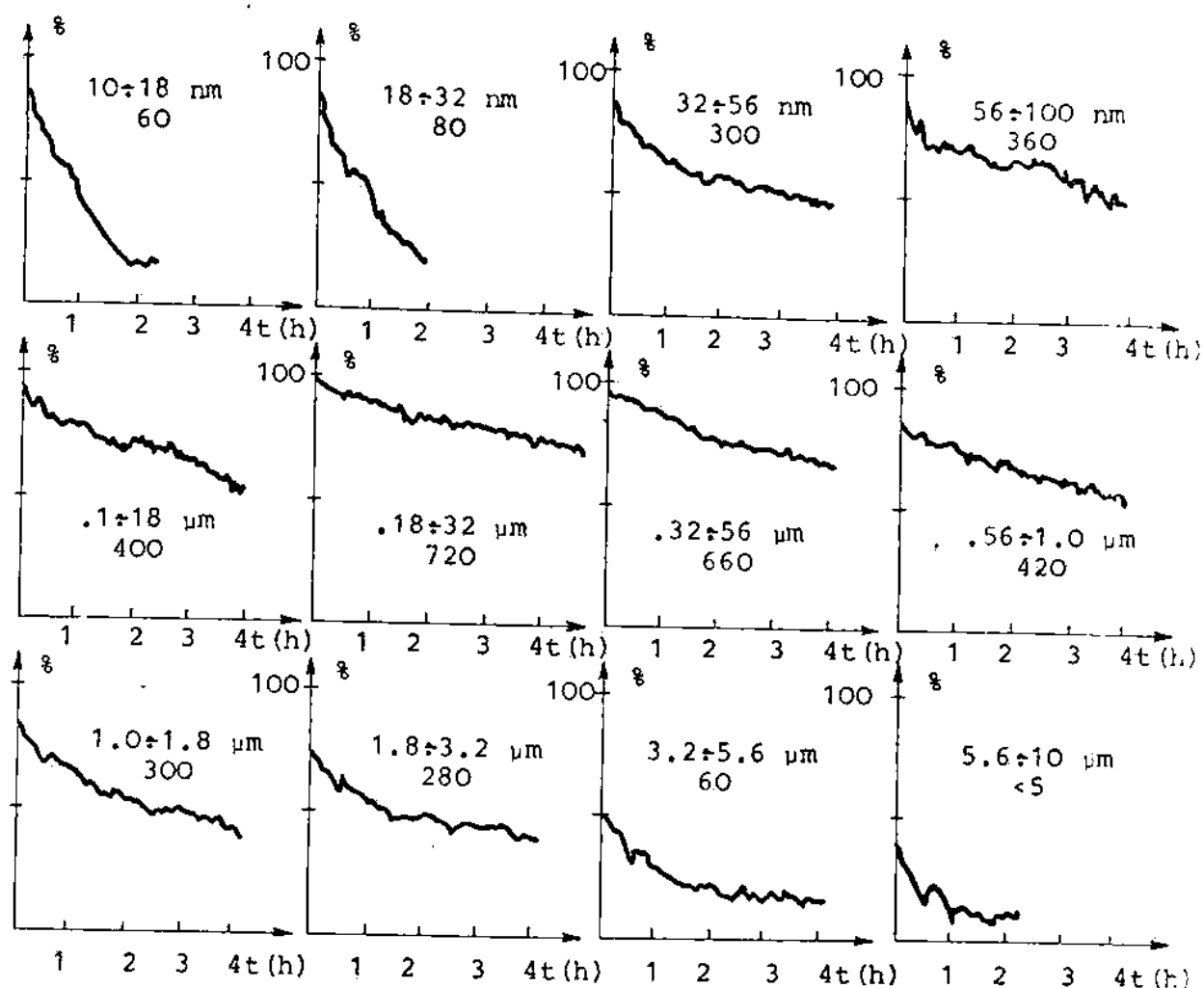


Рис. 7.7. Автокорреляционные функции
 фракционных концентраций $r_{NiNi}(t)$.

Приблизительно такой же характер они имеют во всех наблюдаемых местностях.

