

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. ВОЕЙКОВА

Выпуск

433

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Под редакцией
канд. техн. наук Л. П. АФИНОГЕНОВА
канд. техн. наук С. И. ГРУШИНА
канд. физ.-мат. наук М. С. СТЕРНЗАТА

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 193186, Малоохтенский пр., 98



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1979

Сборник посвящен вопросам разработки новых метеорологических приборов и методов измерений. Значительное внимание уделено метеорологическому обеспечению авиации, измерительным средствам для аэропортов и вопросам построения автоматизированных систем для получения и распространения метеоинформации. Ряд статей посвящен измерительным установкам для экспериментальных исследований.

Рассчитан на специалистов, занимающихся разработкой приборов и методов измерений и исследованиями в приземном слое атмосферы, работников гидрометеорологической сети, связанных с эксплуатацией новых приборов, а также на преподавателей и студентов гидрометеорологических вузов и техникумов.

The publication deals with the problems of new means and methods of measurement both for a wide use of at the network of meteorological stations and for research; consideration is given to further automation of the processes of receiving and treatment of meteorological information, particularly in the field of servicing aviation. Some problems of operation of new meteorological instruments are considered.

The publication is intended for specialists dealing with development of means and methods of measurements and studies in the atmospheric surface layer, workers of hydrometeorological network engaged in operation of new instruments and for instructors and students of meteorological institutes and technical schools.

*Ю. В. Виноградов, Ю. Ф. Моисеев, Н. А. Петров,
А. И. Плеснев*

ПРИНЦИПЫ ОБМЕНА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УВД

Основные принципы построения автоматизированной системы метеорологического обеспечения (АСМО)

Метеорологическое обеспечение является важнейшим звеном в общей системе управления воздушным движением (УВД) и направлено на обеспечение безопасности и регулярности полетов, определяющихся метеорологическими условиями.

Рост интенсивности воздушного движения, объема перевозок, дальности полетов, внедрение новых типов воздушных судов (включая сверхзвуковые) обуславливают повышение требований к метеорологическому обеспечению, прежде всего в отношении оперативности сбора и полноты метеорологической информации, используемой при планировании и управлении полетами. Существующая до настоящего времени система метеорологического обеспечения, основанная на использовании неавтоматизированных средств получения информации, прежде всего от внешних источников (аэропорты первой посадки, запасные аэродромы), ручной ее обработки в авиационных метеорологических центрах (АМЦ) и авиационных метеорологических станциях (АМСГ), устаревших способов доведения информации до потребителей, с ростом интенсивности воздушного движения не удовлетворяет в полной мере требованиям высокой оперативности обеспечения авиации.

В связи с этим в последние годы проводится ряд мероприятий по внедрению в практику работы АМЦ (АМСГ) новых автоматизированных средств получения метеорологической информации, ее обработки и доведения до потребителей. АСМО должна относиться к классу информационных обеспечивающих систем.

К основным принципам построения АСМО следует отнести:

а) принцип функционального соответствия системы возлагаемым на нее задачам. Поскольку АСМО относится к классу информационных систем, к ней должны предъявляться требования по

максимальному удовлетворению метеорологической информацией запросов потребителей, а это означает, что система должна обеспечить выдачу необходимой метеоинформации с исчерпывающей полнотой (по видам, срокам и объему) и высокой оперативностью;

б) принцип согласованности системы с организационно-технической структурой источников метеорологической информации и структурой автоматизированной системы УВД. Источниками первичной информации для АСМО должны быть автоматизированные и автоматические станции аэропортов (в том числе метеорологические радиолокационные станции (МРЛ) и станции вертикального зондирования атмосферы), метеорологическая космическая система, а также воздушные суда, находящиеся в воздухе. Кроме этого, внешними источниками по отношению к АСМО являются метеорологические центры, в которых ведется обобщение и разработка аэросиноптических материалов. АСМО должна быть связана со всеми источниками информации каналами связи и согласована с ними по срокам, объемам, видам и программам получения информации. Информация, выдаваемая АСМО потребителям, должна представляться в виде, удобном для непосредственного использования диспетчерским составом, а также для автоматического решения различных задач навигации и управления воздушным движением;

в) принцип приспособленности системы к ее дальнейшему совершенствованию в связи с возможными изменениями требований к метеорологическому обеспечению авиации. Система должна быть гибкой и способной обеспечивать, без существенного изменения ее структуры, возможности дальнейшего усовершенствования и развития системы УВД.

За последние годы проводились исследования по созданию АСМО УВД. Разработанные предложения по созданию автоматизированной системы метеорологического обеспечения в основном соответствуют указанным выше принципам и в соответствии с ними АСМО строится как информационная подсистема, обеспечивающая АС УВД одним из видов информации, необходимой как для решения задач оперативного управления воздушным движением, так и для планирования полетов.

Система предусматривает автоматизированный прием из каналов связи поступающей метеорологической информации, ввод ее в центральное вычислительное устройство (ЦВУ), обработку, а также отображение необходимой информации на рабочих местах потребителей.

В системе предусматривается, что вся формализованная метеорологическая информация (сведения о фактической погоде, оповещения и предупреждения об опасных явлениях погоды, прогнозы погоды и т. п.), поступающая от аэропортов и аэродромов, должна вводиться в память ЦВУ непосредственно с линией связи, что обеспечивает высокую оперативность поступления этой информации потребителям аэропорта.

Требования к составу информации в АСМО УВД

АСМО УВД должна удовлетворять требованиям «Наставления о производству полетов в гражданской авиации СССР» [2] и «Наставления по метеорологическому обеспечению гражданской авиации» [3].

Специфические задачи по управлению воздушным движением требуют от АСМО выдачи необходимой метеорологической информации с высокой оперативностью доведения ее до потребителей.

Состав метеорологической информации, выдаваемой АСМО УВД, должен включать:

а) фактическую погоду аэропортов и аэродромов, расположенных на территории ответственности за УВД, а также аэропортов первой посадки и запасных аэродромов по трассам полетов. Фактическая погода аэропортов и аэродромов в зоне ответственности за УВД должна поступать в АСМО УВД не позднее чем через 5 мин после срока наблюдения. Данные о фактической погоде должны обновляться через каждые 30 (60) мин и выдаваться на средства отображения информации на рабочих местах потребителей по запросу;

б) штормовые оповещения аэропортов и аэродромов, расположенных на территории ответственности за УВД, станций штормового кольца района, а также аэропортов первой посадки и запасных аэродромов по трассам полетов. Штормовые оповещения аэропортов и аэродромов своей зоны должны поступать в АСМО УВД не позднее чем через 3 мин после начала опасного явления погоды.

Вся штормовая метеорологическая информация, поступающая в АСМО УВД, должна принудительно, после контроля инженером-синоптиком, выдаваться на средства отображения информации на рабочих местах потребителей. Информация хранится в памяти центрального вычислительного устройства (ЦВУ) системы до ее обновления. Штормовая информация от МРЛ должна обновляться через каждые 15 мин;

в) прогнозы погоды по аэропортам и аэродромам района ответственности за УВД, аэропортам первой посадки и запасным аэродромам. Эта информация должна поступать в АСМО УВД за 1 ч до начала действия прогноза и храниться в памяти ЦВУ до его обновления, или до окончания срока действия прогноза. Выдача прогнозов погоды на средства отображения информации на рабочих местах потребителей осуществляется по запросу;

г) штормовые предупреждения по аэропортам и аэродромам своей зоны, аэропортам первой посадки и запасным аэродромам. Эта информация разрабатывается в АМЦ (АМСГ) аэропортов и аэродромов и должна поступать в АСМО УВД не позднее чем за 30 мин до начала срока действия прогнозируемого опасного явления погоды. Информация принудительно, после контроля инженером-синоптиком, выдается на средства отображения информации на рабочих местах потребителей. Срок хранения

информации — окончание срока действия штормового предупреждения или его отмена;

д) сведения о фактическом и прогнозируемом распределении температуры воздуха и ветра по высотам, о планируемом выпуске радиозондов и предполагаемой траектории их перемещения в зоне ответственности за УВД, а также сведения о погоде, передаваемые через диспетчерский состав с бортов воздушных судов, обобщаются в АМЦ (АМСГ) и передаются в АСМО УВД. Информация выдается на средства отображения ее на рабочих местах потребителей по запросу и хранится в памяти ЦВУ до обновления или отмены инженером-синоптиком.

Консультации о фактическом и ожидаемом развитии атмосферных процессов, справки о погоде по территории района ответственности за УВД и воздушным трассам выдаются дежурным инженером-синоптиком по телефону или громкоговорящей связи (ГГС).

Основными средствами отображения метеорологической информации на рабочих местах потребителей должны быть средства индикации, включающие экран таблично-знакового индикатора (ТЗИ), предназначенного для отображения алфавитно-цифровой информации, и экран координатно-знакового индикатора (КЗИ) предназначенного для отображения графической информации.

Структура метеорологических сообщений в АСМО УВД района

В АСМО УВД от аэропортов и аэродромов должны поступать метеорологические сообщения, составленные в виде закодированных по действующим авиационным метеорологическим кодам телеграмм. В настоящее время для передачи авиационной метеорологической информации используются утвержденные авиационные метеорологические коды ФАП и АПП [1].

В условиях автоматизированной системы метеорологического обеспечения существующие коды в том виде, в каком они разрабатаны, использовать не представляется возможным. В связи с этим в ходе разработки АСМО УВД в существующие коды предложено внести некоторые дополнения, позволяющие существенно упростить обработку метеорологической информации, закодированной с помощью этих кодов, на ЭВМ.

В целях упрощения автоматизированной обработки метеорологической информации, поступающей в ЦВУ АСМО УВД, приняты следующие условия:

а) вся входная метеорологическая информация должна быть формализованной;

б) каждое формализованное сообщение должно состоять из двух частей — служебной и информационной.

В служебной части формализованного сообщения передается шифр узла связи, передающего сообщение, время поступления сообщения на узел связи, название (индекс) пункта или источника сообщения, адрес, куда направляется информация, и т. д.

В информационной части сообщения передается признак на

ла информационных групп, вид сообщения (закодированный персоналом метеоподразделения), пункт, откуда поступает информация, время производства наблюдений или срок действия сообщения, информационные группы, содержащие значения соответствующих метеорологических параметров, признак окончания информационной части сообщения.

Служебная часть входного сообщения используется только для определения вида поступившей информации и адресата (метео, диспетчерский состав и др.). Служебная часть дальнейшей машинной обработке не подвергается и на входе ЦВУ отсеивается. Машинной обработке подвергается информационная часть сообщения, содержащая сведения об определенных метеорологических параметрах.

Основными отличительными признаками информационной части всех входных метеорологических сообщений, поступающих АСМО УВД, являются следующие:

а) перед началом информационной части сообщения должен стоять знак «(» (левая круглая скобка), указывающий на признак начала информационной части сообщения;

б) на втором месте указывается вид и срочность сообщения МАА — вид сообщения о фактической погоде аэродрома, МАШ — вид сообщения о штормовом оповещении, МПП — вид сообщения прогноза погоды по аэродрому и т. д.);

в) между группами информационной части сообщения должен проставляться разделительный знак «—» (горизонтальная черта);

г) каждая информационная группа, содержащая конкретную метеорологическую информацию, должна иметь свой отличительный признак, состоящий из букв, групп букв или цифр (например: А — отличительный признак группы ветра, В — группы горизонтальной видимости, П — группы видимости на ВПП и т. д.);

д) для указания признака дополнительной информации ставится буква «Д». Информация после признака «Д» машинной обработке не подвергается, а слова (группы) в ней разделяются пробелами. В дополнительной информации допускается передача открытым текстом;

е) в конце информационной части сообщения должен проставляться признак «)» (правая круглая скобка), указывающий на окончание информационной части сообщения.

Значения соответствующих метеорологических параметров кодируются авиационными метеорологическими кодами.

Все метеорологические сообщения (кроме сообщений от ЦРЛ), поступающие в АСМО УВД, должны составляться с соблюдением описанных выше условий. Формализованные закодированные метеорологические сообщения, поступая в ЦВУ АСМО из аналогов связи, автоматически обрабатываются и в раскодированном виде поступают в память ЦВУ для использования потребителями в оперативной работе.

Ниже приводятся примеры кодирования и формализации метеорологических сообщений, передаваемых в АСМО УВД.

Примеры кодирования и формализации информационной части входных метеорологических сообщений в АСМО УВД

1. Фактическая погода аэропорта:

(МАО — УЛЛЛ — 1200 — М09008/12 — П1800 — Я70СН
К8СД — 030/ВГ0580 — Х03/05 — ЕМ763 — Д ПОСТ ВИД 1000)

Расшифрованное сообщение:

Фактическая погода Пулково за 12 00 ветер «магнитный» 9
8 м/с, порывы 12 м/с, видимость на ВПП 1800 м, снег, облачно
10 баллов слоисто-дождевая высотой 300 м, верхняя грани
5800 м, температура минус 3°, точка росы минус 5°, давление
уровне старта ВПП 763 мм рт. ст., постепенное ухудшение вид
мости в ближайшие 2 часа до 1000 м.

2. Штормовое оповещение аэропорта:

(МАШ — 34731 — 2025 — И0420/25 — П0500 — Я85ЛС
К8СД — 010).

Расшифрованное сообщение:

Штормовое оповещение аэропорта Ростов-на-Дону: в 20 ч 25 м
ветер 40° 20—25 м/с, видимость на ВПП 500 м, снег, метель, о
лачность 10 баллов слоисто-дождевая высотой 100 м.

3. Штормовое оповещение станции штормового кольца аэр порта:

(МШО — 34858 — 1410 — Д ДОЖДЬ УСИЛИЛСЯ ВИД 15
ГРОЗА ПРДЛЖ).

Расшифрованное сообщение:

Штормовое оповещение гидрометеостанции Дивное: в 14 ч 10 м
дождь усилился, видимость 1500 м, гроза продолжается.

4. Прогноз погоды по аэропорту:

(МПП — УЛАА — 21/03 — И16004/10 — В6000 — Я60ДЖ
К8СД — 030/ВТ0720 — 00/03 — И15006/10 — В7000 — Я10ДК
К8РС040 — Д БЫСТР 02/03 В1000 Я42ТМ К4РС050).

Расшифрованное сообщение:

Прогноз погоды по аэропорту Архангельск на период с 21 00
03 00: ветер 160° — 4 м/с порывы 10 м/с, горизонтальная вид
мость 6 км, дождь, облачность 10 баллов слоисто-дождевая в
сотой 300 м, верхняя граница облаков 7200 м, с 00 00 до 03
ветер 150° — 6 м/с, порывы 10 м/с, видимость 7 км, дымка, обла
ность 10 баллов разорванно-слоистая высотой 400 м. В пери
с 02 00 до 03 00 быстрое ухудшение видимости до 1000 м, туман
облачность 5 баллов разорванно-слоистая высотой 500 м.

5. Штормовое предупреждение по аэропорту:

(МПШ — УЛАА — 15/18 — Д ОЖИДАЕТСЯ ТУМАН ВИ
300—500).

Расшифрованное сообщение:

Штормовое предупреждение по аэропорту Архангельск: в пери
с 15 00 до 18 00 ожидается туман, видимость 300—500 м.

Заключение

В статье рассмотрен состав информации и основные формы входных метеорологических сообщений, поступающих в АСМО ВД района.

На современном этапе, когда в подавляющем большинстве случаев осуществляется ручной ввод и ручная обработка метеорологической информации, рассмотренные в статье принципы формализации входных метеорологических сообщений, позволяющие осуществлять автоматизированный прием и обработку основных видов метеорологической информации в автоматизированных системах Управления воздушным движением, на наш взгляд, представляют определенный интерес и могут найти практическое применение.

В частности, рассмотренные в статье принципы формализации метеорологических сообщений и разработанные форматы входных сообщений в АСМО УВД, а также форматы отображения метеорологической информации на индикаторных устройствах рабочих мест потребителей используются при разработке автоматизированной системы метеорологического обеспечения Управления воздушным движением в зоне аэропорта и в районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метеорологические авиационные коды.— М.: изд. Гидрометцентра СССР, 1978.— 32 с.
2. Наставление по производству полетов в гражданской авиации СССР (ИП ГА-71).— М.: изд. МГА, 1971.
3. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (МО ГА-73).— Л.: Гидрометеиздат, 1973.— 140 с.

*Ю. В. Виноградов, А. Е. Веселкин, Ю. Ф. Моисеев
А. И. Плещинский*

ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ, ХРАНЕНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ МЕТЕОИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

В статье [5] рассмотрены особенности сбора метеоинформации в условиях единой автоматизированной системы управления воздушным движением (ЕАС УВД). Указывается на то, что основными источниками метеорологической информации, поступающей в данный район, являются: авиационный метеорологический центр (АМЦ), авиационные метеорологические станции (АМСГ), метеорологические радиолокационные станции типа МРЛ и станции вертикального зондирования атмосферы, которые исходя из установленного объема передают необходимую информацию в автоматизированную систему УВД.

Одним из условий, позволяющим упростить машинную обработку метеоинформации в центральном вычислительном комплексе (ЦВК), является передача информации в формализованном виде с использованием авиационных метеорологических кодов [2]. Для целей машинной обработки в метеорологические коды внесены некоторые дополнения [4].

В настоящее время сбор и доведение метеоинформации до потребителей, занимающихся УВД, осуществляется не автоматизировано. Такая система метеорологического обеспечения не эффективна, требует больших затрат времени и связана с частыми обращениями (запросами) диспетчерского состава УВД к синоптикам АМЦ (АМСГ), отвлекает диспетчерский состав от непосредственного управления движением воздушных судов, что в свою очередь может привести к потере управления воздушными судами.

Внедрение автоматизированной системы метеорологического обеспечения управления воздушным движением (АСМО УВД) позволяет исключить эти недостатки и делает систему метеообеспечения непрерывной, более информационной и надежной.

В настоящее время сбор метеоинформации на всех этапах, начиная с низового звена, осуществляется без применения средств

втоматизации и только на некоторых аэродромах, оборудованных втоматическими станциями типа КРАМС [1], осуществляется непрерывное получение метеозаписей от первичных преобразователей (датчиков), расположенных в районе взлетно-посадочной полосы (ВПП). Даже в случаях их использования дальнейшая передача результатов наблюдений в каналы связи производится обычным неавтоматизированным способом.

Рассматриваемая в настоящей статье система предполагает втоматизацию процесса наблюдения, сбора и распространения метеоинформации во всех ее звеньях, вплоть до автоматизированного доведения метеоданных на рабочие места диспетчерского состава, занимающегося непосредственным управлением воздушным движением в определенном районе. На начальном этапе разработки система должна осуществлять автоматизированный сбор, обработку и отображение необходимой метеоинформации на рабочих местах потребителей. Наблюдения за погодой в районе аэропорта на этом этапе могут производиться как в полуавтоматическом режиме с помощью станций типа КРАМС, так и визуально последующим вводом информации в каналы связи через узел связи АМСГ (АМЦ).

Сбор и обмен метеоинформацией в системе УВД района предполагается осуществлять через центры коммутации сообщений (ЦКС) ГА и через каналы связи автоматизированной системы ВД, оборудованные специальными абонентскими пультами, которые будут установлены в основных аэропортах района.

Для сбора метеоинформации привлекаются АМСГ (АМЦ) и другие метеорологические подразделения Госкомгидромета и ведомств, расположенные как на территории района УВД, так и на территории других районов УВД.

Количество АМСГ, привлекаемых к подаче метеоинформации адресно району УВД, может достигать 30—40 станций, а с учетом постоянно действующих запасных аэродромов и аэродромов первой посадки — 100 станций.

Штормовые оповещения от гидрометеорологических станций (ГМС) и метеопостов штормового кольца аэропортов в автоматизированную систему района поступают через узлы связи АМСГ по каналам связи ГА или по специальным каналам связи ЕАС ВД. Для уменьшения потока штормовых оповещений и исключения их дублирования от одних и тех же ГМС штормового кольца ГМС закрепляются за ближайшими АМСГ, с которыми имеется надежная телеграфная связь. Эта информация через узлы связи АМСГ передается в адрес ЕАС УВД района.

Результаты радиолокационных наблюдений передаются в ЕАС ВД с помощью специальной аппаратуры «Циклон» через ЦКС А аэропорта.

Метеорологические сообщения с различными видами информации формируются дежурными сменами АМСГ аэропорта в соответствии с требованиями «Наставления по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (НМО ГА—73)» [3]. Так,

дежурные синоптики АМСГ подготавливают для передачи в ЕА УВД прогнозы погоды по аэродрому, по трассам полетов, штормовые предупреждения, прогнозы ветра и температуры воздуха по высотам, ожидаемые траектории перемещения радиозондов другую информацию. Дежурные техники-наблюдатели АМСГ передают результаты часовых и получасовых наблюдений за фактическим состоянием погоды на аэродроме (авиапогоду) и штормовые оповещения о возникновении опасных для авиации условий погоды.

Все сообщения должны передаваться в формализованном виде. Порядок подготовки метеорологических сообщений изложен в статье [4] и нами здесь не рассматривается.

Для упорядочения потока информации, поступающей в ЦВК АС УВД, устанавливается единое время передачи метеоинформации. В данном случае сеансы связи для всех АМСГ районов установлены в период с 00 до 05 и с 30 до 35 мин каждого часа.

Штормовая информация передается в ЦВК по мере возникновения или составления предупреждения об опасном явлении погоды на аэродроме.

Данные радиолокационных наблюдений от станций МРЛ, оборудованных аппаратурой «Циклон», поступают в ЦВК района сразу после производства наблюдений через каждые 3 ч, а при ухудшении погодных условий через 15—30 мин.

Вся поступившая в ЦВК АС УВД формализованная информация на входе ЭВМ преобразуется из кодов передачи информации в единый машинный код, документируется и выделяется из общего потока информации в поток метеорологической информации. Затем происходит разделение поступившей метеоинформации по видам сообщений, при этом выделяется информация от МРЛ, фактическая погода и другие виды метеосообщений.