В ходе автокорреляционных функций $r_{NiNi}(t)$ (рис.7.7.) можно выделить три характерного временного масштаба: 1) 1–15 минут, в течение которых корреляционные функции быстро падают; 2) 100–200 минут с умеренным наклоном и 3) более 120 минут с очень медленным спадом корреляционных функций. Такое поведение автокорреляционных функций может быть объяснено действием трех типов относительно независимых между собой процессов формирования аэрозольного состояния с соответствующими временами автокорреляции.

Быстрое убывание $r_{NiNi}(t)$ вызвано мелкомасштабным турбулентным перемешиванием в неоднородном аэрозольном поле. Наибольшая неоднородность — в области крупных фракций, где большую роль играет седиментация, и наименьшая — в области субмикронной части аэрозоля, где аэрозольное состояние наиболее стабильное. В функцию $r_{NiNi}(t)$ некоторый вклад вносят и погрешности измерения самого спектрометра, но выделить это отдельно в данном случае не представляется возможным.

Второй временной масштаб характеризует крупномасштабную турбулентность и действие ветра, которые "затемняют" процессы генерации и эволюции аэрозоля.

Два быстрых процесса проходят синфазно во всех фракциях, и их следует связывать переносом частиц вследствие турбулентности атмосферы. Оставшийся медленный компонент, по всей вероятности, отражает эволюцию спектра вследствие нуклеации, диффузии, конденсации, коагуляции и седиментации частиц.

Были определены времена релаксации τ_i автокорреляционных функций, рассматриваемые как характеристики устойчивости аэрозольных фракций [70]. На рис. 7.8 приведена зависимость τ_i от размера аэрозоля.

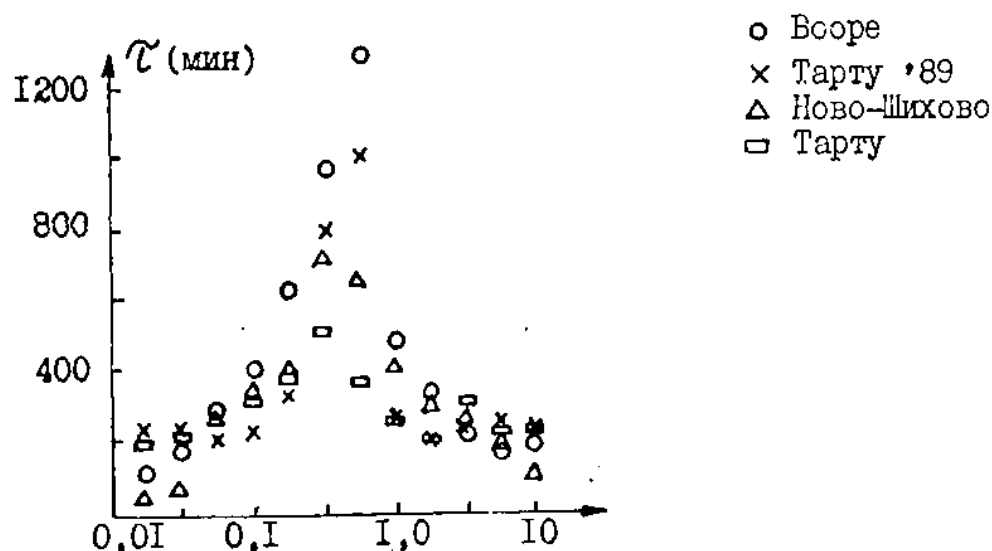


Рис. 7.8. Зависимость устойчивости аэрозольной фракции (характеризуемой через τ_i) от размера аэрозоля.

Наиболее устойчивыми являются фракции в промежутке диаметров частиц от 0,2 : 0,6 мкм, устойчивость уменьшается в обе стороны от этой области размеров частиц. Зависимости $\tau(d)$ близки для

различных местностей и по своему ходу совпадают с теоретическими оценками /67/.

7.3.5. Суточные изменения аэрозольного состояния атмосферы

В течение суток происходят определенные изменения и в концентрации частиц и в форме спектра атмосферного аэрозоля. По данным различных авторов полученным в различных местностях /71, 72, 73/ можно считать регулярным следующий ход состояния континентального аэрозоля: минимальная концентрация в ночные часы (2-4 часа), резкое повышение ее после восхода солнца приводящее к установлению дневного максимума. Во время увеличения концентрации частиц левая сторона аэрозольного спектра как правило поднимается. Дальше - в послеполуденное и вечернее время - подобной регулярности хода концентрации аэрозоля обнаружить нельзя.

На рис. 7.9. приведены суточные ходы численных и объемных концентраций аэрозоля измеренных с ЭСА ТУ.

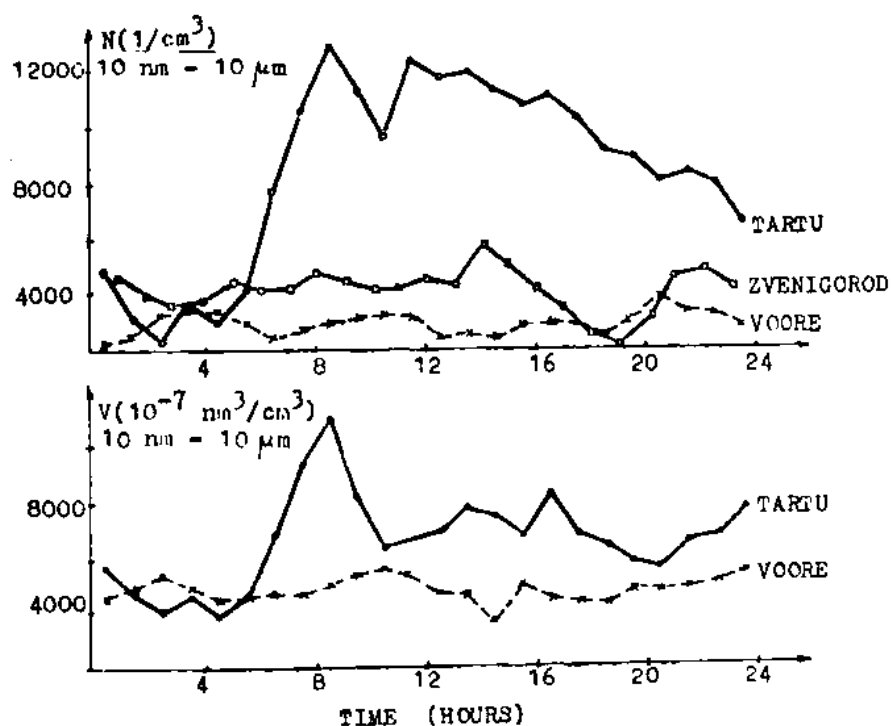


Рис. 7.9. Средние суточные ходы численной и объемной концентраций аэрозоля.

Средний суточный ход численной концентрации в сельской местности (Вооре, Звенигород) слабо выражен, но все же наблюдается утренний подъем и дневной максимум концентрации. Затем последует спад и новый вечерний подъем. Ход численной концентрации городского аэрозоля (Тарту) явно следует ходу интенсивности городской жизни, что показано и в работе /74/.

Средний суточный ход объемной концентрации частиц в общих чертах следует ходу численной концентрации. Следовательно, прибавляющаяся в аэрозоль масса распределяется по спектру по стационарному закону. Только вечером наблюдается ситуация, где понижение численной концентрации сопровождается повышением объемной, то есть в спектре повышается доля больших частиц.