Сообщения от 5—6 станций МРЛ обобщаются машиной и из них выделяются сообщения, содержащие штормовые признаки. После этого производится формирование графической информации, включающей опасные явления погоды и пространственную информацию обычного типа, для отображения на рабочем месте инженера-синоптика автоматизированной системы района, где она подвергается просмотру, корректировке и дополнению. После корректировки и ввода дополнительных сведений информация от МРЛ документируется и вводится в память вычислительного комплекса (ВК) отображения. Одновременно в ВК отображения происходит формирование команд на распределение информации для выдачи на средства отображения ее на рабочих местах потребителей. При этом информация от МРЛ, содержащая сведения об опасных явлениях погоды, выдается на средства отображения принудительно, а обычные сообщения из памяти ВК отображения вызываются потребителями по запросу.

Сообщения, поступившие в установленные сеансы связи, после документирования и разделения в ЦВК проходят форматологию

ческий контроль и передаются для отображения на дисплей техника-оператора по связи с ЭВМ (ассистента) метеогруппы для просмотра, корректировки и исправления ошибок. После просмотра ассистентом метеоинформация вводится в память ВК отображения, откуда может быть вызвана на индивидуальные средства отображения по запросу. Метеоинформация, в которую внесены изменения, откорректированные и вновь введенные данные подвергаются повторному документированию.

Метеорологическая информация, содержащая признаки «ШТОРМ», после документирования, разделения по видам (по назначению) и прохождения форматнологического контроля принудительно поступает на экран инженера-синоптика метеогруппы (ассистента) и одновременно на экраны дежурных смен диспетчеров УВД района.

Метеорологическая информация, поступившая в ЦВК между сеансами связи, выдается на экран ассистента метеогруппы как содержащая ошибки. После просмотра и исправления ошибок она отправляется в память ВК отображения.

Выполнение всех функций в АСМО УВД обеспечивается комплексом программ подсистемы, которые должны решать следующие задачи:

а) осуществлять перевод поступившей метеоинформации из авиационных метеорологических кодов в машинный код ЭВМ;

б) производить выделение (сортировку) из общего потока сообщений поступивших на вход ЦВК телеграмм, содержащих метеорологическую информацию;

в) осуществлять документирование всей поступившей в ЦВК информации;

г) осуществлять разделение поступившей метеоинформации по видам сообщений и запись ее в память ЦВК по своему назначению для дальнейшей обработки;

д) производить форматнологический контроль для выявления грубых ошибок;

е) определять, кому и в каком виде предназначена поступившая информация, ее срочность, выделять информацию для отображения на рабочих местах дежурного синоптика и ассистента;

ж) осуществлять документирование откорректированной и вновь сформированной в метеогруппе информации;

з) распределять метеоинформацию на рабочие места дежурных смен диспетчеров;

и) осуществлять машинный контроль за получением потребителями штормовой информации;

к) производить контроль за своевременным поступлением в ЦВК метеоинформации от всех источников сообщений, участвующих в метеобеспечении района.

Одной из важных функций решения задач по успешному доведению необходимой информации до потребителей является порядок взаимодействия между машинным комплексом и человеком.

Для решения функции взаимодействия «человек—машина», в данном случае взаимодействия инженера-синоптика или ассистента с ЭВМ, предусматривается специальная программа для рабочих пультов метеогруппы. Эта программа позволяет полностью осуществлять контроль за всей поступающей и отображаемой метеоинформацией в автоматизированной системе, предусматривает активное вмешательство инженера-синоптика (ассистента) в вопросы доведения и уточнения метеоинформации с учетом как текущей, находящейся в памяти ЦВК, так и получаемой помимо ЦВК.

✓ Рабочее место дежурной смены метеогруппы АС УВД состоит из двух стандартных пультов. На пульте дежурного инженера-синоптика размещаются координатно-знаковый индикатор (КЗИ) для отображения графической информации, поступающей от МРЛ, оборудованных аппаратурой «Циклон», и таблично знаковый индикатор (ТЗИ) для отображения алфавитно-цифровой информации. Таблично-знаковый индикатор представляет собой стандартный дисплей, на котором размещается 24 строки, по 80 знаков в каждой строке. Размеры экрана по диагонали составляют 40 см. На пульте техника-оператора по связи с ЭВМ (ассистента) размещен только таблично-знаковый индикатор. Кроме того, на каждом из пультов размещаются алфавитно-цифровая клавиатура и клавиатура программных функций. Клавиатура программных функций обеспечивает доступ к различной метеорологической информации, находящейся в памяти ЦВК системы. Она позволяет вызывать на экраны отображения фактическую погоду, прогнозы погоды, ветер и температуру воздуха по высотам, прогноз ветра и температуры по высотам, ожидаемые траектории перемещения радиозондов. С помощью алфавитно-цифровой клавиатуры осуществляется исправление ошибок в тексте сообщений, ввод новой информации, выбор конкретного аэродрома, по которому необходимо запросить информацию из ЦВК.

— Рабочие пульты инженера-синоптика и ассистента позволяют осуществлять одновременный просмотр на экранах ТЗИ алфавитно-цифровой информации. В комплексе предусмотрена взаимная передача метеоданных с одного пульта на другой.

Система вызова метеоинформации на отображение реализует функции вызова фактической погоды, прогнозов погоды, а также функцию «СЕАНС СВЯЗИ». Каждая из функций в свою очередь включает в себя подфункции: фактическое состояние погоды по аэродрому, штормовую информацию; распределение ветра и температуры воздуха по высотам, характеристику опасных явлений погоды по данным МРЛ, прогнозы погоды.

Функция «СЕАНС СВЯЗИ» обеспечивает принудительное (без вызова) отображение на экране ассистента сообщений о погоде по аэродромам, при этом на 1-й строке экрана отображается надпись «СВЯЗЬ», на 2—21-й строках — сообщения о фактической погоде, прогнозах погоды и другой информации, поступившей в ЦВК в данный сеанс связи. Сведения отображаются в порядке их по-

ступления и могут формироваться на нескольких страницах. Сообщения, содержащие признак «ШТОРМ» и поступившие в сеанс связи, формируются и отображаются в первую очередь, а затем идет обычная информация. На 23-й строке экрана отображается количество сообщений, стоящих в очереди, 24-я строка предназначена для служебной информации. После окончания сеанса связи на 1-й строке экрана отобразится надпись «КОНЕЦ СВЯЗИ» вместо надписи «СВЯЗЬ». В тех случаях, когда в сеанс связи поступила не вся информация от аэродромов, на 1-й строке высвечивается надпись «НЕ ВСЕ», а на 23-й строке экрана указываются индексы аэродромов, от которых не поступили сообщения. Инженер-синоптик (ассистент) принимает меры для получения не поступившей информации либо продлевает действие ранее поступившей информации на очередной срок.

При поступлении из ЦВК метеоинформации с признаком «ШТОРМ» на 22-й строке экрана отобразятся мерцающие номера рабочих мест диспетчеров, в которые должны поступить штормовые сообщения. Стирание мерцающих номеров рабочих мест с экрана означает, что данные сообщения приняты диспетчерами. Программа работы ЦВК предусматривает документирование времени получения штормового сообщения диспетчером.

Сообщения о погоде опоздавшие в сеанс связи или содержащие ошибки, обнаруженные при форматнологическом контроле, после просмотра и корректировки дежурной сменой вводятся в долговременную память ЦВК.

Пространственная метеорологическая информация от МРЛ, после совмещения в ЦВК, отображается на экране КЗИ инженера-синаптика, при необходимости уточняется, дополняется и вводится в память ЦВК для дальнейшего использования диспетчерами по запросу. Для ввода пространственного прогноза, направлений в совмещенную информацию от нескольких МРЛ, ожидаемой траектории перемещения радиозондов на экран КЗИ инженер-синоптик нажатием клавиши активизирует соответствующую программную функцию, после чего маркером последовательно указывает точки, ограничивающие метеозоны, или траекторию перемещения радиозонда. По мере ввода точки между собой автоматически соединяются прямыми линиями, и на экране КЗИ вычерчивается вводимая зона или траектория перемещения радиозонда.

При активизации на пульте КЗИ функции «ШТОРМ» и наборе текста штормовой информации в кратковременной разговорной книжке инженера-синаптика, расположенной на пульте КЗИ и представляющей собой небольшой дисплей, начнут мерцать номера рабочих мест диспетчеров, которым должна быть выдана штормовая информация, одновременно в разговорной книжке диспетчера отобразится мерцающая надпись «ШТОРМ». По мере получения подтверждения от соответствующих диспетчеров (нажатием клавиши), которым была выдана штормовая информация,

в разговорной книжке инженера-синоптика мерцание номера диспетчера прекращается.

Необходимая дополнительная метеорологическая информация от АМЦ (АМСГ) должна поступать после запроса по телефону, громкоговорящей связи (ГГС), по специальному каналу связи через абонентский пульт или по каналам связи МГА.

Обновление метеоинформации в банке данных ЦВК осуществляется по мере поступления свежей информации. Фактическая погода аэродромов обновляется каждые 30 мин, прогнозы погоды — через 3 ч, данные о ветре и температуре воздуха по высотам — через каждые 6 ч.

Штормовые оповещения от аэродромов, поступившие в неустановленные сроки обмена метеоинформацией, отменяют ранее поступившую фактическую погоду, а штормовые предупреждения — ранее поступивший прогноз погоды по аэродрому. По истечении срока действия штормового предупреждения синоптик АМСГ (АМЦ) обязан выслать в АС УВД корректив к прогнозу погоды на оставшийся период действия прогноза или составить новый на очередной 9(6)-часовой период.

Вся метеорологическая информация, поступившая в ЦВК, хранится в долговременной памяти комплекса в течение 48 ч. В памяти ВК отображения информация хранится до поступления свежей информации либо до введения необходимых уточнений инженером-синоптиком.

В АСМО УВД предусматривается следующий порядок отображения метеоинформации на рабочих местах диспетчеров. Штормовая информация выдается на экраны принудительно, обычная — отображается по запросу, по мере необходимости в ней. Адресат для передачи штормовой информации определяется с помощью специальной таблицы в программе комплекса. Для отображения той или иной метеорологической информации используются стандартные формы, близкие по структуре с метеорологическими авиационными кодами.

На 1-й строке экрана ТЗИ высвечивается название вызванной информации, на 2—21-й строках — содержание соответствующей информации. Для отображения фактической погоды по аэродрому отводится две строки: одна используется для передачи первой части сообщения по коду ФАП [2], вторая — для дополнительной информации, включенной после знака «Д» и передаваемой открытым текстом.

Таким образом, предлагаемый порядок обработки, хранения и отображения метеоинформации в автоматизированной системе УВД района позволяет решить задачу оперативного обеспечения метеорологическими данными диспетчерского состава на территории ответственности за УВД, ускоряет доведение метеоинформации до потребителей, освобождает диспетчерский состав от многократного обращения за ней, что в свою очередь повышает надежность метеорологического обеспечения и безопасность полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическая станция КРАМС/Под ред. Л. П. Афиногенова и А. С. Стернзата.— Л.: Гидрометеониздат, 1974.— 220 с.
2. Метеорологические авиационные коды.— М.: изд. Гидрометцентра СССР, 1978.— 32 с.
3. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации НМО ГА-73).— Л.: Гидрометеониздат, 1973.— 142 с.
4. Принципы обмена метеорологической информацией в автоматизированной системе УВД/Ю. В. Виноградов, Ю. Ф. Моисеев, Н. А. Петров, А. И. Плесев.— См. наст. сб., с. 3—9.
5. Структура информационного обмена метеоинформацией в автоматизированной системе УВД.— Труды ГГО, 1978, вып. 416, с. 90—93.

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Лд 193196, Малоохтенский пр., 98

С. И. Грушин, Н. А. Петров, Е. В. Романов

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АЭРОДРОМНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНО- ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Непрерывное повышение интенсивности полетов, рост требований к их регулярности в сложных метеорологических условиях в соответствии с метеоминимумами I, II и III категорий, определенными международной организацией гражданской авиации ИКАО, создание в стране единой автоматизированной системы управления воздушным движением ЕАС УВД — все это выдвигает повышенные требования к метеорологическому обеспечению авиации. С ростом интенсивности полетов, который неизбежно произойдет при внедрении ЕАС УВД, возрастут предпосылки к опасному сближению самолетов в воздухе, и в таких условиях недопустима нечеткость в функционировании системы, в любом ее звене. Это выдвигает требование строить все звенья системы, в том числе и подсистему метеобеспечения, на современных принципах, с высокой надежностью работы, с расчетом на дальнейший рост оперативности и других показателей.

Современное метеорологическое обеспечение должно осуществляться непрерывно и с высокой информационной надежностью. При этом используются все возрастающие по объему потоки метеоинформации, поступающей как от измерительных средств аэропорта, так и от многочисленных внешних источников. Кроме того, некоторые метеопараметры, имеющие важное значение при обслуживании авиации (сдвиг ветра, турбулентность, наклонная видимость), еще не измеряются. По мере разработки методов и аппаратуры для их измерения произойдет дальнейший рост информационного потока. Справиться с получением и переработкой этой информации без применения современных технических средств невозможно.

В настоящее время метеорологическое обеспечение авиации осуществляется в рамках комплексной автоматизации. Разработаны и эксплуатируются автоматические аэродромные метеостанции КРАМС [1] и метеорологические радиолокаторы МРЛ

6], решающие частные задачи получения метеоинформации на аэродроме и в районе аэродрома.

Имеющийся опыт эксплуатации комплексов и анализ современных требований, предъявляемых к метеорологическому обеспечению аэропортов [3], позволяют определить общие требования, предъявляемые к аэродромной метеорологической измерительно-информационной системе АМИИС, которая могла бы выступить в качестве низового звена в системе метеообеспечения ЕАС УВД.

АМИИС должна удовлетворять следующим общим требованиям:

- обеспечить представление каждому потребителю оптимальной по составу, форме и объему информации;

- обладать информационной и технической совместимостью с системами посадки аэродрома, а также с высшими звеньями общесоюзной автоматизированной гидрометеорологической системы;

- учитывать особые требования конкретных аэропортов;

- обладать возможностью расширения решаемых задач по метеорологическому обеспечению.

Анализ информационной работы, выполняемой в настоящее время аэродромными метеостанциями АМСГ, рассмотрение требований ИКАО [3] и опыт эксплуатации метеорологических технических средств аэропортов [2, 5] позволяют сформулировать основные задачи, решаемые АМИИС. Эти задачи следующие:

- получение (путем измерения и обработки) информации, характеризующей метеорологическую ситуацию в районе аэродрома, включая информацию от радиолокатора и грозопеленгатора;

- автоматический прием алфавитно-цифровой метеорологической информации, поступающей по телефонным и телеграфным каналам связи;

- обработка и хранение всей метеоинформации;

- формирование и выдача результатов на средства отображения в метеоподразделение, экипажам вылетающих и заходящих на посадку самолетов, в каналы связи для передачи в районный центр УВД, в систему посадки аэродрома и другим потребителям;

- документирование информации, поступающей в АМИИС и выдаваемой службам аэропорта и в каналы связи;

- возможность ручного ввода информации, а также контроля и коррекции персоналом АМСГ всей поступающей и выдаваемой информации.

В соответствии с перечнем решаемых задач АМИИС должна состоять из следующих подсистем и устройств:

- подсистемы наземных метеорологических измерений,

- подсистемы метеорологического радиолокатора и грозопеленгатора,

- центрального вычислительного устройства ЦВУ,

- аппаратуры сопряжения с каналами связи АСКС,

- аппаратуры отображения и документирования,
- устройств ручного ввода данных.

ЦВУ с аппаратурой сопряжения, аппаратурой отображения и документирования и устройствами ручного ввода данных образуют самостоятельную подсистему приема, передачи и представления информации. ЦВУ связано через АСКС с АМСГ других аэропортов при помощи каналов связи системы прямых авиационных связей (СПАС) и Министерства связи. По СПАС поступает авиাপогода других аэропортов, в том числе зарубежных, и прогнозы погоды. Кроме регулярных сведений, поступают внеочередные штормовые оповещения, штормовые предупреждения и коррективы прогнозов и штормовых предупреждений. По телеграфу Министерства связи поступают также штормовые предупреждения от гидрометстанций и постов, расположенных в зоне подхода воздушных судов («штормовое кольцо»), и некоторая другая цифровая информация (синоптические и аэрологические сводки).

В память ЦВУ автоматически поступает также информация от подсистем наземных метеоизмерений и метеорологического радиолокатора своего аэропорта, а вручную (на первых этапах эксплуатации) — сформированная синоптической группой прогнозическая информация по своему аэродрому, прикрепленным АМСГ, трассам др.

Поступающая и обработанная в АМИИС информация образует местный банк данных по зоне своего аэропорта, аэропортам первой посадки, запасным аэродромам и трассам. Она используется на данной АМСГ и передается через АСКС в блоках прикрепленным АМСГ, в районный и зональный центры УВД, в территориальный гидрометцентр и другим заинтересованным потребителям.

Внутри аэродрома потребителями информации АМИИС являются:

- а) службы УВД аэропорта;
- б) экипажи воздушных судов, готовящихся к вылету;
- в) экипажи воздушных судов, находящихся в полете, заходящих на посадку;
- г) АМСГ.

Основным средством отображения алфавитно-цифровой и графической («штормовое кольцо», данные МРЛ и грозопеленгатора) информации на рабочих местах в метеоподразделении и службе УВД аэропорта, а также при консультации летного состава (вылетающего и находящегося в воздухе) служат экранные пульты (дисплеи). Дублирующим средством должно быть речевое сообщение. Для вылетающих экипажей формируется также полетная документация в виде бланкового материала. Ориентировочные объемы потоков информации, которые будут проходить через АМИИС, представлены в табл. 1.

Система строится таким образом, чтобы было обеспечено ее функционирование (хотя бы по упрощенному алгоритму работы) при выходе из строя любого устройства и даже группы устройств (применение резервирования, распределение функций обработки

Таблица 1

**Ориентировочные потоки и объемы информации в аэропорту
за 30-минутный интервал времени**

Вид информации	Число абонентов	Число знаков в телеграмме	Общее количество десятичных знаков
1	2	3	4

Входящая на узел связи информация

1. Фактическая погода, штормоповещения	80	100	8 000
2. Прогнозы и штормпредупреждения	80	200	16 000
3. Аэрологические и синоптические сводки	20	300	6 000
4. Фактическая погода, штормоповещения, штормпредупреждения и прогнозы по своему аэропорту	1	2000	2 000
			32 000

Исходящая информация

1. Информация для прикрепленных АМСГ	3—5	3000	9 000—15 000
2. Блок в территориальный ГМЦ (фактическая погода, данные МРЛ)	1	1000	1 000
3. Блок в РЦ УВД	1	2000	2 000
			до 18 000

Информация, потребляемая внутри аэропорта

1. Диспетчерские службы УВД (фактическая погода, прогноз, штормоповещения, выборочная информация по запасным аэродромам, данные МРЛ)	1	2 000
2. Информация для АМСГ (выборочные метеоданные из общего объема имеющейся информации)		2 000
3. Информация для летного состава		10 000
		14 000

между несколькими вычислительными устройствами, автоматическая передача функций (или их части) исправным звеньям при отказе некоторых элементов системы и др.).

Принципы построения системы, требования, предъявляемые к вычислительному комплексу и характеру сопряжения подсистем, должны обеспечивать гибкость системы, возможность ее развития, внедрения по этапам, изменения и совершенствования (постепенное внедрение автоматизированного анализа, совмещение разнородных источников информации при отображении, экстраполяция, составление авиационных прогнозов и др.).

На рис. 1 изображена структурная схема АМИИС. Подсистема метеорологических измерений в приземном слое выполняется в виде набора территориально разобщенных по аэродрому

дистанционных блоков ДБ, подключенных к центральному вычислительному комплексу ЦВК. ДБ целесообразно расположить в местах сосредоточения метеорологических приборов, главным образом в зонах стартов взлетно-посадочной полосы ВПП. В структуре АМИИС дистанционные блоки представляют собой

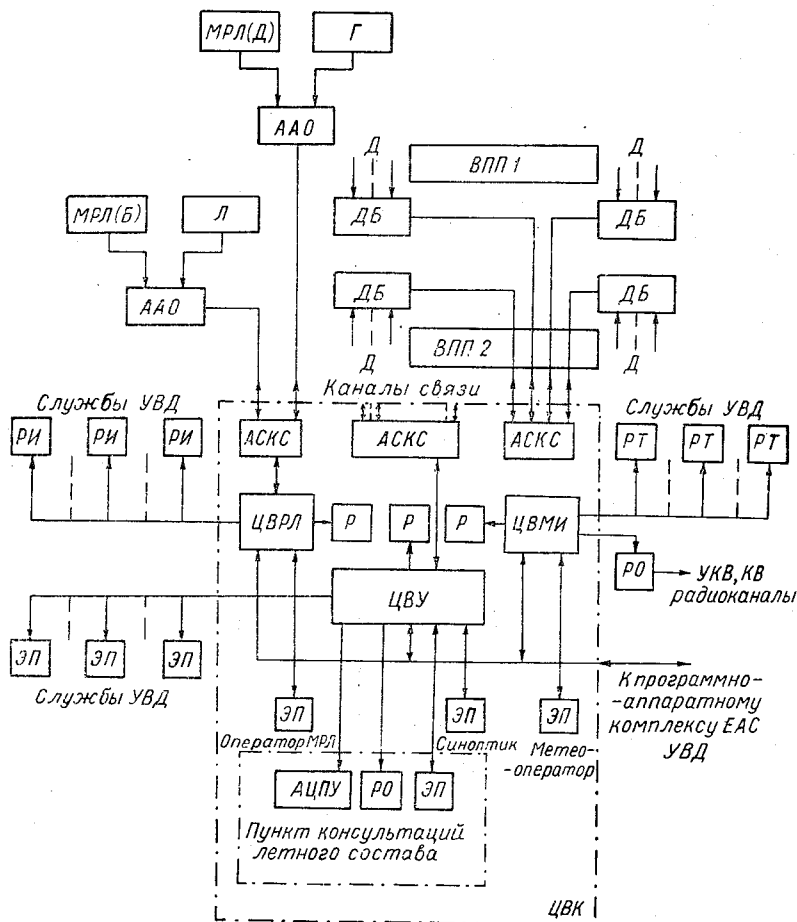


Рис. 1. Структурная схема АМИИС.