Таким образом, в аэрозольном состоянии континентального воздуха наблюдаются регулярные суточные тренды, которые должны учитываться при изучении вариативности аэрозоля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Таммет Х.Ф. Зависимость спектра подвижностей легких аэроионов от микропримесей воздуха // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1975. - Вып. 348. - С. 3-15.
2. Ихер Х.Р., Сальм Я.Я., Миллер Ф.Г. Реакция спектра подвижности легких аэроионов на вещества, выделяющиеся при нагревании изоляционных материалов проводов // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1983. - Вып. 648. - С. 26-31.
3. Reiter, R. Fields, currents and aerosols in the lower troposphere. - New Delhi, 1985. - 714 p.
4. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 288 с.
5. Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. - М.: Наука, 1976. - 736 с.
6. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. - М.: Наука, 1987. - 319 с.
7. Кузнецов П.И., Пчелников Л.А. Последовательное обучение систем диагностики. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 112 с.
8. Таммет Х.Ф. Введение в линейную конечномерную теорию спектрометрии. - Таллин: Валгус, 1975. - 100 с.
9. Schildt, H. C: The complete reference. - Berkeley: McGraw-Hill, 1987. - 773 p.
10. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применения. - М.: Наука. - 1968. - 548 с.
11. Dwyer P.S., Waugh F.V. On errors in matrix inversion // J. Amer. Stat. Assoc. - 1953. - Vol. 48. - P. 289-319.
12. Якубовский С.В. и др. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы. Справочное пособие. - М.: Радио и связь, 1985.
13. Pihlaur, J. Digitaalelektroonika kasiraamat: Integraalsed loogikaelemendid. - Tallinn: Valgus, 1985.
14. Нефедов А.В., Савченко А.М., Феоктистов Ю.Ф. Зарубежные интегральные микросхемы для промышленной электронной аппаратуры. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 288 с.
15. Дао Л. Программирование микропроцессора 8088. - М.: Мир, 1988.
16. Шураков В.В. Надежность программного обеспечения систем обработки данных. - М.: Статистика, 1981. - 216 с.

17. Таммет Х.Ф., Ихер Х.Р., Миллер Ф.Г. Спектр подвижности односекундных легких аэроионов в природном воздухе // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1985. - Вып. 707. - С. 26-36.
18. Хыррак У.Э., Таммет Х.Ф., Ихер Х.Р., Сальм Я.Я. Зависимость спектра аэроионов от ветра (по измерениям в Тахкузе в 1985 году) // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1988. - Вып. 809. - С. 79-86.
19. Сальм Я.Я. Десятиканальный спектрометр аэроионов // Методы и приборы биоинформации и контроля параметров окружающей среды. Межвуз. сб. - Вып. 150. - Л.: ЛЭТИ, ЛИАП, 1981. - С. 34-38.
20. Мирме А.А. Гранулометр аэрозоля на линии с мини-ЭВМ "Электроника ДЗ-28" // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1982. - Вып. 631. - С. 111-118.
21. Таммет Х.Ф. и др. Аппаратура и методика спектрометрии подвижностей легких аэроионов // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1987. - Вып. 755. - С. 18-28.
22. Миллер Ф.Г. К разработке электрометров прямого усиления для многоканальных спектрометров аэроионов // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1981. - Вып. 588. - С. 124-132.
23. Устройство для определения спектра аэроионов: А.с. 938336 СССР, Н 01J39/36/ Я.Я.Сальм; Заявл. 14.11.80; Опубл. 23.06.82; Бюл. N 23.
24. Сальм Я.Я. Модификация дифференциального спектрометра аэроионов // Методы и приборы контроля параметров биосферы. Межвуз. сб. - Вып. 171. - Л.: ЛИАП, 1984. - С. 6-9.
25. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1967. - Вып. 195 - С. 1-232.
26. Таммет Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1980. - Вып. 534. - С. 55-79.
27. Стернзат М.С. Метеорологические приборы и измерения. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 392 с.
28. Автоматическая станция КРАМС / Под ред. Л.П.Афиногенова и М.С.Стернзата. - Л.: Гидрометеиздат, 1974. - 218 с.
29. Гордюк В.П. Исследование принципов построения приборов... // Тр. ГГО. - 1981. - Вып. 442. - С. 96-102.
30. Бернотас Т.П. и др. Система сбора и обработки данных в спектрометрии аэрозолей и аэроионов // Уч. зап. Тарт. ун-та. - 1985. - Вып. 707. - С. 46-53.

31. Таммет Х.Ф. Кусочно-линейная модель спектра в ионизационных и аэрозольных измерениях // Уч. зап. Тарт. ун-та. 1986. Вып.534.- С. 45-54.

32. Мак-Даниель И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах.- М.: Мир, 1976.

33. Thomson, J.J., Thomson, G.P. Conduction of Electricity Through Gases.- Cambridge: University Press, 1928.

34. Tammet, H. Fair-weather electricity on ground level // Proc. 8th Intern. Conf. Atmos. Electr. Uppsala.- Uppsala, 1988.- P.21-30.

35. Israëli, H. Atmosphärische Elektrizität.- T.1. Leipzig: Akad. Verlagsges. Geest & Portig K.- G., 1957.

36. Тверской П.Н. Атмосферное электричество.- Л.: Гидрометеоиздат, 1949.

37. Misaki, M. Studies on Atmospheric Ion Spectrum (II) // Papers in Meteorological and Geophysics.- 1961.- Vol.12, No 3-4.- P.261-276.

38. Таммет Х.Ф., Икер Х.Р., Сальм Я.И. Спектр атмосферных ионов в диапазоне подвижности $0,32 - 3,2 \text{ см}^2/\text{Всек}$ // Уч. зап. Тарт. ун-та - 1987.- Вып.755.- С.29-46.

39. Сальм Я.И. Распределение полярной плотности заряда тропосферных тяжелых аэроионов по подвижности. // Изв. АН СССР, ФАО.- 1988.- Т.24, No 5.- С.561-563.

40. Salm, J. The average mobility spectrum of large air ions of the troposphere // Res. Lett. Atmos. Electr. (Japan).- 1988.- Vol.8, No.1.- P.21-24.

41. Tammet, H., Salm, J., Luts, A., Iker, H. Mobility spectra of air ions // Proc. VIII Intern. Conf. Atmos. Elect. Uppsala.- Uppsala, 1988.- P.147-151.

42. Tammet, H., Salm, J., Iker, H. Observation of condensation on small air ions in the atmosphere. // Lecture Notes in Physics.- No 309.- Berlin etc.: Springer, 1988.- P.239-240.

43. Hoppel, W.A. Ion-Aerosol Attachment Coefficients, Ion Depletion, and the Charge Distribution on Aerosols // J. Geophys. Res.- 1985.- Vol.90, No. D4.- P.5917-5923.

44. Сальм Я.И. Соединение аэроионов при симметричной стационарной ионизации // Уч. зап. Тарт. ун-та.- 1987.- Вып.755.- С.10-17.

45. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы.- М.: Мир, 1965.- 424 с.

46. Mohnen, V.A. Formation, Nature, and Mobility of Ions of Atmospheric Importance // *Electrical Processes in Atmospheres*. - Darmstadt: Dietrich Steinkoff Verlag, 1977. - P. 1-17.
47. Eichmeier, J. Vergleich Beweglichkeitspektren von "natürlichen" Luftionen und der verwendeten Messverfahren // *Z. Geophys.* - 1972. - Bd.38. - S.915-923.
48. Сальм Я.И., Таммет Х.Ф., Ихер Х.Р., Хыррак У.Э. Зависимость спектра подвижности легких аэроионов в приземном слое атмосферы от температуры и давления воздуха // *Уч. зап. Тарт. ун-та.* - 1988. - Вып. 809. - С.87-94.
49. Хыррак У.Э., Таммет Х.Ф., Сальм Я.И., Ихер Х.Р. Суточный и годовой ходы атмосферно-ионизационных величин в Тахкузе // *Уч. зап. Тарт. ун-та.* - 1988. - Вып. 824. - С.78-83.
50. Hoegl, A. Messung von Konzentration und Beweglichkeit atmosphärischer Ionen // *Z. angew. Physik.* - 1963. - Bd.16, H.4. - S.252-258.
51. Ungethum, E. The mobilities of small ions in the atmosphere and their relationship // *J. Aerosol Sci.* - 1974. - Vol.5. - P. 25-37.
52. Knudsen, E., Israelsson, S. Mobilities of small ions in the atmospheric surface layer // *Pageoph.* - 1975. - Vol.113. - P.525-533.
53. Петров Ю.И. Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986.
54. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Ленинград, 1982. - 365 с.
55. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. - Москва, 1955. - 351 с.
56. Колмогоров А. // *ДАН СССР.* - 1941. - 31. - С.99.
57. Junge, C.E. Die Rolle der Aerosol und der Gasförmigen Beimengungen der Luft in Spurenstoffhaushalt der Troposphäre // *Tellus.* - 1953. - Vol.5. - Nr.1.
58. Смирнов В.И. Решения семейства уравнения стационарной коагуляции и модель спектра размеров частиц атмосферного аэрозоля // *Изв. АН СССР ФАО.* - 1977. - Вып.13. - No.3. - С.274-286.
59. Whitby, K.T., Husar, R.B., Liu, B.Y.H. The aerosol size distribution of Los Angeles Smog // *J. Colloid Interface Sci.* - 1972. - Vol.39. - No 1. - P.177-204.
60. Таммет Х.Ф. Сравнение модельных распределений аэрозольных частиц по размерам // *Уч. зап. Тарт. ун-та.* - 1988. - Вып.824. - С.92-108.