Д — метеорологические датчики, Г — грозопеленгатор, Л — лидар.

автономно работающие необслуживаемые измерительные комплексы, которые с целью обеспечения гибкости и унификации необходимо строить с применением микропроцессорных средств. Дистанционный блок должен измерять метеорологическую дальность видимости МДВ и дальность видимости на ВПП — дальность видимости огней высокой интенсивности ДВ ОВИ (на первом этапе МДВ и ДВ ОВИ могут получаться расчетным путем

через прозрачность атмосферы, измеряемую фотометром, яркость, фона, измеряемую яркомером, и автоматически получаемую информацию о силе света ОВИ), высоту нижней границы облаков, количество облаков (общее и нижнего яруса), параметры ветра (среднюю скорость, порывы, направление, среднее квадратическое значение вертикальной скорости, сдвиг ветра в приземном слое), атмосферное давление, температуру и влажность воздуха. По мере разработки соответствующих датчиков ДБ оснащается приборами для измерения наклонной дальности видимости, некоторых явлений (осадки, метель, пыльная буря и др.).

В табл. 2 представлены требования к точности измерения метеоэлементов, а в табл. 3 — пространственное размещение датчиков подсистемы наземных метеоизмерений на аэродроме. Дистанционные блоки должны работать по программе, близкой к программе работы станции типа КРАМС, используя сигналы встроенного таймера, синхронизируемого внешними сигналами точного времени. В обычных (неопасных для авиации) погодных условиях вся информация обновляется в запоминающем устройстве ДБ каждые 15 мин (с регулируемым опережением по отношению к целому часу времени измерения и выдачи информации). Обнаружив ухудшение опасных для авиации метеоэлементов, ДБ автоматически переходит в режим непрерывной работы по основным элементам (видимость, высота облаков, параметры ветра), обновляя их в своей памяти с периодичностью 10—15 с, выполняя вычисление на одно- или двухминутном скользящем интервале сглаженных и (или) дисперсионных и экстремальных характеристик, передавая их с минутной периодичностью по двухпроводному каналу связи в ЦВК.

Опыт эксплуатации современной станции КРАМС, являющейся прообразом ДБ наземной подсистемы АМИИС, показал недостаточное для удовлетворения вышеперечисленных требований быстродействие ее вычислительного устройства (300—500 операций в секунду) и недостаточную скорость работы аналого-цифрового преобразователя (одно преобразование в секунду). Для ДБ наземной подсистемы необходимо быстродействие на порядок выше (около 10 тыс. оп./с) при быстродействии АЦП не менее пяти преобразований в секунду. Этим требованиям удовлетворяют практически любые серийные микро-ЭВМ. Объем оперативного запоминающего устройства можно сохранить на уровне 200—300 слов двухбайтовой длины. Необходимый объем постоянного (полупостоянного) ЗУ для хранения программы составляет 3—5 тыс. слов.

Дистанционный блок должен содержать аппаратуру сопряжения с каналами связи для передачи данных в ЦВК, причем желательно, чтобы это могли быть не только автономные линии связи аэродрома, но и абонентские телефонные каналы, что потребуется на последующих этапах при расширении зоны контроля погоды в районе аэропорта, особенно по таким параметрам, как видимость, высота облаков и параметры ветра [5].

Перечень измеряемых параметров, диапазоны и точность измерения

Параметр	Диапазон измерения	Погрешность измерения	Примечание
Метеорологическая дальность видимости (МДВ)	20—6000 м	$\pm 10\%$ до 150 м $\pm 20\%$ свыше 1500 м	МДВ и ДВ ОВИ допускается получать расчетным путем через прозрачность атмосферы
Дальность видимости на ВПП (ДВ ОВИ)	100—6000 м	± 25 м до 150 м ± 50 м (150—500 м) ± 100 м (500—1000 м) ± 200 м свыше 1000 м $\pm 25\%$	
Наклонная дальность видимости (НДВ)	20—6000 м		НДВ измеряется по мере разработки аппаратуры
Прозрачность атмосферы	1—60 км ⁻¹	$\pm 10\%$	Используется при расчете МДВ и ДВ ОВИ
Яркость фона Сила света ОВИ	10—20 000 кд/м ²	$\pm 30\%$	Несколько ступеней в соответствии с требованиями ИКАО
Высота нижней границы облаков (вертикальная видимость)	20—1000 м	± 15 м до 150 м $\pm 10\%$ выше 150 м	
Количество облаков:			
общее	0—10 баллов	$\pm 1,0$ балл	
нижнего яруса	0—10 баллов	$\pm 1,0$ балл	
Скорость ветра (на двухминутном интервале):			
— средняя $\bar{V}$	1—50 м/с	$\pm (0,5 + 0,05\bar{V})$ м/с	Предусмотрено измерение компонента горизонтальной скорости (вдоль и поперек ВПП)
— порывы V_m	1—60 м/с	$\pm (1,0 + 0,05V_m)$ м/с	
— направление	0—360°	$\pm 10^\circ$	
— вертикальная (среднее квадратическое значение σ_w)	0—5 м/с (для σ_w)	$\pm 10\%$	
Сдвиг ветра (средний на двухминутном интервале) вдоль ВПП ΔV_x и поперек ВПП ΔV_y	0—10 м/с в слоях по 30 м до высоты 150 м	$\pm (1,0 + 0,1\Delta V)$ м/с	
Атмосферное давление	570—1090 мбар	$\pm 0,2$ мбар	Допускается разбивать диапазон в зависимости от высоты над уровнем моря
Температура воздуха	от —60 до +50°C	$\pm 0,4^\circ\text{C}$	Ниже —60°C (до —70°C) обеспечено измерение температуры с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$
Влажность воздуха (относительная)	20—100%	$\pm 5\%$ при положительной температуре, $\pm 10\%$ при отрицательной	

**Пространственное размещение измерительной аппаратуры
наземной подсистемы (при одной ВПП)**

Контролируемые параметры	Основные пункты установки (количество)	Дополнительные пункты установки (количество)	Примечание
Прозрачность атмосферы (МДВ, ДВ ОВИ)	Старты ВПП (2), БПРМ (2), сере- дина ВПП (1)	Места установки и число дополни- тельных приборов определяется по мере совершенст- вования методики и аппаратуры	
Наклонная даль- ность видимости Яркость фона Сила света ОВИ Высота нижней границы облаков Параметры ветра	Старты ВПП (2) Старты ВПП (2) Старты ВПП (2) Старты ВПП (2), БПРМ (2) Старты ВПП (2), середина ВПП (1)	В стороне от ВПП на башнях (1—3 пункта) в без- опасной полосе	На основных пунк- тах устанавлива- ются приборы на двух уровнях. На дополнительных пунктах по одному прибору на высоте 30—60 м
Атмосферное дав- ление Температура воз- духа	Старты ВПП (2) Старты ВПП (4)		На стартах произ- водятся измере- ния на двух уров- нях
Влажность воз- духа	Старты ВПП (2)		

ЦВК состоит (см. рис. 1) из трех микро-ЭВМ. Обработку дан-
ных от ДБ выполняет одна из них — центральный вычислитель
метеоинформации ЦВМИ. ЦВМИ предназначен для приема дан-
ных от ДБ через аппаратуру сопряжения АСКС, автоматического
анализа исправности измерительных каналов путем сличения дан-
ных основных и резервных каналов и привлечения данных по пло-
щади, подачи управляющих команд в ДБ, обработки информации
и выдачи данных. Выдача данных производится на общую дву-
направленную шину, связывающую все три ЭВМ в единый вычис-
лительный комплекс, а также на речевой ответчик РО для пере-
дачи в эфир текущей погоды и прогноза на час, на аппаратуру до-
кументирования и регистрации Р, на резервные цифровые табло
РТ и на экранный пульт метеоператора АМСГ. Этот экран-
ный пульт предназначен для вызова необходимой информации
из банка данных ЦВК, а также для коррекции и ручного ввода

недостающей метеоинформации: бортовой погоды, неизмеряемых автоматически метеопараметров и явлений, прогностической информации и др.

ЦВМИ предназначен на последующих этапах решать задачи статистической обработки метеоданных и поэтому объем его оперативного запоминающего устройства должен быть увеличен до 1000 слов при объеме памяти для программы 10—20 тыс. слов.

Аппаратура сопряжения с каналами связи ЦВМИ должна быть рассчитана на значительное число (до 20) каналов при двухполосном аэродроме с учетом резервных и вынесенных ДБ.

В качестве резервных табло ЦВМИ предполагается использовать малогабаритные индикаторные устройства МИУ от станции КРАМС. На случай полного выхода из строя ЦВК предусмотрен режим работы от блока ручного ввода БРВ МИУ, когда данные от одного из дистанционных блоков поступают в память БРВ и после контроля и коррекции метеоператором подаются на выносные МИУ, на речевой ответчик РО и регистрируются при этом устройством документирования Р.

Подсистема метеорологического радиолокатора и грозопеленгатора строится на аналогичных принципах. Она содержит МРЛ дальней зоны и грозопеленгатор, предназначенные для контроля опасных явлений в радиусе до 150 км в зоне подходов к аэродрому, и МРЛ ближней зоны с лидаром для локализации опасных метеорологических явлений в радиусе до 20 км в зоне снижения самолетов до уровня круга и захода на посадку. Оба комплекса, МРЛ (Д) и МРЛ (Б), содержат в своем составе аппаратуру анализа и обработки данных ААО, которую рационально строить на основе микро-ЭВМ, аналогичных используемым в ДБ подсистемы метеоизмерений приземного слоя. Сжатая в ААО информация поступает по двухпроводным каналам связи в цифровом виде в ЦВК через аппаратуру сопряжения АСКС на центральный вычислитель радиолокационных данных ЦВРЛ, представляющий собой микро-ЭВМ и предназначенный для совместной обработки данных МРЛ ближней и дальней зон и грозопеленгатора с привлечением данных от других подсистем АМИИС.

К ЦВРЛ подключены экранный пульт оператора МРЛ, предназначенный для контроля и коррекции радиолокационной информации, ручного ввода недостающих данных, а также устройство документирования и регистрации Р.

Экранный пульт оператора МРЛ должен позволять:

- а) вводить на экран графическую и алфавитно-цифровую информацию при помощи «светового карандаша» и клавиатуры;
- б) выводить на экран по запросу графическую и алфавитно-цифровую информацию.

Микро-ЭВМ ЦВРЛ по устройству и техническим характеристикам аналогична примененной в ЦВМИ, однако графический дисплей ЦВРЛ потребует соответственно увеличить объем оперативного запоминающего устройства.

Технической основой подсистемы приема—передачи и пред-

ставления метеоинформации является центральное вычислительное устройство ЦВУ с аппаратурой сопряжения с каналами связи АСКС. ЦВУ с аппаратурой сопряжения должно обеспечивать автоматический прием метеоинформации из каналов связи по общей двунаправленной шине от остальных подсистем АМИИС, автоматическую выдачу метеоинформации как потребителям внутри аэропорта, так и внешним потребителям по каналам связи.

В связи с тем, что в настоящее время значительная доля внешней метеорологической информации поступает на АМСГ по связи гражданской авиации ГА, в процессе программирования ЦВУ функции сбора, обработки, передачи данных в каналы связи и отображения в службах УВД в зонах аэропорта и районного центра согласуются и распределяются между АМИИС и программно-аппаратным комплексом ЕАС УВД (центральный коммутатор связи ЦКС, система посадки аэродрома и др.), связь с которыми осуществляется как по каналам связи при значительном удалении, так и по общей двунаправленной шине.

В качестве ЦВУ в связи с этим используется также микро-ЭВМ, но с увеличенным существенно объемом оперативного запоминающего устройства (не менее 10 тыс. слов) и внешним накопителем, поскольку необходимо принимать информацию от нескольких десятков аэропортов и хранить эту информацию и результаты выдачи потребителям в течение двух-трех суток.

Аппаратура сопряжения этой подсистемы должна быть рассчитана на 20—25 каналов связи, чтобы выступить в качестве резервной при выходе из строя соответствующей аппаратуры остальных подсистем.

Выдача метеоданных оперативным службам аэропорта предусматривается через аппаратуру отображения системы посадки аэродрома, представляющую собой совмещенные навигационно-метеорологические экранные пульты. Однако в АМИИС предусмотрено подключение к ЦВУ и собственных экранных пультов, предназначенных для тех диспетчерских служб, у которых нет совмещенных пультов системы посадки.

Внешними потребителями информации ЦВУ являются:

- а) районная автоматизированная система УВД;
- б) другие аэропорты.

Внутри аэропорта информация выдается на экранные пульты:

- а) диспетчерам служб УВД
- б) АМСГ аэродрома, включая пункт консультации летного состава.

Предусматривается, что летный состав необходимую метеорологическую информацию будет получать по запросу от автоматических цифropечатающих устройств АЦПУ на бланках, от речевого ответчика и через экранный пульт (дисплей).

На средствах индикации рассматриваемой подсистемы должны отображаться:

- а) все виды метеоинформации, находящиеся в банках данных ЦВУ и программно-аппаратного комплекса ГА,— по запросу;

б) штормовые оповещения и предупреждения по району аэродрома — принудительно;

в) сведения о фактической погоде своего аэропорта должны передаваться через 1, 5, 15, 30 мин в зависимости от условий погоды.

Предусмотрен также, как указывалось выше, ввод информации для диспетчерского состава в автоматизированную систему посадки аэродрома и ее отображение на средствах индикации этой системы.

Экранный пульт синоптика АМСГ должен позволять:

а) выводить на экран любые сведения, поступающие в ЦВУ, и любую информацию, содержащуюся в банках данных ЦВУ и программно-аппаратного комплекса ГА;

б) вводить в ЦВУ алфавитно-цифровую информацию с помощью клавиатуры;

в) корректировать содержащуюся в памяти ЦВУ алфавитно-цифровую информацию;

г) вводить сформированную персоналом АМСГ графическую информацию (с помощью «светового карандаша»).

Экранные пульта оперативных подразделений служб УВД должны обеспечивать вывод на экраны метеорологической информации, необходимой для оперативной работы по управлению воздушным движением. Ограничения по составу метеоинформации, выводимой на каждое рабочее место, должно реализоваться программным путем.

К ЦВУ подключена аппаратура документирования информации Р, способная на срок до двух-трех суток регистрировать на техническом носителе всю выдаваемую из ЦВУ информацию.

В дальнейшем желательно подключить к ЦВУ аппаратуру графического построения (синоптических и кольцевых карт погоды, карт барической топографии, прогностических карт погоды и т. д.). Применение этой аппаратуры будет зависеть от принятой окончательно формы выдаваемой экипажам полетной документации и от способа передачи в АМИИС из каналов связи графической информации (в настоящее время используются факсимильные каналы связи).

Предполагается располагать аппаратуру ЦВК АМИИС на командно-диспетчерском пункте. Однако желательно, чтобы программно-аппаратный комплекс ГА находился в одном здании с ЦВК, что позволит связать их двунаправленной шиной в единый вычислительный комплекс с оперативным обменом информацией между их банками данных.

Связь всех трех ЭВМ (ЦВРЛ, ЦВУ, ЦВМИ) общей двунаправленной шиной прямого обмена данными повышает надежность ЦВК, поскольку при выходе из строя любого из этих вычислителей возможно переключение (полное или частичное) задач обработки информации вышедшего из строя блока на исправные вычислители. Кроме того, структура с тремя ЭВМ в составе ЦВК позволяет разделить АМИИС на три самостоятельные подсистемы, что

открывает возможность их раздельного использования, а также поэтапного внедрения и наращивания.

Для повышения оперативности работы АМИИС должна оснащаться измерительными метеорологическими средствами, не требующими подготовки, непрерывно выдающими на выходе информацию. Должны быть предусмотрены встроенные устройства автоматического контроля исправности узлов системы (автоматические тесты, эталонные источники информации и т. д.). Устройства автоматики должны иметь средства сигнализации о неисправности средства ручного контроля работы, обеспечивающие обнаружение мест отказов.

Периодические проверки и контроль в эксплуатации метеорологических измерительных средств АМИИС должны производиться без нарушения нормальной работы. Поэтому предусматриваются резервные датчики и блоки, отключение части оборудования на время процедуры проверки при этом не нарушает нормальное функционирование системы. Для этой цели должны использоваться передвижные поверочные лаборатории, оснащенные образцовыми средствами измерений.

Основным критерием для оценки экономического эффекта от внедрения АМИИС является повышение качества оперативного метеорологического обслуживания с целью обеспечения полной безопасности полетов по метеоусловиям, ликвидации задержек вылетом рейсовых самолетов, возвратов и посадок летательных аппаратов на запасных аэродромах из-за недостаточности, неточности, запаздывания метеорологической информации. С внедрением АМИИС будет достигнуто полное соответствие информационного обслуживания взлета и посадки самолетов предъявляемым со стороны ЕАС УВД требованиям. При этом:

- сокращается время между получением информации и ее отображением;

- важная штормовая информация при возникновении опасных для авиации метеорологических ситуаций будет поступать потребителям немедленно;

- улучшатся условия работы метеоспециалистов, что позволит в последующем сократить численность метеоподразделений на аэродромах.

Экономический эффект от внедрения АМИИС проявляется как рост общего роста эффективности воздушных транспортных перевозок от внедрения ЕАС УВД, ибо эффективное функционирование этой системы невозможно без соответствующей ей по техническому уровню метеорологической подсистемы.

Особенностью АМИИС по сравнению с сетевыми метеорологическими измерительными системами является наличие, высокая оперативность и надежность специальных метеоизмерений (видимость на ВПП, сдвиг ветра, пространственная локализация опасных явлений и др.). Вместе с тем, эта система дает по сравнению с обычными сетевыми метеостанциями значительно больший объем информации, которая должна использоваться также

в общегосударственной службе для целей контроля природной среды и обслуживания народного хозяйства, а также для научно-исследовательских разработок в области изучения климата и прогнозирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическая станция КРАМС/Под ред. Л. П. Афиногенова и М. С. Стернзата.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 217 с.
2. Брылев Г. Б., Низдойминова Г. Л., Степаненко В. Д. Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации. Обзор.— Обнинск: изд. ВНИИГМИ—МЦД, 1978.— 57 с.
3. ВМО, технический регламент. Метеорологическое обслуживание международной авиации. Т. 2. Третье издание. Женева, 1970.— 67 с.
4. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов/Под ред. М. А. Петросянца и В. Д. Решетова.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 220 с.
5. Романов Е. В. Опыт эксплуатации КРАМС в аэропортах гражданской авиации.— Труды ГГО, 1977, вып. 377, с. 26—31.
6. Шевела Г. Ф., Ваксенбург С. И., Васильев Г. В. Особенности построения метеорологического радиолокатора МРЛ-5.— В кн.: Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. М., 1978, с. 175—176.

Р. А. Круглов

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДИМОСТИ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ (ВПП) В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ ОБЛАЧНОСТИ

**О необходимости усовершенствования методики определения
видимости ВПП на глиссаде снижения по наземным данным**

При метеорологическом обслуживании авиации оптическое состояние атмосферы в районе ВПП оценивают по критерию минимума погоды. С этой целью измеряют высоту облаков и метеорологическую дальность видимости и сравнивают полученные результаты с минимально допустимыми значениями.

При хорошей видимости у земной поверхности высоту облаков тождествляют с высотой обнаружения ориентиров ВПП. Однако опыт эксплуатации наземной аппаратуры для определения высоты облаков на аэродроме указывает на значительные расхождения в оценках высоты облаков по наземным данным и данным самолетного зондирования. Одной из основных причин таких расхождений является неопределенность понятия «высота облаков», отсутствие в определении этого параметра метеорологического содержания. По этой причине результаты измерений высоты облаков не содержат информации о прозрачности подоблачного слоя атмосферы и могут служить лишь для приближенной оценки высоты обнаружения наземных ориентиров. Можно утверждать, что получаемая с помощью наземной аппаратуры информация о высоте облаков, как исходная для оценки высоты обнаружения ВПП, не отвечает установленным требованиям по точности и достоверности. Само определение высоты облаков требует уточнения или замены в зачете. В пользу этого утверждения приведем следующие соображения.

Существующая методика инструментальных измерений высоты облаков исходит из ошибочного предположения о том, что на уровне нижней границы облаков имеет место скачок оптической плотности. Следствием такого предположения является неверное

закключение о том, что прозрачность подоблачного слоя оказывается всегда достаточной для обнаружения наземных ориентиров. В действительности переход от прозрачного к более мутному облачному слою совершается постепенно. Следовательно, по уровню, зафиксированному прибором в качестве высоты облаков, всегда находится слой, оптическая толщина которого не равна нулю. Дальность видимости в этом слое будет зависеть от того, какое значение прозрачности фиксируется прибором на уровне нижней границы облаков.

Существует мнение, что неопределенность при оценке высот обнаружения ВПП по результатам измерений высоты облаков будет устранена, если удастся создать прибор, который в качестве высоты нижней границы облаков будет фиксировать слой с определенным, установленным в процессе градуировки значение прозрачности (метеорологической дальности видимости). Тогда по крайней мере при хорошей видимости у земли, можно будет утверждать, что прозрачность в подоблачном слое не меньше значения, установленного в процессе градуировки прибора. Однако неопределенность таким способом не устраняется, поскольку каждому эксплуатационному минимуму погоды соответствует свое значение дальности видимости на глиссаде снижения самолета. Следовательно, для каждого минимума погоды требуется устанавливать свое градуировочное значение прозрачности и, как это ни парадоксально, при одном и том же оптическом состоянии атмосферы над ВПП высота облаков будет разной — в зависимости от принятого на аэродроме минимума погоды.

Из-за неопределенности метеологического содержания понятия «высота облаков» методика определения условий видимости ВПП при наличии низкой облачности несовершенна и требует существенной доработки.