61. Смирнов В.И. Об аппроксимации эмпирических распределений по размерам облачных капель и других аэрозольных частиц // Изв. АН СССР ФАО.- 1973.- № 1.- С. 54-65.
62. Шифрин К.С. О вычислении радиационных свойств облаков // Тр. ГГО.- 1955.- Вып.46(108).- С.5-33.
63. Smirnov, V.I. On the mechanisms responsible for the formation of typical size spectra and vertical distribution of tropospheric aerosol particles // Eleventh Int. Conf. on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei.- Budapest, 1984.- Vol.1.- P.82-86.
64. Махоткин Л.Г. Многолетний ход величин атмосферного электричества по наблюдениям ГГО // Тр.ГГО.- 1988.
65. Смеркалов В.А. Аппроксимация среднего распределения аэрозольных частиц по размерам // Изв.АН СССР, ФАО.- 1984.- Вып.20.- № 4.- С.317-320.
66. Х.Ф.Таммет, А.А.Мирме, Э.И.Тамм. К проблеме электрического анализа аэрозолей // Тр. ИЭМ.- 1983.- Вып.30.- С.122-136.
67. Jaenicke,R. Our knowledge about the atmospheric aerosol // Eleventh Int.Conf. on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei.- Budapest, 1984.- Vol.1.- P.99-107.
68. Hoppel,W.A., Fitzgerald,J.W., Frick,G.M., Larson,R.E. Atmospheric Aerosol Size Distribution and Optical Properties found in the Marine Boundary Layer over the Atlantic Ocean.- Naval Research Laboratory Report.- 1989.- 75 P.
69. Lushnikov,A.A., Lyubovtseva,Y.S. Atmospheric aerosols - the subject of physico-chemical study // Lecture Notes in Physics No. 309: Atmospheric Aerosols and Nucleation.- Berlin etc.: Springer, 1988.- P.138-157.
70. Мирме А.А., Кикас Ю.Э., Тамм Э.И. Динамика спектра атмосферного аэрозоля приземного слоя // Уч. зап. Тарт. ун-та.- 1988.- Вып.824.- С.109-122.
71. Lopez,A. Prieur,S. Fontan,J. Study of the formation of particles from natural hydrocarbons released by vegetation // Eleventh Int.Conf. on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei.- Budapest, 1984.- Pre-print vol.1.- P.35-51.

72. Загайнов В.А. и др. Суточные изменения параметров атмосферного аэрозоля горных районов // Изв. АН СССР ФАО.- 1987.- Т.23.- № 12.- С.1323-1329.

73. Kikas, U. Mirme, A. Tamm, E. Size distribution dynamics of rural and urban aerosols // Уч. зап. Тарт. ун-та.- 1990.- Вып. 880.- С.84-93.

74. Кикас Ю.Э., Мирме А.А., Тамм Э.И. Наблюдения городского аэрозоля // Тез. докл. XV всесоюз. конф. Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем.- Одесса, 1989.- Т.2.- С.114-115.