Весьма перспективным в этом отношении специалисты считают исследования, направленные на разработку методики и аппаратуры для определения прозрачности непосредственно вдоль глиссады снижения самолета — так называемой наклонной дальности видимости. При этом предлагается измерять среднее значение прозрачности на исследуемом отрезке глиссады снижения. Однако в сильно неоднородной атмосфере информация о средней прозрачности слоя атмосферы является недостаточной для получения надежных данных об условиях видимости в этом слое. Так, например, средняя прозрачность двух одинаковых по толщине горизонтальных слоев будет иметь допустимое по условиям посадки самолета значение, если один из слоев абсолютно прозрачен, а другой, расположенный над первым, имеет прозрачность в два раза меньше допустимой. В этом случае на условия видимости ВПП в направлении глиссады снижения сильное влияние оказывает вуалирующий эффект непрозрачного слоя, и ВПП может быть уверенно обнаружена только с высоты нижней границы этого слоя. Для уменьшения ошибок в таких случаях необходимо иметь информацию о вертикальном распределении оптических н

породностей. Однако до сих пор не существует методики практического использования такой информации для нужд авиации. Не разработаны также научные обоснования к методике получения и использования информации о так называемой вертикальной видимости.

Обоснование возможности усовершенствования методики получения информации о дальности видимости ВПП на глиссаде снижения по наземным данным

Приведенные рассуждения показывают, что одной из основных причин больших расхождений в оценках высоты обнаружения ВПП к результатам инструментальных измерений высоты облаков и данным самолетного зондирования является неполнота получаемых сведений о горизонтальной прозрачности атмосферы на различных высотах в подоблачном слое. Как было показано выше, недооценка влияния мелкомасштабных в вертикальном направлении неоднородностей при слоистой их структуре может приводить к грубым ошибкам при определении видимости ВПП на глиссаде снижения. Даже относительно тонкие, но имеющие большую протяженность в горизонтальных направлениях слои атмосферы могут приводить к опасным по продолжительности потерям видимости ориентиров ВПП, если прозрачность этих слоев оказывается ниже допустимого значения. Это объясняется тем, что пилот снижающегося самолета наблюдает ориентиры ВПП в направлении глиссады снижения, т. е. в направлении, близком к горизонтальному. По этой причине для обеспечения успешной посадки необходимо свести к минимуму вероятность встречи самолета с оптически плотными горизонтальными слоями на конечном участке глиссады снижения. С этой целью необходимо иметь информацию о нижней границе потери горизонтальной видимости как минимальной высоте, начиная с которой пилот снижающегося самолета не будет терять визуального контакта с ВПП вплоть до приземления. Процедура получения такой информации должна включать в себя следующие основные операции:

1. Измерение локальных значений прозрачности в вертикальном направлении.
2. Сравнение полученных значений прозрачности с предельными значениями, соответствующими эксплуатационному минимуму погоды, принятому на аэродроме.
3. Определение минимальной высоты, на которой обнаружено снижение прозрачности относительно предельно допустимого значения.
4. Пространственное и/или временное осреднение полученных результатов с целью уменьшения ошибок, связанных с локальным характером измерений.

Таким образом, оказывается возможным по данным вертикального зондирования получать необходимую информацию для

оценки условий видимости ВПП в направлении глиссады снижения. При этом в качестве критерия оценки используется параметр, имеющий вполне определенное метрологическое содержание, — минимальная высота, на которой метеорологическая дальность видимости ухудшается до предельно допустимого значения, соответствующего эксплуатационному минимуму погоды. Условия, при которых обеспечивается наилучший эффект от использования предложенной методики, ограничены допущением горизонтально-слоистой структуры оптических неоднородностей. Однако это ограничение не уменьшает практической ценности методики. Во-первых, для условий рассматриваемой задачи, т. е. при наличии низкой облачности, указанное допущение вполне оправдано. Во-вторых, как было показано выше, горизонтально-слоистая структура представляет наибольшую опасность при посадке самолетов, поскольку оптически плотные слои оказываются протяженными в направлении глиссады снижения. В-третьих, такая структура является наиболее характерной для условий ограниченной видимости на аэродроме.

С точки зрения практической реализации методики зондирование в вертикальном направлении является более предпочтительным по сравнению с зондированием в направлении глиссады снижения. Во-первых, потому, что требуется значительно меньшая дальность зондирования — десятки метров вместо сотен метров при зондировании по наклонным трассам. Это позволит заметно сократить требуемую мощность излучения. Во-вторых, потому, что исключается вероятность ослепления пилота источником излучения. В-третьих, потому, что открывается возможность практической реализации методики на существующих технических средствах — светолокационных измерителях высоты облаков и т. д. Соответствующей модернизации блоков обработки эхо-сигналов.

Таким образом, возможность усовершенствования методики получения информации о высоте обнаружения ВПП с теоретической и технической точки зрения представляется обоснованной.

Предложения по уточнению терминологии и содержания понятия «минимум погоды»

Опираясь на вышеизложенные соображения, нетрудно прийти к заключению о том, что параметр «нижняя граница потери горизонтальной видимости», предложенный в качестве критерия для оценки дальности видимости ВПП на глиссаде снижения в условиях низкой облачности, является достаточно универсальным для использования в различных метеоусловиях, в том числе и при отсутствии облачности.

Поясним это на примерах, отражающих наиболее типичные метеорологические ситуации (рис. 1).

На рис. 1 а показан случай, характерный для низкой облачности, когда наблюдается ухудшение видимости с высотой. Рису-

к 1 б отражает противоположную ситуацию, когда при отсутствии облаков имеет место ухудшение горизонтальной видимости вблизи ВПП. Наконец, случай, когда ограниченной видимости на ПП сопутствует низкая облачность, показан на рис. 1 в.

Анализ возможных метеорологических ситуаций показывает, что для любого закона распределения оптических неоднородностей по вертикали вопрос о возможности визуального взлета или посадки

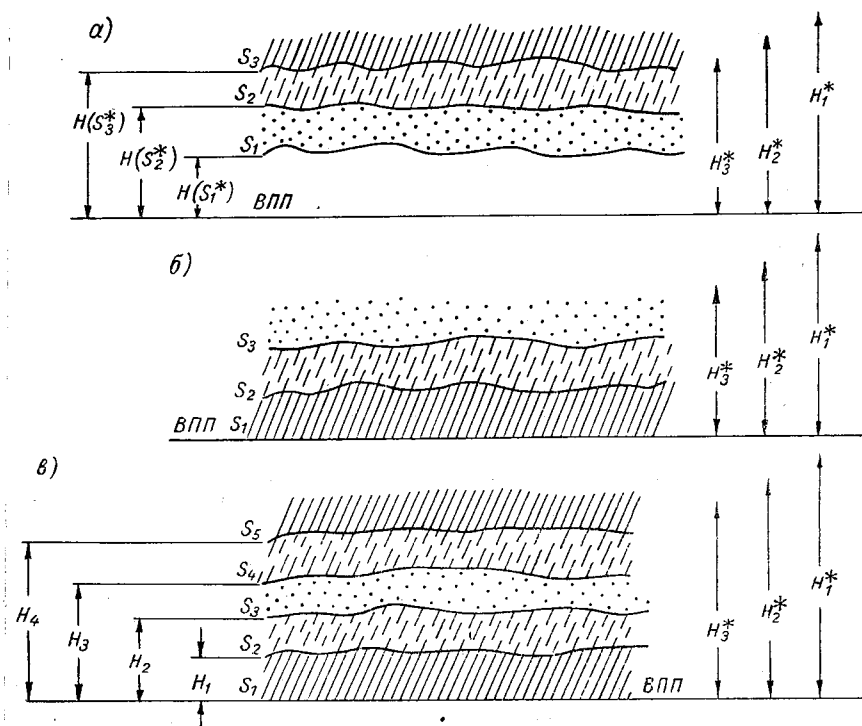


Рис. 1. Случай ухудшения (а) и улучшения (б) видимости с высотой и случай, когда ограниченной видимости на ВПП сопутствует низкая облачность (в).

самолета однозначно решается путем сопоставления минимальной высоты потери горизонтальной видимости (нижней границы потери горизонтальной видимости) с минимально допустимым ее значением, соответствующим эксплуатационному минимуму погоды. Подача разрешается, если выполняется неравенство

$$H(S_n^*) > H_n^* \quad (1)$$

где $H(S_n^*)$ — значение нижней границы потери горизонтальной видимости по прибору; S_n^* — минимально допустимое значение видимости для данного эксплуатационного минимума погоды; $n = 1, 2, 3$ — индекс для обозначения категории минимума; H_n^* —

минимально допустимое значение высоты потери горизонтальной видимости или высоты, на которой видимость становится меньше S_n^* по отношению к нижележащим слоям.

Выполнение неравенства (1) является необходимым и достаточным для обеспечения гарантии того, что ниже высоты H_n^* снижающегося самолета не встретит слой атмосферы с дальности видимости меньше S_n^* , и наоборот, если неравенство (1) не выполняется или выполняется с обратным знаком (рис. 1 а), то существует опасность аварии при посадке самолета. Например, если метеорологическая дальность видимости в каждом из слоев рис. 1 а равна предельно допустимому значению для соответствующей категории минимума погоды ($S_1=S_1^*$, $S_2=S_2^*$, $S_3=S_3^*$) а высота нижней границы каждого слоя меньше минимально допустимого значения для той же категории, т. е. $H(S_1)<H_1^*$, $H(S_2)<H_2^*$, $H(S_3)<H_3^*$, то успешная посадка самолета не может быть гарантирована. В данном случае для любой категории минимума погоды высота уверенного обнаружения ориентиров ВПП оказывается меньше минимально допустимого значения, т. е. $H(S_1^*)<H_1^*$, $H(S_2^*)<H_2^*$, $H(S_3^*)<H_3^*$. Параметр $H(S_n^*)$ отражает реально существующую зависимость горизонтальной дальности видимости от высоты, что хорошо видно на рис. 1 а.

С точки зрения оценки универсальности критерия (1) представляет интерес метеорологическая ситуация, изображенная на рис. 1 б и в. В настоящее время при отсутствии облаков или когда высота облаков H больше минимально допустимого значения H_n^* , допустительно привлекают результаты измерений горизонтальной прозрачности атмосферы на ВПП. Если, например, горизонтальная дальность видимости у поверхности ВПП меньше допустимого значения S_n^* , то принимают решение о запрещении посадки. С точки зрения обсуждаемого здесь критерия $H(S_n^*)$ рассмотренная метеорологическая ситуация означает, что пилот снижающегося самолета потеряет видимость ориентиров ВПП в момент приземления т. е. на нулевой высоте. Другими словами, минимальная высота потери горизонтальной видимости равна 0, т. е. заведомо меньше минимально допустимого значения H_n^* . Условие запрета на посадку примет вид

$$H(S_n^*)=0 < H_n^*.$$

Для метеорологической ситуации, изображенной на рис. 1 б характерными являются три условия запрета на посадку для трех рассматриваемых категорий минимума погоды. Если непосредственно над ВПП находится слой, в котором значение метеорологической дальности видимости не превышает минимально допустимой для любой категории минимума погоды, т. е. если $S_1=S_3^*<S_2^*<S_1^*$, то $H(S_1^*)=H(S_2^*)=H(S_3^*)=0$. Следовательно, посадку

олжна быть запрещена для любой категории минимума погоды. Если же $S_1 = S_2^*$, то $H(S_1^*) = H(S_2^*) = 0$, но $H(S_3^*) > H_3^*$, и, таким образом, для третьей категории минимума погоды посадка разрешается. Это значит, что на любой высоте ниже H_3^* видимость вдоль глиссады снижения больше S_3^* . Наконец, если $S_1 = S_1^*$, то $I(S^*) = 0$, $H(S_2^*) > H_2^*$, $H(S_3^*) > H_3^*$, и, таким образом, запрет действует только для первой категории минимума.

Условие запрета на посадку не изменится, если одновременно на некоторой высоте H_4 (рис. 1 в) находится слой, горизонтальная дальность видимости в котором меньше S_n^* . Однако, если в той же ситуации $S_1 > S_n^*$, то условие запрета примет вид

$$H(S_n^*) = H_4 < H_n^*.$$

Характерными для такой метеорологической ситуации являются следующие условия запрета на посадку. Если $S_1 = S_3^* < S_5$, то $I(S_3^*) = H(S_2^*) = H(S_1^*) = 0$, если $S_5 = S_3^* < S_1$, то $H(S^*) = H_4$, $I(S_2^*) = H(S_1^*) = 0$, если, наконец, $S_5 = S_2^* < S_1$, $S_1 = S_1^*$, то $I(S_3^*) > H_4$, $H(S_2^*) = H_4$, $H(S_1^*) = 0$.

Преимущество обобщенного параметра $H(S_n^*)$ перед параметрами «высота нижней границы облаков» и «метеорологическая дальность видимости» состоит в его универсальности и конкретном физическом и метеорологическом содержании.

Параметр «высота нижней границы облаков» не отвечает установленным требованиям по точности и достоверности оценки условий видимости ВПП на глиссаде снижения и должен быть исключен из содержания понятия «минимум погоды».

Целесообразно в качестве критерия минимума погоды использовать обобщенный метеопараметр «минимальная высота потери горизонтальной видимости».

Это позволит осуществить единый подход при оценке условий видимости ВПП, независимо от метеорологического явления, сопутствующего ухудшению видимости (облачность, туман, дымка, осадки), а кроме того, избежать неопределенных и противоречивых формулировок технических требований к методике и аппаратуре для определения условий видимости ВПП.

Можно надеяться, что уточнение существующего содержания понятия «минимум погоды» позволит определить правильные направления в усовершенствовании методики и аппаратуры, чтобы получить удовлетворительное решение задачи определения и прогнозирования условий видимости ВПП в самое ближайшее время.

Следует иметь в виду, что рассмотренные здесь предложения автора носят характер рекомендаций. Приведенные соображения и полученные выводы не являются окончательными и требуют дальнейшего изучения.

ИНТЕРВАЛЫ ОСРЕДНЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ «МГНОВЕННЫХ» ЗНАЧЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОСАДКИ САМОЛЕТА

Вопрос о границах осреднения при формировании «мгновенных» значений метеорологических величин (пульсаций метеорологического поля) тесно связан с технологией метеорологического обслуживания авиации, а также с проектированием и эксплуатацией метеорологической аппаратуры. Авиации необходима информация о мгновенных значениях параметров ветра U , видимости W , высот нижней границы облаков (ВНГО) H и других метеорологических величин как о факторах, от которых зависит безопасность и регулярность полетов. Интервалы осреднения при формировании мгновенных значений должны находиться в этой связи из минимальных размеров, влияющих на объект пульсаций, т. е. должны быть согласованы с обеспечиваемым объектом и решаемой им задачей. Вопрос о выборе интервалов осреднения до настоящего времени окончательно не решен. Например, интервал осреднения при измерении мгновенной скорости ветра в СССР рекомендуется принимать равным 3 с [7], в Англии же принят 30 с интервал осреднения [12].

ИКАО рекомендован интервал осреднения дальности видимости равный 0,5—1,0 мин [2], но при этом не оговаривается база наблюдений. Кроме того, как известно, результаты измерений на этом интервале нерепрезентативны. Не выработаны окончательные рекомендации по осреднению при формировании результатов мгновенных измерений высоты нижней границы облаков. Между тем решение вопроса о границах осреднения ВНГО неразрывно связано с задачами достижения сопоставимости результатов измерений ВНГО приборами и пилотом; разработкой определения самого понятия ВНГО.

В настоящей статье производится выбор интервалов осреднения при формировании мгновенных значений основных метеорологических величин с учетом параметров самолета, пилота и этапов посадки.

Метеорологические измерения в конечном итоге дают информацию, осредненную, дискретизированную и квантованную по времени, пространству и уровню. Осреднение и дискретизацию во времени в большинстве случаев можно свести к осреднению и дискретизации по пространству. Вопрос об осреднении и дискретизации измерений необходимо рассматривать с четырех сторон.

Во-первых, существующие измерительные приборы позволяют непосредственно регистрировать изменения во времени компонент метеовеличин в фиксированных «точках» пространства. При измерениях находятся средние по некоторому временному интервалу t_0 так называемые «мгновенные» значения метеовеличин.

Хотя при получении дискретных отсчетов и неизбежно пространственно-временное осреднение, интервал осреднения, обусловленный конструкцией первичных преобразователей, в ряде случаев называется малым.

Если величина t_0 выходит за рамки требований, предъявляемых измерению, то получают избыточную или недостаточную информацию, искаженное представление о процессе и степени влияния метеорологического поля на объект, в интересах которого производятся измерения. Интервал корреляции «мгновенных» отсчетов, как правило, небольшой, поэтому результат измерения нельзя распространить без большой ошибки на сколько-нибудь значительную область, и операторская значимость отдельного измерения незначительна.

Во-вторых, чтобы получить достаточно полное представление фактической погоде в районе аэродрома, целесообразно производить осреднение метеовеличин на интервале времени $t_0 > t_0$. На интервале t_0 вычисляются математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение $\sigma_x(t_0, t_0)$ «мгновенных» отсчетов. Интервальные характеристики процесса значительно более устойчивы, чем «мгновенные» отсчеты. Метеорологические величины $\bar{x}(t_0)$, осредненные на оптимальном интервале осреднения $t_0 = t_{\text{опт}}$, являются репрезентативными предикторами для прогноза и позволяют с минимальной погрешностью экстраполировать результаты измерений на заданные время и пространство. Средний квадрат погрешности статистического инерционного прогноза (формальной экстраполяции) $\sigma_{\text{и, } x}^2$ с заблаговременностью $t_{\text{п}}$, высокочастотной составляющей процесса $x(t_0)$ находится по формуле

$$\sigma_{\text{и, } x}^2 = \sigma_{\text{и, } x}^2(t_0, t_0, t_{\text{п}}) = [x(t_0, t^0 + t_{\text{п}}) - \bar{x}(t_0, t^0)]^2, \quad (1)$$

где t^0 — начало отсчета времени.

Если представить метеорологический процесс в виде случайного колебания математического ожидания $\bar{x}(t_0, t)$, относительно которого наблюдаются пульсации высокочастотной составляющей, то дисперсию погрешности $\sigma_{\text{и, } x}^2$ для стационарного в широком смысле процесса можно записать в виде

$$\sigma_{\text{и, } x}^2(t_0, t_0, t_{\text{п}}) = b_{\bar{x}}(t_0, t_{\text{п}}) + \sigma_x^2(t_0, t_0), \quad (2)$$

где $b_x(t_0, t_n)$ — структурная функция низкочастотной компонент $\bar{x}(t_0, t_n)$.

Имея надежную аппроксимацию первого и второго членов (2) нетрудно получить $t_0 = l_{\text{опт}}$ аналитически или определить по экспериментальным зависимостям графическим методом.

В-третьих, речь идет о том, с какой периодичностью (скважностью) во времени Δt необходимо производить измерения и выдавать информацию потребителю.

В-четвертых, кроме дискретизации и осреднения по времени (пространству), измеряемая величина квантуется по уровню. Квантование по уровню заключается в представлении величины в виде конечного числа разрешенных уровней. Квантование по уровню в процессе измерения обычно равномерное, а при передаче и представлении метеоинформации неравномерное. Неравномерное квантование позволяет исключить избыточность информации и удовлетворить требования к точности при приближении измеряемой величины к опасному значению.

Масштабы наблюдений

Мгновенную скорость ветра на высоте h получают осреднение по цилиндрической области пространства длиной $l_{0,u} = U_h \tau_{0,u}$, где U_h — скорость ветра на высоте установки датчика по направлению ветра, а сечение определяется диаметром первичного преобразователя (винта). Диаметр винта $d_v \ll l_{0,u}$, поэтому пространственный масштаб осреднения $\approx l_{0,u}$.

Осреднение ВНГО производится по траектории длиной $l_{0,H} = U_H \tau_{0,H}$. Площадь осреднения ВНГО определяется размерами первичных преобразователей передатчика и приемника, а также диаметром зондирующего импульса на высоте H . Масштаб осреднения при получении мгновенных значений ВНГО датчиком типа ИВО примерно равен $l_{0,H}$, так как средний диаметр зондирующего импульса $d_H \ll l_{0,H}$. В связи с разработкой в последнее время лазерных измерителей ВНГО сразу же заметим, что при остронаправленном излучении, когда $d_H \rightarrow 0$, происходит качественное изменение результатов измерений, уменьшение интервала корреляции отсчетов по сравнению с данными ИВО. Уменьшается и средняя высота нижней границы, что подтверждается экспериментальными данными [6]. «Мгновенную» дальность видимости получают осреднением по области длиной

$$l'_{0,w} = \bar{U}_h \tau_{0,w} + L_6, \quad (3)$$

если ВМ смещается вдоль базы L_6 прибора. Длина $l''_{0,w}$ является одновременно и масштабом осреднения. При движении воздушной массы под углом 90° к линии визирования «мгновенный» масштаб осреднения

$$l^1_{0,w} = \sqrt{\bar{U}_h^2 \tau_{0,w}^2 + L_6^2}. \quad (4)$$

Оценка интервалов осреднения

Известно, что неблагоприятное влияние на конструкцию самолета оказывают возмущения, соизмеримые с ним [3, 8]. Кроме того, при выборе оптимальных интервалов осреднения скорости ветра необходимо учитывать устойчивость к турбулентности бортового оборудования и пилота, время релаксации и длину пробега (разбега) самолета.

Опасное воздействие аэродинамической силы ветра на самолет определяется импульсом силы, которая пропорциональна времени действия этой силы. Л. С. Гандин [3] пришел к заключению, что наиболее опасный момент воздействия ветра наступает тогда, когда ихрь опасного порыва скорости ветра охватит полностью весь объект. Наибольшее влияние на усталостную прочность самолета оказывают циклические нагрузки частотой 20 циклов/мин [5].

Указанные рекомендации позволяют считать оптимальными «мгновенные» значения скорости ветра, полученные путем осреднения (при скоростях ветра 10 м/с и более) за 1—3 с при оценке влияния турбулентности на усталостную прочность самолета. Время релаксации самолета составляет примерно 1,5 с [9], путь самолета за это время около 100 м. Реакция самолета на возмущения с такой длиной волны усложняет управление, поэтому скорость ветра целесообразно осреднять за 8—10 с. *ветер*

Так как длина пробега самолета является функцией скорости ветра, осредненной вдоль ВПП, «мгновенная» скорость ветра, согласованная с длиной пробега и средней скоростью ветра, может быть получена примерно за 30—60 с. *тегз*

Инструментальные измерения ВНГО производятся в интересах пилота. Учитывая, что постоянная времени пилота равна примерно 0,5 с, а для ориентации по наземным ориентирам после выхода из облаков ему необходимо время $\tau_{\text{виз}} \approx 3$ с (примерно за такое же время пилот теряет ориентировку), интервал осреднения для формирования «мгновенных» отсчетов ВНГО при инструментальных измерениях светолокатором типа ИВО должен быть увеличен по сравнению с существующей практикой примерно на порядок.

Действительно, посадочная скорость как у гражданских, так и у военных самолетов $V_{\text{пос}} \approx 70$ м/с. Отсюда получаем, что за 3 с самолет проходит расстояние 200 м практически без потери высоты, и на этом расстоянии, двигаясь с большой скоростью и наблюдая наземные ориентиры, пилот производит осреднение ВНГО.

Осреднение же ВНГО прибором ИВО в течение 2—3 с при характерной скорости движения низких облаков 8 м/с производится на участке длиной около 20 м.

Кроме того, необходимо учитывать, что пилот осредняет ВНГО и в некоторой части сектора обзора.

Из сказанного следует, что время осреднения ВНГО прибором ИВО для выдачи мгновенного отсчета должно составлять 30 с. В США результаты измерений высоты облаков, получаемые с помощью регистрирующих приборов каждые 6 с, осредняются за

интервалы времени 1 и 10 мин [1, 7] и в районе аэродрома [11]. Что касается осреднения за 2 мин [7], 10 мин и в районе аэродрома то оно необходимо для определения математического ожидания ВНГО в районе аэродрома и получения устойчивого предиктора для прогноза.

Для решения статических задач оптимальным интервалом осреднения мгновенных значений дальности видимости является как известно, интервал, равный самой видимости. Временной интервал осреднения для формирования мгновенных отсчетов горизонтальной дальности видимости при обеспечении посадки зависит от посадочной скорости самолета $V_{\text{пос}}$, времени $\tau_{\text{виз}}$ и может быть получен исходя из равенства масштабов осреднения видимости пилотом и прибором. Рассмотрим два случая:

— ветер вдоль базы, тогда с учетом (3)

$$W + V_{\text{пос}} \tau_{\text{виз}} = \bar{U}_{h^0, w} + L_6; \quad (4)$$

— ветер поперек базы, тогда с учетом (4)

$$W + V_{\text{пос}} \tau_{\text{виз}} = \sqrt{\bar{U}_{h^0, w}^2 + L_6^2}. \quad (5)$$

Учитывая, что посадка усложняется при ограниченной видимости, а ограниченная видимость имеет место, как правило, при сильном ветре, расчеты для определения τ_0 , w выполним при $L_6 = 100$ м, $W = 600$ м и $U_h = 3$ м/с. Для этого случая по формуле (5) найдем, что требуемый интервал осреднения равен 200 с. Если ветер поперек базы, то репрезентативное «мгновенное» измерение может быть получено из (6) при $\tau_0, w = 260$ с.

Однако инерционность датчика видимости даже равная 1 мс может быть причиной летного происшествия [10], так как прибор не успевает своевременно зарегистрировать резкое изменение видимости. Таким образом, возникает противоречие между требованиями к репрезентативности и оперативности измерений. Решить это противоречие можно путем уменьшения инерционности прибора и увеличения измерительной базы, а также путем рационального размещения аппаратуры. Целесообразно устанавливать τ_0 , не более 20—30 с и производить осреднение видимости по двум приборам, установленным на удалении 200—300 м, что обеспечит репрезентативность и оперативность измерений. Очевидно, что для получения устойчивых значений дальности видимости для оценки тенденции ее изменения интервалы осреднения должны быть существенно больше.

Интервалы дискретизации и осреднения, выбранные соответственно для мгновенной и осредненной дальности видимости на аэродроме, являются одновременно оптимальными при измерении температуры воздуха и точки росы в случае, если полученные результаты используются для прогноза тумана. Это позволяет считать обоснованными рекомендованные в [7] интервалы осреднения температуры для формирования мгновенных (срочных) значений (3 мин) и предиктора для прогноза (осреднение вдоль ВПП), хотя интервалы осреднения влажности в [7] отсутствуют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божеви́ков Н. С., Шестопа́лов Л. А. Основные характеристики тенденции развития современных приборов для измерения высоты нижней границы облаков.— Метеорология и гидрология, 1963, № 5, с. 45—50.
2. ВМО. Технический регламент. Метеорологическое обслуживание международной авиации. Т. 2, третье изд. Женева, 1970.— 67 с.
3. Гаидин Л. С. Проблемы ветровых нагрузок на строительные сооружения как задача прикладной метеорологии.— Труды ГГО, 1971, вып. 23, 3—14.
4. Каледин А. Что скажут синоптики? Высокое качество метеообеспечения — залог регулярности полетов.— Гражданская авиация, 1978, № 6, с. 25.
5. Луцкий В., Галашин Е. Вибрации самолета в полете.— Авиация космонавтика, 1969, № 7, с. 15.
6. Об измерении параметров облаков комплексом МРЛС—лидар/Б. Брылев, В. Е. Зуев, И. В. Самохвалов и др.— Труды ГГО, 1977, вып. 395, 22—31.
7. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов/Под ред. М. А. Петросянца В. Д. Решетова.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 220 с.
8. Пийус Н. З. Современное состояние вопроса о турбулентности свободной атмосферы, вызывающей болтанку самолетов.— Труды ЦАО, 1960, вып. 34, с. 52—58.
9. Юдин М. И. Вопросы теории турбулентности и структуры ветра приложением к задаче о колебаниях самолета.— М.: Гидрометеиздат, 1946.— 9 с.— (Труды НИУ ГУГМС. Вып. 35, сер. 1).
10. Aircraft accident report Delta Air Lines, Inc. Douglas DC-9-31, N 975 E.—National Transportation Safety Board, USA, 1974, March 7.
11. Erhard A. F., Rudd James E. Integration surface weather systems improves access accuracy.— ICAO Bull., 1975, N 1, 30, p. 19—21.
12. Hardy R. N. A note on the optimum averaging time of wind reports or aviation.— Meteorol. Mag., L, 1974, 103, p. 99—105.

Е. Л. Бор, В. Е. Карпуша, Р. А. Кругло

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОМЕТРА ИФ-1

В настоящее время на сети авиаметстанций широко используются приборы РДВ-2 и РДВ-3. Разработка нового прибора обусловлена необходимостью расширения диапазона измерения метеорологической дальности видимости, уменьшения погрешности дистанционной передачи результатов измерений, повышения эксплуатационной надежности.

Для расширения диапазона измерения в ряде стран используют два или три фотометра с различными измерительными базами. Экономически более целесообразно использовать один фотометр с несколькими отражателями. Однако практическая реализация таких фотометров наталкивается на ряд технических трудностей. Так, например, в одном случае [2] при переходе с диапазона на диапазон требуется каждый раз нацеливать фотометрический блок на выбранный в соответствии с диапазоном измерения отражатель, что приводит к значительному усложнению аппаратуры. В другом случае [5], когда все отражатели расположены в пределах диаграммы направленности излучателя и одновременно в поле зрения приемника света, шкала прозрачности прибора оказывается нелинейной, а диапазон измерения заметно сужается по сравнению с первым случаем.

В фотометре ИФ-1 использовано техническое решение [1], свободное от указанных недостатков. Сущность его состоит в том, что в фокальной плоскости приемного зеркала расположена диафрагма с двумя отверстиями — по числу отражателей. Отверстия расположены в местах изображения отражателей и могут последовательно перекрываться переключателем диапазонов.

Поясним сказанное с помощью рис. 1, на котором приведен оптическая схема устройства.

Световой поток от импульсного источника света, находящегося в фокусе объектива, направляется в виде слабо расходящегося пучка к призмным отражателям 1 и 2 и составляет измерительный поток. Возвращенный призмными отражателями световой

поток попадает на приемное зеркало 11, в фокальной плоскости которого расположена диафрагма Д2. Рядом расположена диафрагма Д1. Диафрагмы могут поочередно перекрываться переключателем 10.

Перед рассеивателем фотодетектора, кроме того, установлены торки коммутатора 12 оптических сигналов, которые поочередно, частотой 1 раз в секунду перекрывают опорный и измерительный световые потоки.

При указанном на схеме положении переключателя диапазонов через нижнее отверстие диафрагмы 9 проходит световой поток с дальнего отражателя. Через коммутатор каналов 12 этот поток попадает на рассеиватель 7, который направляет световой поток

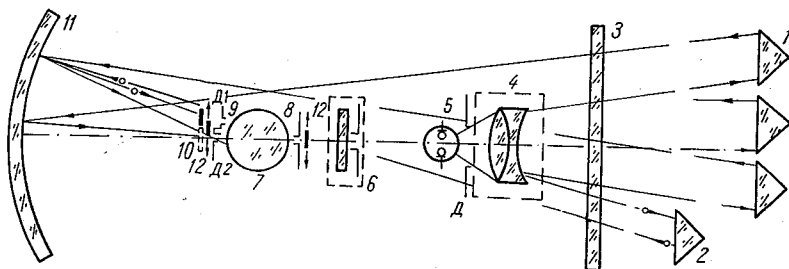


Рис. 1. Оптическая схема фотометра ИФ-1.

1, 2 — призмные отражатели дальнего и ближнего действия; 3 — защитное стекло; 4 — объектив; 5 — импульсный источник света; 6 — аттенюатор опорного канала; 7 — рассеиватель; 8 — диафрагма опорного канала; 9 — диафрагмы измерительного канала Д1 и Д2; 10 — переключатель диапазонов; 11 — сферическое зеркало; 12 — коммутатор каналов.

а фотодетектор, обеспечивает идентичные условия формирования сравниваемых сигналов на его входе и слабую зависимость результатов измерений от запыления и механических перемещений рассеивателя. В другом положении переключателя диапазонов нижнее отверстие диафрагмы 9 закрыто, следовательно, световой поток может пройти только через верхнее отверстие, которое находится в точке изображения ближнего отражателя. Поскольку ближний отражатель находится рядом (всего 10 м) с фотометрическим блоком, его изображение оказывается сдвинутым за фокальную плоскость зеркала. В то же время оно оказывается сдвинутым вверх относительно оптической оси прибора, поскольку отражатель установлен несколько ниже оптической оси, так, чтобы не перекрывать световой поток, идущий от объектива к дальнему отражателю. Таким образом обеспечивается отдельный прием световых потоков от каждого из отражателей, а переход с одного диапазона на другой осуществляется без изменения взаимного расположения отражателей и фотометрического блока — с помощью переключателя диапазонов, управляемого электронным блоком. При этом достигается перекрытие широкого диапазона измерения видимости (50—6000 м) и сохранение линейности шкалы прозрачности.

Коммутатор 12 устроен таким образом, что при работе от ближнего отражателя переключаются поочередно Д1 и 8, а при работе с дальнего — Д2 и 8.

В фотометре применен импульсный источник света взамен лампы накаливания. Импульсные источники света по долговечности не уступают лампам накаливания и в то же время обладают рядом преимуществ [3, 6].

Во-первых, применение импульсных ламп освобождает от необходимости использования в фотометре электромеханического модулятора света. Частота модуляции (частота следования импульсов света) задается несложной электрической схемой поджига и в данном случае равна частоте питающей сети — 50 Гц. Во-вторых, яркость световых вспышек таких ламп при той же потребляемой мощности в сотни и тысячи раз выше яркости ламп накаливания. Это позволяет использовать простые усилители сигналов на выходе фотодетектора и успешно бороться с шумами фоновой засветки. В-третьих, зависимость яркости у газоразрядных источников света от напряжения питания проявляется в значительно меньшей степени, чем у ламп накаливания [7]. Это упрощает задачу компенсации ошибок измерения, связанных с нестабильностью питающей сети. В четвертых, более высокий КПД газоразрядных источников света позволяет заметно сократить мощность, потребляемую прибором от питающей сети, и упростить конструкцию излучателя, поскольку не требуется защищать источник света от перегрева. Так, средняя потребляемая мощность лампы ИСШ-1, использованной в фотометре ИФ-1, составляет 5 В·А (против 100 В·А в приборах РДВ), а яркость в 1000 раз выше яркости лампы накаливания прибора РДВ.

К недостаткам импульсных газоразрядных источников света следует отнести пространственную нестабильность положения тела свечения, а также сдвиг максимума излучения в коротковолновую (синюю) область спектра. Однако в настоящее время промышленностью уже освоен выпуск газоразрядных ламп с двумя и более вспомогательными электродами, в которых эффект нестабильности пространственного положения тела свечения в значительной степени устранен [6]. К таким источникам света относится лампа типа ИСШ-7, которую предполагается использовать в промышленном образце фотометра ИФ-1. Что касается сдвига максимума излучения в синюю область спектра, то это может приводить к некоторому занижению показаний прибора при большой дальности видимости, т. е. в случаях, не представляющих опасности для деятельности авиации. При ограниченной видимости погрешность измерения отсутствует. Это объясняется тем, что в оптически плотных слоях атмосферы наблюдается неселективное рассеяние световых волн [9].

Фотометр содержит опорный и измерительный каналы. Опорный канал необходим для компенсации ошибок измерения, связанных с нестабильностью характеристик фотоумножителя, источника световых импульсов и усилителя электрических сигналов. В приборах типа РВД нестабильность коэффициента передачи измерительного

анала не оказывает влияния на результат измерения ввиду того, что оптический сигнал измерительного канала уравнивается с входе фотодетектора сигналом из опорного канала. Уравнивание осуществляется путем периодического сравнения и использования разностной величины для воздействия на управляющее устройство, содержащее реверсивный двигатель и кинематически связанный с ним оптический аттенюатор.

Такая схема обеспечивает высокую точность измерения, однако на реализуется сравнительно сложными устройствами. Так, например, для обеспечения линейной шкалы прибора необходимо обеспечивать центральную симметрию светового поля в опорном канале, то для реальных источников света трудно выполнимо.

Кроме того, поскольку коэффициент передачи измерительного анала не контролируется, в условиях непрерывной эксплуатации могут потребоваться частные регулировки, чтобы исключить вероятность отказов, например, из-за потери чувствительности фотодетектора под воздействием фонового излучения.

С целью устранения указанных недостатков в фотометре ИФ-1 реализована схема уравнивания электрических сигналов. При том сравнении с образцовым напряжением подвергается не измерительный сигнал, а опорный — после прохождения им всех элементов измерительной схемы. Поскольку сравнение происходит на выходе измерительной схемы, а не на ее входе, разностный сигнал несет информацию об отклонении общего коэффициента преобразования измерительного тракта от номинального значения в результате воздействия дестабилизирующих факторов или старения элементов. Разностный сигнал после усиления воздействует на управляющий вход регулируемого источника питания фотоумножителя до тех пор, пока общий коэффициент преобразования измерительной схемы не станет равным установленному в процессе настройки прибора значению. В этом случае нет необходимости выполнять сравнение измерительного сигнала с опорным, поскольку градуировка прибора, выполненная при его настройке, в дальнейшем в процессе эксплуатации не будет нарушена. Такая схема стабилизации параметров усилительно-преобразовательного тракта регулировкой напряжения питания на фотоумножителе была предложена и успешно реализована в промышленной установке для фотоэлектрической регистрации спектров комбинационного рассеяния света еще в 1962 г. [8]. Погрешность фотометрирования не превышала десятых долей процента.

Поскольку градуировка прибора в процессе эксплуатации не нарушается, вместо измерения отношения оптических сигналов на входе фотодетектора достаточно измерить величину электрического сигнала на выходе измерительно-преобразовательного тракта.

Поясним сказанное с помощью рис. 2, на котором изображена структурная схема фотометра ИФ-1. Схема работает следующим образом. Световые импульсы от источника света (ИС) через светоделительное устройство (Д) направляются в опорный (ОК) и измерительный (ИК) каналы.

Периодически с частотой коммутации Ω серии импульсов направляются на фотодетектор, в качестве которого использован фотоэлектронный умножитель ($\Phi Э У$) и далее через пиковый детектор ($П Д$), повторитель напряжения ($П П$) и фильтр частоты коммутации ($\Phi Ч К$) — на дифференциальный усилитель ($Д У$), а также на выход устройства. Дифференциальный усилитель имеет второй вход, который подключен к источнику опорного напряжения ($И О Н$). Выход дифференциального усилителя подсоединен к управляющему входу регулируемого выпрямителя ($Р В$), включенного в цепь питания $\Phi Э У$.

Коммутатор каналов осуществляет коммутацию опорного и измерительного сигналов, а также сброс напряжения на пиковом детекторе в момент коммутации. Если диафрагма δ открыта, то в ус-

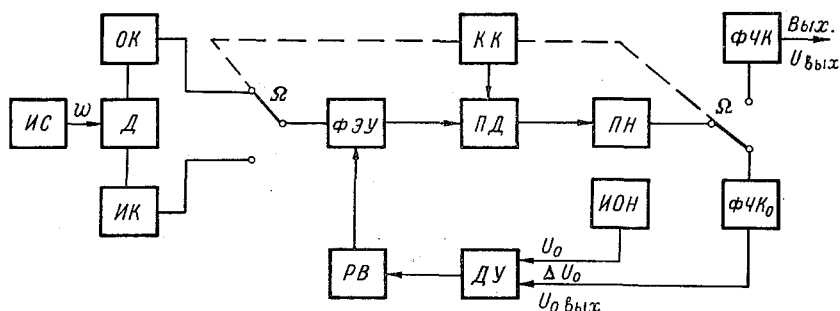


Рис. 2. Структурная схема фотометра ИФ-1.

ройстве действует цепь обратной связи, благодаря которой выходное напряжение опорного сигнала $U_{0\text{ВЫХ}}$ и опорное напряжение U_0 оказываются равными в результате их уравнивания. Относительное неравновесие $a = \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta U}{U_{0\text{ВЫХ}} \pm \Delta U} = \frac{1}{k \pm 1}$ может быть сведено к желаемому минимуму соответствующим выбором значения коэффициента k , который равен произведению коэффициентов передачи $Д У$, $Р В$, коэффициента преобразования $\Phi Э У$, а также коэффициентов передачи $П Д$, $П П$ и $\Phi Ч К$. В положении коммутатора, противоположном указанному на рис. 2, на входе $\Phi Ч К$ действует выходное напряжение измерительного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$. В этом случае цепь обратной связи разомкнута, однако на входе дифференциального усилителя поддерживается прежнее напряжение, поскольку цепь разряда сглаживающей RC -цепи фильтра опорного канала $\Phi Ч К_0$ оказывается отключенной. Следовательно, и коэффициент преобразования $\Phi Э У$ сохраняет прежнее значение.

Примем во внимание также тот факт, что, хотя схема является двухканальной, в обоих каналах, как в измерительном так и в опорном, сигналы проходят через одни и те же элементы схемы ($\Phi Э У$, $П Д$ и $П П$) и формируются от одного и того же излучателя. Допуская, что коэффициенты передачи фильтров $\Phi Ч К$ и $\Phi Ч К_0$ одина-

ковы, можем записать выходное напряжение измерительного сигнала в виде

$$U_{\text{вых}} = U_{0\text{вых}} \frac{k(\alpha)}{k_0},$$

где $k(\alpha)$ и k_0 — коэффициенты пропускания оптических трактов измерительного и опорного каналов. Раскрывая это выражение относительно $U_{0\text{вых}}$, получим

$$U_{\text{вых}} = (U_0 \pm \Delta U) \frac{k(\alpha)}{k_0} = \frac{U_0 k(\alpha)}{k_0} \pm \frac{\Delta U k(\alpha)}{k_0} = U_{\text{вых}}^* \pm \Delta U_{\text{вых}}^*.$$

Отсюда следует, что погрешность определения измерительного сигнала $\delta U_{\text{вых}}$ равна относительному неравновесию в опорном канале

$$\text{при замкнутой обратной связи. Действительно, } \delta U_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}^*}{U_{\text{вых}}^*} = \frac{\Delta U}{U_0} = a. \text{ Таким образом, погрешность измерения определяется}$$

глубиной обратной связи в опорном канале и может быть сделана достаточно малой. При оценке максимальной погрешности прибора необходимо учитывать вариации коэффициента k из-за старения ФЭУ и ИС.

Раскрывая исходное выражение для $U_{\text{вых}}$ относительно $k(\alpha)$, получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{0\text{вых}}}{k_0} e^{-2\alpha l},$$

где α — показатель ослабления света на измерительной базе, l — длина измерительной базы прибора, e — основание натуральных логарифмов, $e^{-2\alpha l}$ — коэффициент пропускания света воздухом на отрезке, ограниченном измерительной базой прибора $2l$. Следовательно, шкала прибора, так же как и в приборах типа РДВ, оказывается линейной относительно коэффициента пропускания.

Необходимо отметить, что высокая степень линейности в широком диапазоне измерений может быть обеспечена только в том случае, если все элементы измерительно-преобразовательного тракта имеют линейную амплитудную характеристику.

В этой связи необходимо особое внимание уделять выбору типа ФЭУ, который должен обладать линейной световой характеристикой в широком диапазоне освещенностей, не бояться электрических и магнитных полей, допускать большие анодные токи в импульсном режиме.

Выполнение последнего требования обеспечивает получение большого коэффициента преобразования на высоких частотах при емкостном характере нагрузки, поскольку большие уровни сигнала в этом случае могут быть получены при малом анодном сопротивлении. В настоящее время промышленностью освоен выпуск целого ряда фотоумножителей, удовлетворяющих указанным требованиям. Это фотоумножители типа ФЭУ-15, ФЭУ-16, ФЭУ-70, ФЭУ-80 и др. В экспериментальном образце фотометра ИФ-1 использован

фотоумножитель типа ФЭУ-15А. При напряжении питания около 800 В (в два раза ниже номинального значения) сигнал, снимаемый с сопротивления нагрузки 10 кОм, при максимальном значении прозрачности атмосферы составляет 10 В. В дальнейшем этот сигнал с помощью двух импульсных трансформаторов с коэффициентом трансформации 2 и двух согласующих повторителей повышается до 40 В. Усилители напряжения в схеме фотометра отсутствуют. По этой причине линейный характер зависимости выходного напряжения от измеряемого параметра определяется линейностью световой характеристики ФЭУ и пикового детектора.

Очень важно учитывать, что в процессе эксплуатации фоновое излучение, попадающее на фотокатод ФЭУ, может приводить к его насыщению, а шумы фоновой засветки — к дополнительной погрешности измерения. В фотометре ИФ-1 благодаря использованию импульсного источника света большой яркости уровень фонового сигнала в несколько раз меньше уровня полезного сигнала, что практически исключает возможность фонового насыщения ФЭУ. По этой же причине шумы фоновой засветки не могут приводить к ощутимой величине дополнительной погрешности измерения. При испытаниях с целью оценки предельного значения погрешности от шумов фоновой засветки фотометрический блок отклоняли от направления на отражатель и направляли на участок неба с облаками, освещенными солнцем. Предварительно в измерительный канал фотоблока был установлен нейтральный светофильтр для имитации реального значения прозрачности атмосферы. Предельное значение погрешности измерения не превышало +2%.

Согласно существующим требованиям, необходимо получать данные о метеорологической дальности видимости на аэродроме с осреднением около 1 мин. Период коммутации должен быть на один-два порядка величины меньше, т. е. быть в пределах 0,6—6,0 с. Период модуляции (величина, обратная частоте следования импульсов света) должен быть, в свою очередь, во столько же раз меньше периода коммутации. Это необходимо для уменьшения коммутационных помех. Следовательно, период модуляции должен быть в пределах 6—60 мс.

Таким образом, в качестве генератора частоты модуляции может быть использовано сетевое питание промышленной частоты 50 Гц (период 20 мс), а коммутатор каналов может быть выполнен на электромагнитных элементах, которые более надежны по сравнению с электромеханическими. Период работы электромагнитного коммутатора в фотометре составляет 1 с, а время отработки от минимального до максимального делений шкалы — около 1 мин.

В приборах типа РДВ эти же параметры имеют значения около 5 мс и около 10 с соответственно, а в качестве источника частоты модуляции и устройства коммутации используются двигатель и генератор.

Таким образом, правильный выбор коммутации и постоянной времени прибора позволяет не только удовлетворить требования

и информации со стороны потребителя, но и упростить конструкцию прибора, повысить его надежность.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик фотометров, используемых для измерения прозрачности атмосферы на аэродроме, является дистанционность их действия, которая должна достигать 5 км и более. При этом особое значение приобретает вопрос о погрешности дистанционной передачи результатов измерений. Дело в том, что потребителя интересует не прозрачность атмосферы как таковая, а функционально связанная с ней величина — метеорологическая дальность видимости S_m . Характер функциональной связи таков, что дополнительная погрешность всего лишь в 1% по значению прозрачности приводит на краях диапазона к 10% дополнительной погрешности в определении S_m . Это значит, что в случае, если преобразование значений прозрачности в значения S_m выполнять в пункте приема информации потребителем, то необходимо обеспечить погрешность дистанционной передачи менее 1%, что усложняет техническую реализацию устройства. По этой причине преобразование целесообразно выполнять непосредственно на выходе датчика. Разработанный с этой целью для приборов РДВ электромеханический преобразователь угла в число импульсов не приспособлен для использования в фотометре ИФ-1, поскольку схема фотометра не содержит электромеханических элементов. Поэтому специально для фотометра ИФ-1 был разработан функциональный преобразователь на транзисторах, с помощью которого напряжение постоянного тока, пропорциональное прозрачности атмосферы, преобразуется сначала в частоту следования импульсов, а затем и в напряжение постоянного тока, пропорциональное значениям S_m [4].

Принцип действия функционального преобразователя основан на сравнении мгновенных значений напряжения периодического сигнала экспоненциальной формы с уровнем напряжения, подлежащего преобразованию, и измерении интервалов времени между моментами появления и исчезновения периодического сигнала над указанным уровнем. В качестве формирователя периодического сигнала экспоненциальной формы и одновременно устройства сравнения его с входным напряжением используется мультивибратор с эмиттерной времязадающей RC-цепью и управляющим входом. На выходе мультивибратора образуется непрерывная последовательность электрических импульсов, частота следования которых функционально связана с уровнем входного напряжения. Необходимый вид функциональной зависимости (обратно-логарифмический) обеспечивается соответствующим соединением источника управляющего напряжения с источником питания преобразователя. Согласно результатам испытаний, приведенное значение погрешности преобразования входного напряжения составляет не более $\pm 0,5\%$.

С целью получения информации о значениях S_m в цифровой форме к выходу преобразователя может быть подключен цифровой вольтметр.

Преобразователь устанавливается рядом или на удалении до нескольких десятков метров от фотометра, например в помещении БПРМ, и соединяется с ним четырехпроводной линией. Два провода используются для передачи результатов измерений от фотометра до преобразователя. Другая пара проводов нужна для передачи сигналов управления через функциональный преобразователь от пульта дистанционного управления, а также для передачи сигнала индикации диапазона измерения. Индикация обеспечивается одной из двух цветных лампочек на передней панели преобразователя. В момент перехода с одного диапазона на другой из фотометра к преобразователю поступает сигнал переменного тока, который используется для переключения лампочек-индикаторов, указывающих на масштаб шкалы стрелочного индикатора, установленного в преобразователе.

Функциональный преобразователь соединяется с пультом дистанционного управления и цифровым вольтметром двухпроводной линией связи. На выходе функционального преобразователя в момент переключения диапазона измерения обеспечивается изменение масштаба выходного напряжения включением (или отключением) резисторного делителя. Поэтому индикация диапазона на цифровом вольтметре не нужна.

Таким образом, использование рациональных технических решений позволило не только улучшить эксплуатационные характеристики измерителя дальности видимости, но и одновременно упростить конструкцию прибора. В приборе отсутствуют электромеханические узлы, количество оптических деталей существенно сокращено. Результаты предварительных испытаний позволяют надеяться на то, что прибор будет достаточно удобным и надежным в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авт. св. № 382037 (СССР). Устройство для измерения прозрачности атмосферы. В. Е. Карпуша, Р. А. Круглов, М. С. Стернзат, С. Д. Плинтэ.— Бюлл. открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1973, № 22.
2. Вараксин В. П., Казачков В. М. Авт. свид. № 279996, Бюллетень № 27, 1970.
3. Импульсные источники света/Под ред. И. С. Маршака.— М.: Энергия, 1978.— 472 с.
4. Капустин С. А., Карпуша В. Е., Круглов Р. А. Электронный функциональный преобразователь для датчика метеорологической дальности видимости.— Труды ГГО, 1974, вып. 342, с. 87—93.
5. Ковалев В. А. Базисный регистратор прозрачности для работы в широком диапазоне помутнений. Тр. ГГО, 1973, вып. 312, с. 121—127.
6. Луцет Б. Я., Самодергин В. А., Щукин Л. И. Характеристики импульсных источников света, работающих в частотных режимах.— В кн.: Обзоры по электронной технике. М., 1975, вып. 4.— 55 с.
7. Маршак И. С. Импульсные источники света.— Приборы и техника эксперимента, 1962, № 3, с. 5—19.
8. Могилевский А. Н. и др. Фотоэлектрическая установка для регистрации спектров комбинационного рассеяния света с повышенной точностью.— В кн.: Заводская лаборатория. Л., 1962, № 28.
9. Фрюнгель Ф. Импульсная техника.— М.: Энергия, 1965.— 484 с.

В. Н. Аднашкин, А. А. Афанасьев, С. И. Грушин

О ВЫБОРЕ РАЗМЕРОВ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕМА В НЕФЕЛОМЕТРАХ

Нефелометры, являющиеся локальными фотометрами рассеянного света (ФРС), предназначены для определения показателя ослабления света α исследуемого объема среды по интенсивности рассеянного им излучения. Основным недостатком этих приборов является локальность результатов измерений, достоинством — большой диапазон измеряемых значений показателя ослабления α , от 1 до 10^{-5} м^{-1} (что соответствует значениям метеорологической дальности видимости МДВ от 3 м до 300 км). Кроме того, ФРС, являясь моностатическими (безбазовыми) приборами, выгодно отличаются от базисных бистатических или полистатических фотометров ослабленного света (ФОС) простотой конструкции, компактностью и надежностью. Это позволяет с успехом использовать их при проведении измерений с движущихся объектов, в труднодоступных и отдаленных местах в составе необслуживаемых автоматических метеостанций и при исследовании структуры поля прозрачности атмосферы.

Целью настоящей работы является определение факторов, влияющих на выбор величины рассеивающего объема нефелометра в зависимости от диапазона измеряемых значений α .

Измерение α в ФРС должно производиться в «элементарном» объеме, под которым понимается такой объем, для которого количество рассеянного им излучения пропорционально его размеру [4]. При обосновании выбора размеров рассеивающего объема V_p делается ряд допущений:

1. Отсутствуют эффекты, подобные эффекту Рамана (изменение спектрального состава излучения рассеивающей средой).

2. Показатель ослабления света на данном спектральном интервале постоянен.

3. Отсутствует поглощение.

Первое и второе условия выполняются при облучении рассеивающего объема белым светом, поглощением света пренебрегаем ввиду его малости, что справедливо для большинства практических

случаев. Таким образом, поскольку распространение светового излучения в среде сопровождается его ослаблением за счет рассеяния,

$$F_0 = F_{\text{осл}} + F_{\text{рас}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{рас}}$ — доля исходного светового потока F_0 , рассеянная в некотором слое толщиной l ; $F_{\text{осл}}$ — ослабленный в результате рассеяния световой поток, подчиняющийся закону Бугера:

$$F_{\text{осл}} = F_0 e^{-\alpha l}. \quad (2)$$

Основными факторами, влияющими на выбор нижнего значения рассеивающего объема $V_{\text{р min}}$ в ФРС, являются независимость рассеяния света на отдельных частицах и независимость рассеивающих свойств объема от случайного перераспределения частиц. Предположение о независимости частиц означает, что систематического соотношения между фазами нет, т. е. интенсивности света, рассеянного различными частицами, складываются без учета фаз. Условие независимости, при котором расстояние между рассеивателями в три раза превышает их радиус [4], выполняется практически при всех степенях помутнения атмосферы, обусловленного взвешенными в воздухе частицами аэрозоля. При нормальных условиях оптические свойства атмосферы почти целиком определяются так называемыми «большими» частицами, размеры которых лежат в пределах 0,1—1,0 мкм, причем наиболее оптически активными являются частицы размером 0,1—0,3 мкм. Как видно из табл. 1 [5] в нормальных условиях, т. е. в режиме слабой замутненности, концентрация этих рассеивателей в атмосфере над континентом составляет в среднем 10^3 частиц/см³.

Таблица

	Радиус частиц, мкм							Общее число
	0,01	0,01—0,032	0,032—0,10	0,10—0,32	0,32—1,0	1,0—3,2	3,2	
Концентрация	1600	6800	5800	940	29	0,94	0,029	15 169

Показатель ослабления

$$\alpha = 2\pi r^2 N \kappa, \quad (3)$$

где r — радиус частицы, см; N — число частиц в единице объема; κ — сечение рассеяния.

В свою очередь $\kappa = f(x)$ [1], где $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ (λ — длина волны падающего излучения). Считая, что $\lambda = 0,55$ мкм для видимого спектра излучения (0,38—0,76 мкм), для частиц с $r = 0,2$ мкм при $N = 10^3$ 1/см³ получим $\alpha = 10^{-4}$ м⁻¹, что соответствует значению МДВ $S_m = 30$ км ($S_m = \frac{3}{\alpha}$).

По данным [3], для обеспечения независимости свойств элемента объема от случайного перераспределения частиц вследствие тепловых и иных флуктуаций необходимо соблюдение соотношения $VV_{p\min} \gg 1$. Вероятность попадания определенного числа частиц в заданный объем описывается формулой Пуассона. Относительная флуктуация δ среднего числа частиц $\bar{n}$ ($\bar{n} = NV_p$) или, в соответствии с (3), показателя ослабления α равна

$$\delta = \frac{\sqrt{(\Delta n)^2}}{\bar{n}} = \frac{|\Delta n|}{\bar{n}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}} = \frac{1}{\sqrt{NV_p}} = \frac{|\Delta \alpha|}{\alpha}, \quad (4)$$

откуда

$$V_p = \frac{1}{\delta^2 N}. \quad (5)$$

Задаваясь допустимыми уровнями погрешности определения α из-за флуктуации числа частиц в исследуемом объеме среды V_p , получим, что, например, для $S_m = 30$ км ($N = 10^3$ см $^{-3}$) при $\delta = 0,01$ $V_p = 10$ см 3 .

Максимальное значение рассеивающего объема $V_{p\max}$ может быть определено из условия выбора предельной оптической толщины αl визируемого участка среды. Обратившись к выражениям (1) и (2), получим, что рассеянная компонента описывается выражением

$$F_{\text{рас}} = F_0 - F_0 e^{-\alpha l} = F_0 (1 - e^{-\alpha l}), \quad (6)$$

которое можно представить в виде ряда Маклорена

$$F_0 (1 - e^{-\alpha l}) = F_0 \left(\alpha l - \frac{\alpha^2 l^2}{2!} + \frac{\alpha^3 l^3}{3!} - \frac{\alpha^4 l^4}{4!} + \dots \right. \\ \left. \dots + (-1)^{n-1} \frac{(\alpha l)^n}{n!} \right), \quad (7)$$

сходящего лишь при значениях $\alpha l < 1$. Поскольку все нефелометрические установки имеют шкалу, рассчитанную по упрощенному соотношению

$$F_{\text{рас}} = F_0 \alpha l, \quad (8)$$

содержащему только один первый член ряда, рассмотрим границы применимости уравнения (6) при различных значениях оптической толщины αl .

Как показано на рис. 1, зависимость $1 - e^{-\alpha l}$ удовлетворительно описывается суммой трех первых членов ряда. Для частных сумм ряда $\sum_n$ с числом членов $n < 3$ наблюдаются значительные расхождения с функцией $1 - e^{-\alpha l}$, возрастающие с ростом оптической толщины αl . На рис. 2 показан ход кривых относительной погрешности определения $F_{\text{рас}}$ при использовании одного, двух и трех членов разложения, которые позволяют определять $S_{m\min}$ (при заданной глубине зондирования l и относительной погрешности δ) или по

заданной S_{min} выбирать максимальную глубину зондирования. На рис. 3 приведены кривые зависимости $S_{\text{min}} = f(l)$ для 5, 10 и 20% уровней погрешности.

Для большинства нефелометров с фиксированным углом наблюдения 45° [2] небольшая величина визируемого участка трассы зон-

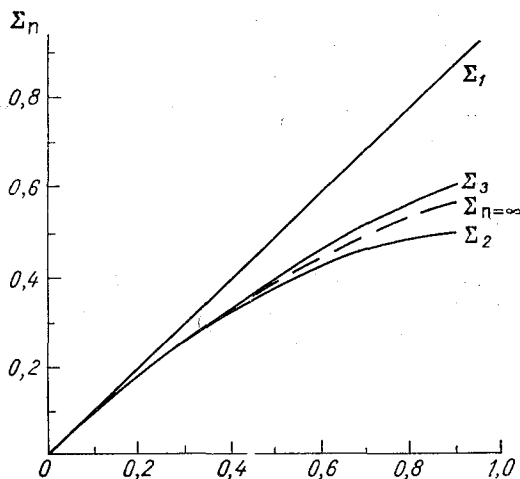


Рис. 1. График зависимости $F_{\text{рас}} = f(\alpha l)$ при использовании частных сумм ряда.

дирования ($l \leq 10$ см) обеспечивает измерения малых прозрачностей атмосферы (до $S_{\text{M}} \geq 3$ м), свободные от указанной погрешности. В нефелометрах, использующих обратнорассеянное излучение использование больших глубин зондирования приводит к появлению нелинейности шкалы, которая при $l \approx 10$ м и $S_{\text{M min}} = 50$ м при

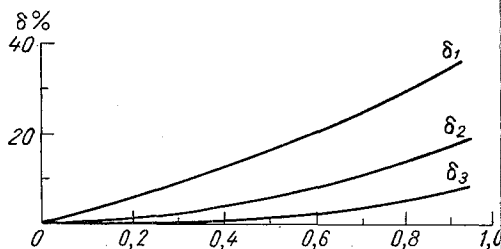


Рис. 2. Относительная погрешность определения $F_{\text{рас}}$ по одному, двум и трем членам ряда.

водит к появлению дополнительной погрешности измерений, достигающей, согласно графику (рис. 3), 25%.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Минимальное значение $V_{\text{p min}}$ при заданном уровне погрешности определяется из соотношения $V_{\text{p min}} \geq \frac{1}{\delta^2 N}$. Так, например

для измерения максимально возможного в земных условиях значения $S_{\text{M}} \approx 300$ км с погрешностью $\delta \leq 10\%$ $V_{\text{p min}} \geq 1 \text{ см}^3$.

2. Максимальное значение $V_{p \max}$, определяемое протяженностью визируемого участка трассы зондирования, может быть выбрано по

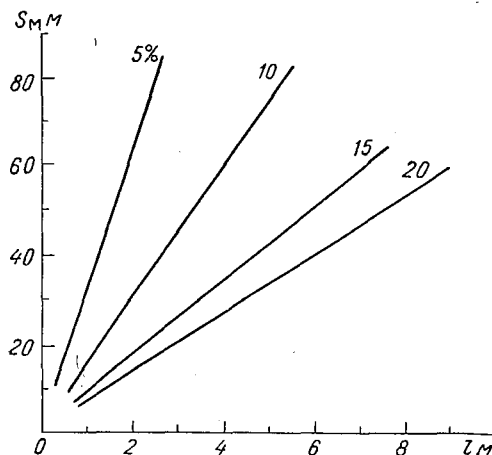


рис. 3. График зависимости $S_m = f(l_m)$ для различных уровней погрешности.

расчетным кривым исходя из нижнего значения диапазона измеряемых прозрачностей среды и допустимой погрешности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибанов А. И. Методы расчета видимости при направленном освещении.— М.: Госэнергоиздат, 1965.— 143 с.
2. Полевицкий К. К., Шадрин Е. Н., Аднашкин В. Н. Походный нефелометр для автоматической регистрации метеорологической дальности видимости.— Труды ГГО, 1972, вып. 292, с. 3—11.
3. Розенберг Г. В. Электродинамика статически неоднородных сред и теория переноса.— В кн.: Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. Минск, 1971, с. 159—170.
4. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами.— М.: Изд-во иностр. лит., 1961.— 536 с.
5. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы.— М.: Мир, 1965.— 423 с.

В. Н. Аднашкин

ПОГРЕШНОСТЬ ФОТОМЕТРОВ РАССЕЯННОГО СВЕТА (ФРС), ОБУСЛОВЛЕННАЯ ОСЛАБЛЕНИЕМ СВЕТА

В процессе эксплуатации фотометров характеристики всех узлов и элементов оптической и электрической схем подвергаются изменениям под влиянием различных дестабилизирующих факторов являющихся внутренними и внешними источниками погрешностей измерения.

Внутренним источником является в основном нестабильность (например, в результате старения) характеристик источника света фотоприемника и элементов электрической и оптической схем. Внешним — изменчивость характеристик этих элементов в результате воздействия электромагнитного (электрического, магнитного и светового) и других полей (температуры, влажности, давления, механических колебаний и т. д.). Следует отметить, что если нестабильность характеристик элементов приводит, как правило, к монотонному и медленному изменению их свойств (уменьшение излучательной способности источника света и чувствительности фотоприемника, уменьшение вследствие помутнения коэффициента пропускания оптических элементов и т. д.), то под воздействием внешних источников характеристики элементов могут претерпевать достаточно быстрые и знакопеременные изменения.

Устранение или сведение к минимуму влияния внутренних источников погрешностей достигается как подбором стабильных элементов, так и построением двухканальной схемы измерений. Влияние внешних источников устранить гораздо труднее, несмотря на подбор элементов и защиту узлов конструкции, электрически и оптически цепей от внешних воздействий. Поэтому, хотя к настоящему времени и накоплен большой опыт конструирования фотометров, предназначенных для эксплуатации в открытом объеме атмосферы и сохраняющих свою работоспособность в условиях воздействия всего комплекса климатических и других факторов, меняющихся в широких пределах, в выходном сигнале прибора наряду с полезной информацией содержится также информация о свойствах элементов и об исследуемой среде, являющаяся шу

ом. В фотометрах ослабленного света носителем этой «вредной» информации об исследуемой среде является рассеянное излучение, фотометрах рассеянного света (нефелометрах) — ослабленное излучение.

Оценим погрешность измерения нефелометра за счет ослабления света как на пути источник света — рассеивающий объем — фотоприемник, так и на наружных поверхностях оптических элементов, подвергающихся загрязнению в процессе эксплуатации.

Для нефелометров с фиксированным углом наблюдения θ , построенных по одноканальной [4, 5] или двухканальной схеме с передачей опорного светового потока от источника света к фотоприемнику по внутреннему световоду [3, 6], выражение для рабочего и опорного световых потоков на входе фотоприемника можно записать в виде

$$F_p = F_0 k_{\omega}^p \tau_p \exp \left(-2 \int_0^L \alpha dL \right) \alpha k(\theta) k_V, \quad (1)$$

$$F_{оп} = F_0 k_{\omega}^{оп} \tau_{оп}, \quad (2)$$

где F_0 — полный световой поток от источника света; k_{ω}^p — коэффициент, учитывающий угловые характеристики оптических элементов рабочего канала; τ_p — коэффициент пропускания оптических элементов рабочего канала; L — расстояние от источника света (фотоприемника) до рассеивающего объема; α — исследуемый показатель ослабления рассеивающего объема; $k(\theta)$ — коэффициент, учитывающий индикатрису рассеяния под углом θ ; k_V — коэффициент, учитывающий размеры рассеивающего объема; $k_{\omega}^{оп}$ — коэффициент, учитывающий угловые характеристики оптических элементов опорного канала; $\tau_{оп}$ — коэффициент пропускания оптических элементов опорного канала.

Исследования показывают, что значение коэффициента $k(\theta)$ для $\theta = 45^\circ$ может быть определено с погрешностью не более $\pm 15\%$ [1], для $\theta = 180^\circ$ — до 50% [2]. При условии устойчивости юстировки оптической схемы прибора и высокой стабильности коэффициента передачи опорного канала можно считать, что $k_{\omega}^p k_V k(\theta) = k_p = \text{const}$ и $k_{\omega}^{оп} \tau_{оп} = k_{оп} = \text{const}$, после чего выражения (1) и (2) преобразуются в

$$F_p = k_p F_0 \tau_p \exp \left(-2 \int_0^L \alpha dL \right), \quad (3)$$

$$F_{оп} = k_{оп} F_0. \quad (4)$$

Для одноканального нефелометра при соблюдении условия квазистационарности F_0 ($F_0 = \text{const}$), которое может быть выполнено коррекцией дрейфа нуля в процессе измерения или его учета

при обработке результатов измерений, выражения для α в соответствии с уравнением (3) можно представить в виде

$$\alpha_{1k} = \frac{F_p}{k_p F_0 \tau_p \exp \left(-2 \int_0^L \alpha dL \right)} = \frac{A_1 F_p}{\tau_p \exp \left(-2 \int_0^L \alpha dL \right)}. \quad (4)$$

В двухканальном нефелометре значение α определяется по отношению световых потоков, при этом построение опорного оптического канала, реализующего прямую оптическую связь источника света и фотоприемника через различные световоды (светопроводы, призмы и т. д.), позволяет исключить погрешности измерения, обусловленные нестабильностью источника света и фотоприемника. Из уравнений (3) и (4) получим

$$\alpha_{2k} = \frac{k_{оп} F_p}{k_p F_{оп} \tau_p \exp \left(-2 \int_0^L \alpha dL \right)} = \frac{A_2 F_p}{\tau_p \exp \left(-2 \int_0^L \alpha dL \right)}. \quad (5)$$

Как следует из уравнений (5) и (6), результаты измерений прозрачности атмосферы как одноканальным, так и двухканальным

нефелометром зависят от τ_p и $\exp \left(-2 \int_0^L \alpha dL \right)$.

Коэффициент пропускания τ_p оптических элементов рабочего канала, особенно их наружных поверхностей, подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию различных помутняющих факторов (запыление, запотевание и т. д.), может меняться в широких пределах. Применение обогрешных защитных стекол сводит к минимуму опасность их запотевания или обледенения, однако не устраняет изменения коэффициента пропускания вследствие загрязнения (например, запыления) наружной поверхности, достигающего десятков процентов. Это приводит к необходимости проведения довольно частых регламентных работ или установки дополнительных устройств контроля, защиты или очистки наружных оптических поверхностей.

Принято считать, что ослабление прямого и рассеянного пучков света в ФРС невелико и им можно пренебречь. Результаты расчетов, представленные в табл. 1, показывают, что для существующих типов нефелометров с фиксированным углом наблюдения $\theta = 45^\circ$ ($L \approx 0,5$ м) и $\theta = 180^\circ$ ($L \approx 10$ м) при условии постоянства

Таблица

	S_m м					
	10	20	30	50	100	200
	0,3	0,15	0,1	0,06	0,03	0,01
α м ⁻¹	0,741	0,861	0,905	0,942	0,970	0,99
$\exp(-2\alpha L)$ ($L = 0,5$ м, $\theta = 45^\circ$)	0,002	0,050	0,135	0,301	0,549	0,7
$\exp(-2\alpha L)$ ($L = 10$ м, $\theta = 180^\circ$)						

и по всей трассе луча, когда $\exp(-2 \int_0^L \alpha dL) = \exp(-2\alpha L)$, при малых значениях прозрачности атмосферы вклад ослабления, особенно для нефелометров обратного рассеяния [3], является существенной величиной.

Из уравнений (5) и (6) следует, что для исключения погрешности измерения (обусловленной τ_p) и нелинейности градуировочной характеристики (из-за множителя $\exp(-2 \int_0^L \alpha dL)$) необходимо наблюдение условия прохождения и рабочего, и опорного световых потоков через общие оптические элементы и исследуемую среду. В этом случае выражение для опорного светового потока можно представить в виде

$$F_{\text{оп}} = k_{\text{оп}} F_0 \tau_p \exp\left(-2 \int_0^{L_{\text{оп}}} \alpha dL\right). \quad (7)$$

то при условии $L_{\text{оп}} \approx L$ позволяет обеспечивать измерения, свободные от рассматриваемых погрешности и нелинейности.

В случае, когда решение задачи формирования опорного светового потока через исследуемую среду связано с серьезными техническими трудностями или не представляется возможным (например, для нефелометров обратного рассеяния), влияние ослабления светового потока в исследуемой среде следует учесть при построении градуировочной характеристики прибора.

Таким образом, в двухканальных нефелометрах с фиксированным углом наблюдения $\theta \neq 180^\circ$ учет ослабления света при прохождении через исследуемую среду и устранение погрешности измерений, обусловленной ослаблением света на наружных поверхностях оптических элементов, могут быть осуществлены соответствующим построением опорного оптического канала.

В нефелометрах обратного рассеяния ($\theta = 180^\circ$) ослабление светового потока на пути источник свет — исследуемый объем — фотоприемник необходимо учитывать градуировочной характеристикой прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартенева О. Д., Довгялло Е. Н., Полякова Е. А. Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеоназдат, 1967. — 244 с. — (Труды ГГО. Вып. 220).
2. Гольберг М. А. Связь между коэффициентом рассеяния под углом 80° и полным показателем рассеяния. — Труды НИИГМП, 1968, вып. 18, с. 63—71.
3. Жданов В. Н., Монастырский В. Г. Автоматический нефелометр для определения МДВ в морских условиях. — Труды НИИГМП, 1978, вып. 36, с. 88—94.
4. Новый фотозлектрический нефелометр/Н. В. Гончаров, Л. Б. Демина, В. А. Малахов, В. В. Смирнов. — Труды ИЭМ, 1973, вып. 4(38), с. 94—104.
5. Полевицкий К. К., Шадрин Е. Н., Аднашкин В. Н. Походный нефелометр для автоматической регистрации метеорологической дальности видимости. — Труды ГГО, 1972, вып. 292, с. 3—11.

Г. Б. Кимель, Е. И. Плешкова, Н. Г. Протопопов

ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ ВИНТОВЫХ ВЕТРОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работах [1, 2] достаточно подробно рассмотрен вопрос влияния боковой¹ составляющей вектора скорости ветра на точность измерения модуля скорости ветра с помощью винтовой вертушки. Кроме того, боковая составляющая является первопричиной искажения синусно-косинусного закона разложения вектора скорости ветра на ортогональные составляющие при использовании двух винтовых вертушек с взаимно перпендикулярными осями вращения.

Как было показано в работе [2], статическое (градуировочное) уравнение винтовой вертушки при наличии боковой составляющей имеет вид

$$\omega'_0 r = V_0 \operatorname{tg} \alpha \frac{1 - \frac{c_x}{c_y}}{1 + \frac{c_x}{c_y} \operatorname{tg}^2 \alpha} - \frac{1}{4\omega'_0 r} \left[\sqrt{V_0^2 + \left(\omega'_0 r + \frac{2}{\pi} V_0 \right)^2} - \sqrt{V_0^2 + \left(\omega'_0 r - \frac{2}{\pi} V_0 \right)^2} \right], \quad (1)$$

где V_0 — составляющая вектора скорости ветра, направленная вдоль оси вращения винта; $\omega'_0 r$ — линейная скорость вращения лопасти на расстоянии r от оси вращения (r — радиус центра приложения аэродинамических сил, ω'_0 — угловая скорость вращения лопасти при наличии боковой составляющей); V_0 — модуль боковой составляющей вектора скорости ветра; α — угол атаки лопасти на расстоянии r от оси вращения; $c_y = 1,24$ — коэффициент аэродинамической силы, направленной перпендикулярно сечению лопасти; $c_x \approx 0,03$ — коэффициент аэродинамической силы, направленной

¹ Здесь имеется в виду составляющая вектора ветра, перпендикулярная оси вращения винта.

доль сечения лопасти (коэффициент индуктивного и профильного сопротивления лопасти).

Первый член в формуле (1) представляет собой статические равнения винтовой вертушки при совпадении направления вектора ветра с направлением оси вращения винта, т. е. при отсутствии V_6 . В этом легко убедиться, если подставить в (1) $V_6 = 0$.

Если разделить уравнение (1) на V_0 , то можно получить выражение для коэффициента винтовой вертушки (k'_a) при наличии боковой составляющей скорости ветра:

$$k'_a = \frac{\omega_0 r}{V_0} = k_a - \frac{1}{4k'_a} \left[\sqrt{1 + \left(k'_a + \frac{2}{\pi} \frac{V_6}{V_0} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(k'_a - \frac{2}{\pi} \frac{V_6}{V_0} \right)^2} \right]^2, \quad (2)$$

где $k_a = \left(1 - \frac{c_x}{c_y}\right) \left(1 + \frac{c_x}{c_y} \operatorname{tg}^2 \alpha\right)^{-1} \operatorname{tg} \alpha$ — коэффициент винтовой вертушки при отсутствии боковой составляющей скорости ветра.

Дальнейшее преобразование (2) приводит к полному кубическому уравнению относительно k'_a :

$$2(k'_a)^3 - 3k_a(k'_a)^2 + k'_a \left[1 + k_a^2 + \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{V_6}{V_0} \right)^2 \right] - k_a \left[1 + \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{V_6}{V_0} \right)^2 \right] = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) содержит две независимые переменные: V_6 и α (точнее $k_a = f(\alpha)$).

Для того чтобы лучше представить значение члена V_6/V_0 , рассмотрим схему (рис. 1) измерения ортогональных составляющих вектора скорости ветра с помощью двух винтовых вертушек (I и II), оси вращения которых взаимно перпендикулярны и жестко ориентированы в горизонтальной плоскости.

На рис. 1 вектор скорости ветра $|V|$ направлен под углом φ к оси винта I. Винт I будет измерять составляющую $V_0 = V \cos \varphi$, винт II — составляющую $V \sin \varphi$. Для винта I составляющая $\sin \varphi$ будет являться боковой составляющей, а для винта II боковой составляющей является вектор $V \cos \varphi$. Следовательно, для

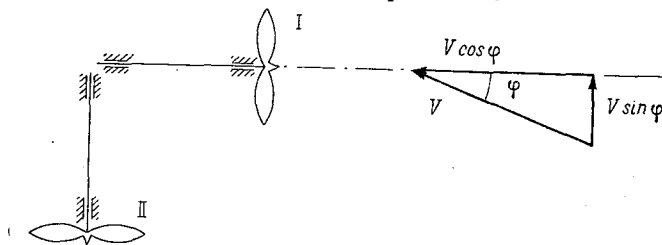


Рис. 1. Схема измерения составляющих вектора ветра.

винта I $V_{01} = V \sin \varphi$. Отсюда отношение V_0/V_0 для винта I представляет собой $\operatorname{tg} \varphi$.

При $V_0/V_0 \rightarrow \infty$ (точнее при $V_0 \rightarrow 0$) решение уравнения (3) дает значение $k'_a \rightarrow k_a/2$, т. е. при $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$ ($\operatorname{tg} \varphi \rightarrow \infty$) коэффициент передачи анемометра I уменьшается в 2 раза (погрешность измерения V_0 стремится к 50%).

Относительная погрешность измерения ортогональной составляющей вектора скорости ветра $V_0 = V \cos \varphi$ может быть вычислена по формуле

$$\delta_V = \frac{k'_a - k_a}{k_a}. \quad (4)$$

Так как $k'_a \leq k_a$, то δ_V — отрицательная величина, т. е. боковая составляющая уменьшает скорость вращения винтовой вертушки.

Значения k'_a были получены путем решения уравнения (3) на ЭВМ М-222 при значениях $\alpha = 30, 45, 60, 75, 81^\circ$ (соответственно $k_a = 0,558, 0,951, 1,571, 2,697, 3,090$) и $\operatorname{tg} \varphi$ от 0,0875 до 22,9038 (соответственно при φ от 5 до $87,5^\circ$). После подстановки полученных значений k'_a в (4) были получены относительные погрешности δ_V (табл. 1).

Таблица

Значения δ_V %

V_0/V_0 или $\operatorname{tg} \varphi$	φ°	α°				
		30	45	60	75	81
0,0875	5	0,23	0,17	0,09	0,04	0,03
0,1000		0,31	0,21	0,11	0,05	0,04
0,1763	10	0,95	0,65	0,36	0,15	0,12
0,2000		1,22	0,84	0,46	0,20	0,15
0,2679	15	2,15	1,51	0,84	0,35	0,27
0,3000		2,69	1,88	1,05	0,44	0,35
0,3639	20	3,87	2,76	1,55	0,65	0,51
0,4000		4,62	3,30	1,86	0,79	0,62
0,5000		6,96	5,12	2,92	1,23	0,96
0,5773	30	8,96	6,73	3,83	1,64	1,29
0,7500		13,78	10,91	6,58	2,79	2,19
1,0000	45	20,68	17,65	11,60	5,04	3,94
1,7321	60	34,76	33,47	29,20	15,98	12,51
2,7475	70	42,78	42,51	41,53	36,61	32,78
3,7321	75	45,86	45,77	45,50	44,20	43,37
5,6713	80	48,12	48,12	48,10	47,85	47,75
11,4301	85	49,55	49,52	49,50	49,50	49,48
22,9038	87,5	49,90	49,88	49,85	49,85	49,84

На рис. 2 дан график изменения относительных погрешностей составляющей $V \cos \varphi$ при повороте вектора скорости ветра в угол 360° .

Таким образом, при отсутствии погрешности за счет боковой составляющей вертушки I и II (рис. 1) должны были измерять ортогональные составляющие вектора ветра $V_x = V \cos \varphi$ и $V_y = V \sin \varphi$. Наличие боковых составляющих вносит погрешности в ортогональные составляющие, т. е.

$$\begin{aligned} V'_x &= V [1 - |\delta_V(\varphi)|] \cos \varphi, \\ V'_y &= V [1 - |\delta_V(90 - \varphi)|] \sin \varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

где $|\delta_V(\varphi)|$ — абсолютное значение относительной погрешности измерения составляющей, зависящей от φ ; $|\delta_V(90 - \varphi)|$ — то же для составляющей, перпендикулярной первой.

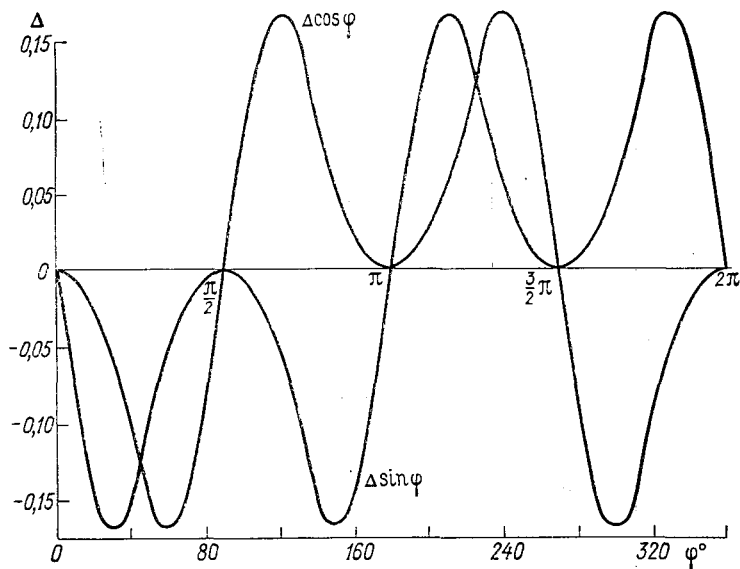


Рис. 2. График относительной погрешности $\cos \varphi$.

Модуль вектора скорости ветра определяется путем геометрического сложения V'_x и V'_y :

$$|V| = V \sqrt{[1 - |\delta_V(\varphi)|]^2 \cos^2 \varphi + [1 - |\delta_V(90 - \varphi)|]^2 \sin^2 \varphi}. \quad (6)$$

Относительная погрешность измерения модуля $|V|$ составит

$$\delta_{|V|} = \sqrt{[1 - |\delta_V(\varphi)|]^2 \cos^2 \varphi + [1 - |\delta_V(90 - \varphi)|]^2 \sin^2 \varphi} - 1. \quad (7)$$

Аргумент вектора V можно определить из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{V'_y}{V'_x} = \frac{1 - |\delta_V(90 - \varphi)|}{1 - |\delta_V(\varphi)|} \operatorname{tg} \varphi, \quad (8)$$

где φ — истинный аргумент вектора; φ' — измеренный.

Так как погрешность измерения направления ветра принято оценивать в абсолютных величинах, то

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = \arctg \left(\frac{1 - |\delta_{V(90-\varphi)}|}{1 - |\delta_{V(\varphi)}|} \operatorname{tg} \varphi \right) - \varphi. \quad (8)$$

Результаты расчетов погрешностей по (7) и (9) приведены в табл. 2. Значения $|\delta_{V(\varphi)}|$ и $|\delta_{V(90-\varphi)}|$ взяты из табл. 1.

Таблица

φ°	α°				
	30	45	60	75	81

Значения $\delta_{ V } \%$					
5	0,60	0,55	0,40	0,35	0,35
10	2,00	1,85	1,47	1,32	1,20
15	4,54	3,93	3,08	2,60	2,50
20	8,14	7,12	5,94	4,80	4,30
30	14,20	12,65	9,59	5,05	4,00
45	21,65	17,65	11,60	5,05	4,00
60	14,20	12,65	9,59	5,05	4,00
70	8,14	7,12	5,94	4,80	4,30
75	4,54	3,93	3,08	2,60	2,50
80	2,00	1,85	1,47	1,32	1,20
85	0,60	0,55	0,40	0,35	0,35

Значения $\Delta\varphi$					
5	-2°30'	-2°30'	-2°30'	-2°30'	-2°30'
10	-4°45'	-4°45'	-4°40'	-4°50'	-4°45'
15	-6°40'	-6°40'	-6°40'	-6°30'	-6°20'
20	-7°45'	-7°50'	-7°50'	-6°55'	-6°10'
30	-7°30'	-7°40'	-7°00'	-3°45'	-2°55'
45	0	0	0	0	0
60	+7°30'	+7°40'	+7°00'	+3°45'	+2°55'
70	+7°45'	+7°50'	+7°50'	+6°55'	+6°10'
75	+6°40'	+6°40'	+6°40'	+6°30'	+6°20'
80	+4°45'	+4°45'	+4°40'	+4°53'	+4°45'
85	+2°30'	+2°30'	+2°30'	+2°30'	+2°30'

Из табл. 2 следует:

1. Погрешность измерения модуля вектора по ортогональным составляющим уменьшается с увеличением статического угла атак (α) лопасти винта компонентных вертушек. Следует рекомендовать применение для этой цели винтов с углами атаки $60^\circ < \alpha < 75^\circ$.

2. Погрешность измерения аргумента φ вектора ветра практически не зависит от угла α .

Следует отметить, что погрешности реальных компонентных винтов могут отличаться от данных, приведенных в табл. 1 и 2, тем больше, чем больше их лопасти отличаются от лопастей с бесконечным удлинением, для которых справедливы теоретические реше

ия. Кроме того, многолопастные винты должны иметь некоторое преимущество по сравнению с малолопастными винтами. Это объясняется тем, что взаимное экранирование лопастей многолопастных винтов уменьшит эффект действия боковой составляющей.

Рассмотренный способ измерения составляющих вектора ветра является единственно возможным. Так, например, имеется принципиальная возможность измерения ортогональных составляющих помощью двух винтовых вертушек, оси вращения которых находятся под некоторым углом 2β друг к другу. Причем угол β может быть произвольным.

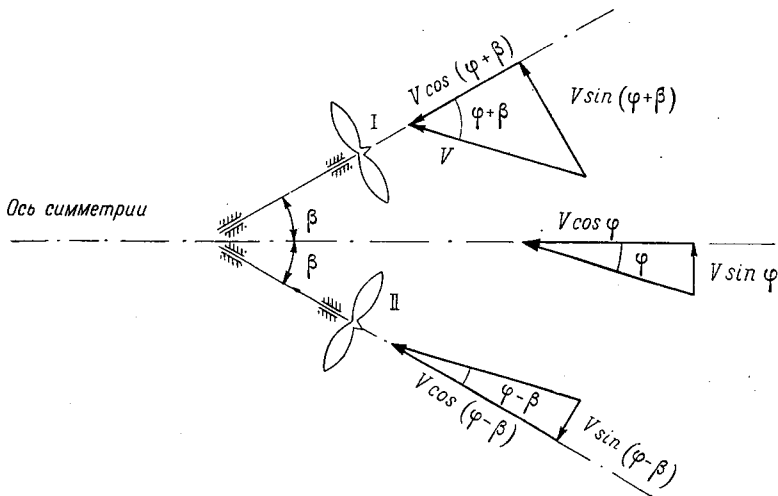


Рис. 3. Вариант схемы измерения составляющих вектора ветра.

На рис. 3 показана схема установки винтовых вертушек, оси вращения которых расположены под углом $\pm\beta$ относительно некоторой оси симметрии.

Допустим, что необходимо измерить составляющие вектора скорости ветра вдоль оси симметрии (в дальнейшем будем называть эту составляющую продольной) и перпендикулярно ей (поперечную составляющую), т. е. значения $V \cos \varphi$ и $V \sin \varphi$ (рис. 3).

Пусть вектор V находится под углом φ к оси симметрии вертушек I и II. Угол между вектором V и осью вращения винта I будет равен $\varphi + \beta$, а между осью винта II и вектором V — $\varphi - \beta$. Винт I будет вращаться с угловой скоростью, пропорциональной $V \cos(\varphi + \beta)$, а винт II — со скоростью, пропорциональной $V \cos(\varphi - \beta)$.

Сумма показаний винтовых приборов I и II будет равна

$$n_2 + n_1 = k_a V [\cos(\varphi - \beta) + \cos(\varphi + \beta)] = 2k_a V \cos \beta \cos \varphi, \quad (10)$$

а разность показаний составит

$$n_2 - n_1 = k_a V [\cos(\varphi - \beta) - \cos(\varphi + \beta)] = 2k_a V \sin \beta \sin \varphi, \quad (11)$$

где n_1 и n_2 — показания винтовых приборов I и II ; k_a — коэффициент пропорциональности винта (см., например, [2]). Из (10) и (11) следует, что сумма показаний вертушек I и II будет пропорциональна продольной составляющей, равной $2k_a V \cos \beta \cos \varphi$, а разность — поперечной составляющей, равной $2k_a V \sin \beta \sin \varphi$. Множители при $V \cos \varphi$ и $V \sin \varphi$ являются постоянными, так как β и угол β — величины, постоянные для данной конструкции прибора.

На вертушки I и II одновременно воздействуют боковые составляющие вектора скорости ветра — $V \sin(\varphi + \beta)$ и $V \sin(\varphi - \beta)$ соответственно. Следовательно, действительные показания винтовых приборов I и II с учетом погрешностей за счет боковых составляющих будут равны

$$n'_1 = k_a V [1 - |\delta_V(\varphi + \beta)|] \cos(\varphi + \beta), \quad (12)$$

$$n'_2 = k_a V [1 - |\delta_V(\varphi - \beta)|] \cos(\varphi - \beta), \quad (13)$$

где n'_1 и n'_2 — показания винтовых приборов с учетом погрешностей.

Сумма и разность показаний n'_2 и n'_1 соответственно равны

$$n'_2 + n'_1 = k_a V [2 \cos \beta \cos \varphi - (\Delta_V(\varphi - \beta) + \Delta_V(\varphi + \beta))], \quad (14)$$

$$n'_2 - n'_1 = k_a V [2 \sin \beta \sin \varphi - (\Delta_V(\varphi - \beta) - \Delta_V(\varphi + \beta))], \quad (15)$$

где $\Delta_V(\varphi + \beta)$ и $\Delta_V(\varphi - \beta)$ — абсолютные погрешности косинусоидальной зависимости, обусловленные боковыми составляющими.

Абсолютные погрешности измерения продольной и боковой составляющих определяются как разности между выражениями (14) и (10), а также (15) и (11):

$$\Delta_1 = (n'_2 + n'_1) - (n_2 + n_1) = -k_a V [\Delta_V(\varphi - \beta) + \Delta_V(\varphi + \beta)]; \quad (16)$$

$$\Delta_2 = (n'_2 - n'_1) - (n_2 - n_1) = -k_a V [\Delta_V(\varphi - \beta) - \Delta_V(\varphi + \beta)]. \quad (17)$$

Относительные погрешности соответственно равны

$$\delta_1 = \frac{\Delta_1}{n_2 + n_1} = - \frac{\Delta_V(\varphi - \beta) + \Delta_V(\varphi + \beta)}{2 \cos \beta \cos \varphi}; \quad (18)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta_2}{n_2 - n_1} = - \frac{\Delta_V(\varphi - \beta) - \Delta_V(\varphi + \beta)}{2 \sin \beta \sin \varphi}. \quad (19)$$

На рис. 4 даны графики изменения абсолютных погрешностей $\Delta_V(\varphi - \beta)$ и $\Delta_V(\varphi + \beta)$ для различных значений β . В табл. 3 приведены результаты расчетов δ_1 и δ_2 (для $\alpha = 45^\circ$) по формулам (18) и (19). Значения $\Delta_V(\varphi - \beta)$ и $\Delta_V(\varphi + \beta)$ снимались с графиков (рис. 3). На рис. 5 показаны изменения δ_1 и δ_2 в функции от φ для различных β .

Анализ табл. 3 и рис. 4 позволяет сделать вывод о том, что с точки зрения погрешностей способ измерения составляющих вектора ветра по схеме, показанной на рис. 3, не имеет каких-либо преимуществ по сравнению со схемой измерения, показанной на рис. 2.

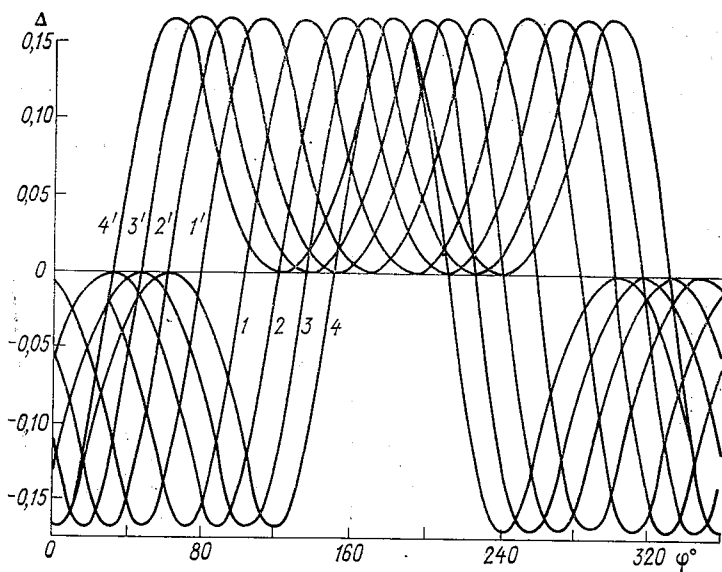


Рис. 4. График абсолютных погрешностей $\Delta_V(\varphi-\beta)$ и $\Delta_V(\varphi+\beta)$.

1) $\beta=12^\circ$, 1') $\beta=-12^\circ$, 2) $\beta=30^\circ$, 2') $\beta=-30^\circ$, 3) $\beta=45^\circ$, 3') $\beta=-45^\circ$, 4) $\beta=60^\circ$, 4') $\beta=-60^\circ$.

Таблица 3

φ°	$\beta=12^\circ$		$\beta=30^\circ$		$\beta=45^\circ$		$\beta=60^\circ$	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
0	-0,008	-1,000	-0,064	-1,000	-0,176	-1,000	-0,335	+1,000
5	-0,010	-0,379	-0,065	-0,373	-0,174	-0,365	-0,334	+0,017
10	-0,014	-0,377	-0,071	-0,425	-0,170	-0,344	-0,305	+0,050
15	-0,024	-0,406	-0,081	-0,420	-0,165	-0,298	-0,261	+0,028
20	-0,035	-0,390	-0,094	-0,417	-0,154	-0,254	-0,200	+0,021
30	-0,072	-0,397	-0,112	-0,335	-0,109	-0,147	-0,066	+0,066
45	-0,171	-0,319	-0,110	-0,149	0,000	-0,000	-0,180	-0,074
60	-0,286	0,000	-0,066	+0,066	-0,188	-0,085	-0,330	-0,110
70	-0,359	+0,230	-0,295	+0,027	-0,423	-0,092	-0,475	-0,094
80	-0,478	+0,336	-0,964	+0,015	-0,975	-0,061	-0,763	-0,048
85	-0,547	+0,187	-2,153	+0,005	-1,983	-0,032	-1,434	-0,023
90	∞	+0,018	∞	0,000	∞	0,000	∞	-0,003
95	+0,547	-0,187	+2,153	-0,005	+1,983	+0,032	+1,434	+0,023
00	+0,478	-0,336	+0,964	-0,015	+0,915	+0,061	+0,763	+0,048
05	+0,390	-0,330	+0,535	-0,016	+0,616	+0,080	+0,570	+0,076
10	+0,359	-0,230	+0,295	-0,027	+0,423	+0,092	+0,475	+0,094
20	+0,286	0,000	+0,066	-0,066	+0,188	+0,085	+0,330	+0,110
35	+0,171	+0,319	+0,110	+0,149	0,000	0,000	+0,018	+0,074
50	+0,072	+0,397	+0,112	+0,335	+0,109	+0,147	+0,066	-0,066
60	+0,035	-0,390	+0,094	+0,417	+0,154	+0,254	+0,200	-0,021
65	+0,024	+0,406	+0,081	+0,420	+0,165	+0,298	+0,261	-0,028
70	+0,014	+0,377	+0,071	+0,425	+0,170	+0,344	+0,305	-0,050
75	+0,010	+0,379	+0,065	+0,373	+0,174	+0,365	+0,334	-0,017
80	+0,008	+1,000	+0,064	+1,000	+0,176	+1,000	+0,335	-1,000

рис. 1. Однако при измерении вертикальной составляющей (в этом случае оси винтов *I* и *II* (рис. 3) расположены в вертикальной плоскости, а в горизонтальной плоскости винты *I* и *II* устанавливаются с помощью флюгарки), когда угол будет изменяться в больших пределах (не более $\pm(10 \div 15^\circ)$) схема измерения

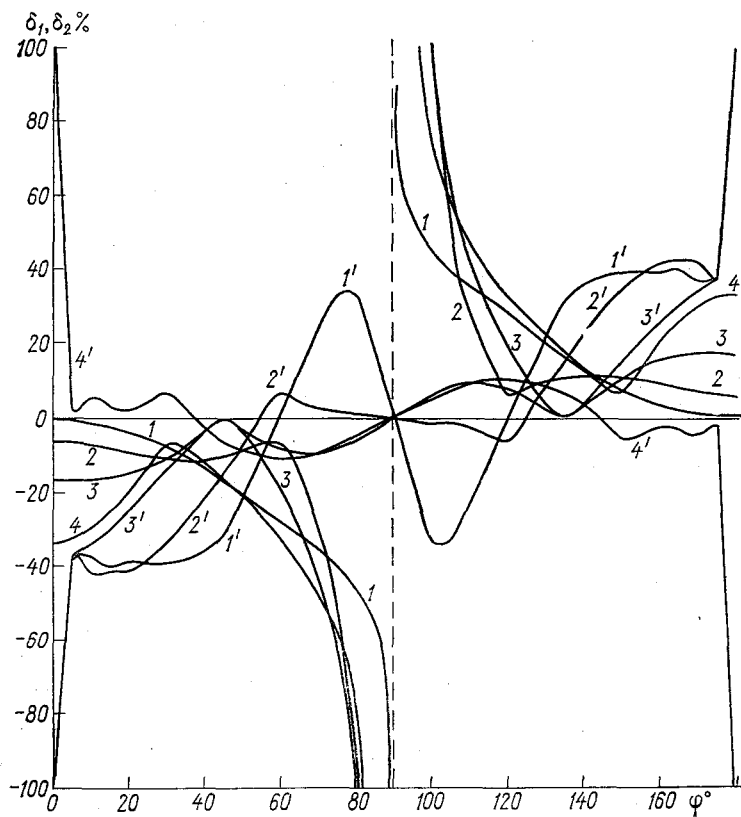


Рис. 5. График относительных погрешностей продольной (δ_1) и поперечной (δ_2) составляющих вектора ветра.

1) δ_1 для $\beta = 12^\circ$, 1') δ_2 для $\beta = -12^\circ$, 2) δ_1 для $\beta = 30^\circ$, 2') δ_2 для $\beta = -30^\circ$, 3) δ_1 для $\beta = 45^\circ$, 3') δ_2 для $\beta = -45^\circ$, 4) δ_1 для $\beta = 60^\circ$, 4') δ_2 для $\beta = -60^\circ$.

рис. 3 имеет существенное преимущество. Так, при углах $\beta = \pm 6^\circ$ вертикальная составляющая может быть измерена с погрешностью не превышающей 5—6%, так как погрешность измерения этой составляющей равна разности погрешностей винтов *I* и *II* (см. формулу (19)).

Основной вывод, который следует сделать из всего изложенного выше,— это то, что погрешность за счет боковой составляющей является систематической. Это значит, что имеется возможность компенсации этой погрешности схемным путем.

Из формул (4), (16), (17), (18) и (19) и табл. 1—3 следует, что для данной конструкции прибора ($\alpha = \text{const}$, $\beta = \text{const}$) погрешность измерения за счет боковой составляющей является функцией угла φ .

Однако следует помнить, что все вышеприведенные рассуждения относятся к теоретической модели винтового чувствительного элемента (например, лопасть винта представляет собой крыло бесконечного удлинения и взаимное экранирование лопастей отсутствует). Действительная функциональная зависимость $\delta = f(\varphi)$ может отличаться от теоретической. Практическая реализация идеи коррекции погрешности δ должна базироваться на реальной зависимости $\delta = f(\varphi)$, снятой в аэродинамической трубе при различных значениях φ .

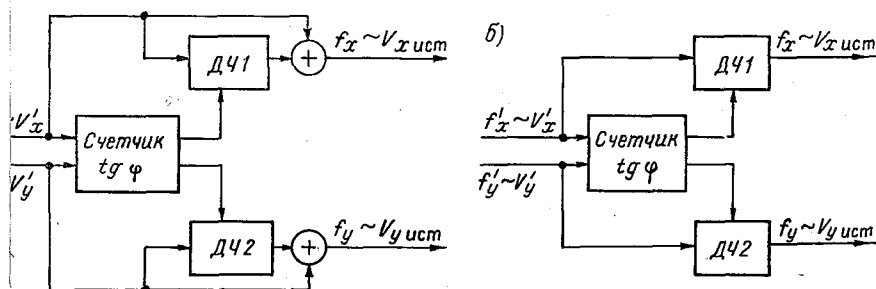


Рис. 6. Схема коррекции с суммированием (а) и делением (б).

Идея коррекции состоит в том, что в зависимости от фиксированного отношения V_6/V_0 , т. е. $\text{tg } \varphi$, могут вводиться поправки в обе составляющие вектора скорости ветра.

Можно предложить две схемы введения поправки на боковую составляющую: коррекция с суммированием (рис. 6 а) и коррекция делением (рис. 6 б).

Коррекция посредством суммирования осуществляется следующим образом. Выходным параметром датчика составляющей является частота. Так как измеренное значение частоты является заниженным по отношению к истинному, то можно представить

$$f_{\text{ист}} = f' + \frac{f'}{k_\varphi}, \quad (20)$$

где $f_{\text{ист}}$ — частота, пропорциональная истинному значению составляющей; f' — измеренное значение частоты; k_φ — коэффициент пропорциональности.

В отсутствие V_6 уравнение вертушки [2]

$$n = \omega_0 r = k_a V. \quad (21)$$

при наличии боковой составляющей

$$n' = \omega'_0 r = k'_a V. \quad (22)$$

Число оборотов вертушки и частота датчика связаны коэффициентом пропорциональности. Истинная и измеренная частоты носятся друг к другу как

$$\frac{f_{\text{ист}}}{f'} = \frac{n}{n'} = \frac{k_a}{k'_a}.$$

Используя выражение (23), найдем, что

$$k_\varphi = \frac{k'_a}{k_a - k'_a}.$$

Значения k'_a в зависимости от φ могут быть вычислены, как показано выше. Весь ряд значений k'_a разбивается на несколько диапазонов в соответствии с желаемой точностью коррекции. В каждом диапазоне вычисляется свой k_φ .

На вход счетчика $\text{tg } \varphi$ (рис. 6 а) поступают текущие значения частоты обеих вертушек. Одна составляющая, например f'_y , принимается за боковую составляющую. Счетчик $\text{tg } \varphi$ находит отношение $\frac{f'_y}{f'_x} = \frac{V_6}{V_0}$ и задает коэффициенты деления k_φ в делителях частот $D41$ и $D42$, причем $k_\varphi D41$ соответствует углу φ , а $k_\varphi D42$ — углу $(90^\circ - \varphi)$. Текущая частота суммируется с выходной частотой делителя. На выходе блока суммирования получается откорректированное значение.

Следует отметить, что в схеме отсутствует времязадающий блок. Счетчик $\text{tg } \varphi$ считает, сколько импульсов частоты f'_y придет на вход за определенное число импульсов частоты f'_x . Следовательно, время определения $\text{tg } \varphi$ и время действия каждого k_φ зависит от значения частоты, т. е. от величины составляющей скорости ветра.

Наличие блока суммирования текущих значений создает некоторые трудности, связанные с организацией сдвига одной величины относительно другой.

Схема коррекции с делением (рис. 6 б) построена на использовании данных табл. 1. Из этой таблицы следует, что измеренное значение скорости может составлять 100—50% истинного (при изменении φ от 0 до 90°).

Текущая частота каждого датчика поступает на вход соответствующего делителя частоты. Коэффициенты деления $D41$ и $D42$ будут изменяться на 50%. Число ступеней изменения коэффициента деления определяется требуемой точностью. Максимальный коэффициент деления соответствует отсутствию боковой составляющей ($\varphi = 0^\circ$), по мере нарастания V_6 коэффициент деления уменьшается до 50% (при $\varphi = 90^\circ$).

Как и в первой схеме, счетчик $\text{tg } \varphi$ определяет отношение f'_y и устанавливает коэффициент деления $D41$ для угла φ и коэффициент $D42$ для угла $(90^\circ - \varphi)$.

В этой схеме частота датчика должна быть выше, чем в первой схеме, чтобы обеспечить тот же масштаб измерения. Следовательно, время определения коэффициента коррекции меньше, чем в схеме с суммированием.

Здесь целесообразно упомянуть еще об одном интересном варианте измерения трех ортогональных составляющих вектора скорости ветра [3], в котором оси вращения трех винтов ориентированы направлению ребер куба, а диагональ куба расположена вертикально.

Угол между осью каждой вертушки и вертикальной осью составляет $54^{\circ}44'$, т. е. проекция единичного вектора вдоль каждой оси вращения на вертикальную ось составляет $\sqrt{1/3}$, а на горизонтальную плоскость — $\sqrt{2/3}$. Таким образом, составляющие скорости ветра на ортогональные направления x , y и z будут равны

$$\begin{aligned} V_x &= k_a \left(-\sqrt{\frac{1}{6}} V_1 - \sqrt{\frac{1}{6}} V_2 + \sqrt{\frac{2}{3}} V_3 \right), \\ V_y &= k_a \left(\sqrt{\frac{1}{2}} V_1 - \sqrt{\frac{1}{2}} V_2 \right), \\ V_z &= k_a \left(\sqrt{\frac{1}{3}} V_1 + \sqrt{\frac{1}{3}} V_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} V_3 \right), \end{aligned} \quad (25)$$

где V_1 , V_2 и V_3 — значения составляющих вектора скорости ветра вдоль осей вращения вертушки (с учетом знака направления вращения винтов), k_a — коэффициенты пропорциональности винтовых вертушек.

По утверждению авторов патента, максимальная погрешность измерения модуля вектора составляет $\pm 10,5\%$, а аргумента $\pm 5^{\circ}$. Однако эти данные нуждаются в проверке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов И. А., Протопопов Н. Г. Работа винтового анемометра в стационарном потоке при наличии боковой составляющей скорости ветра. — Учен. зап. Казан. ун-та. Физ.-матем. науки. 1976, вып. 346, с. 21—32.
2. Протопопов Н. Г. Проектирование ветроизмерительных приборов. — Гидрометеоздат, 1976. — 192 с.
3. Патент США № 4031755, кл. 73-189, 1977.

Л. П. Афиноген

РАСЧЕТ ПЕРИОДА РЕГЕНЕРАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

В [1] показано, что основная часть затрат на хранение информации связана с процессами регенерации. Поэтому экономически целесообразно регенерацию производить как можно реже — насколько это совместимо с требованиями по длительности и надежности хранения.

Будем считать, что техническая система хранения определена (т. е. известны матрица старения [2], помехоустойчивый код и алгоритм декодирования) и для нее должен быть найден период регенерации t_{per} , исходя из заданного срока хранения T_0 и надежности $p_0 = 1 - \varepsilon$, под которой понимается вероятность правильного воспроизведения определенного объема информации в течение всего срока T_0 . При этом величина $\varepsilon \ll 1$ представляет собой суммарную вероятность ошибочного декодирования и отказа. Вероятности p_t и ε_t будем относить к одному закодированному блоку; пересчет их значений к другому объему (например, к целой архивной ленте, группе символов или даже одному символу) не представляет трудностей.

Обозначим через p_t и $\varepsilon_t = 1 - p_t$ вероятности соответственно правильного декодирования блока и неправильного декодирования (ошибки или отказа) через время t с момента последней регенерации. К моменту очередной регенерации эти вероятности равны $p_{t_{\text{per}}}$, $\varepsilon_{t_{\text{per}}}$. За время хранения T_0 будет произведено $n = \frac{T_0}{t_{\text{per}}}$ регенераций. Для обеспечения заданной надежности должно соблюдаться условие

$$p_0 = 1 - \varepsilon = (p_{t_{\text{per}}})^n = (1 - \varepsilon_{t_{\text{per}}})^{T_0/t_{\text{per}}}.$$

гарифмируя это выражение и учитывая, что $\varepsilon \ll 1$; $\varepsilon_{t_{\text{per}}} \ll 1$; $(1 - \varepsilon) \approx -\varepsilon$; $\ln(1 - \varepsilon_{t_{\text{per}}}) \approx -\varepsilon_{t_{\text{per}}}$, получим

$$1 - p_0 = -\varepsilon \approx -\frac{T_0}{t_{\text{per}}} \varepsilon_{t_{\text{per}}};$$

$$\varepsilon_{t_{\text{per}}} \approx \frac{\varepsilon t_{\text{per}}}{T_0}. \quad (2)$$

Вероятность неправильного декодирования ε_t зависит от значений элементов матрицы старения $\|p_{ij}(t)\|$:

$$\varepsilon_t = F(\|p_{ij}(t)\|), \quad (3)$$

е вид функции F зависит от помехоустойчивого кода и алгоритма кодирования, используемых в системе. Для конкретной системы анения функцию F можно считать известной, как и матрицу старения $\|p_{ij}(t)\|$. Для времени, равного периоду регенерации, условия (2) и (3) дают уравнение относительно t_{per} :

$$F(\|p_{ij}(t_{\text{per}})\|) = \frac{\varepsilon t_{\text{per}}}{T_0}. \quad (4)$$

Из этого уравнения может быть найден период регенерации для данной системы хранения и заданных условий (ε ; T_0).

При использовании двухсимвольного алфавита (0 и 1), что характерно для любых технических систем хранения, матрица старения может быть однозначно определена с помощью всего двух переходных вероятностей, $p_{01}(t)$ и $p_{10}(t)$, соответствующих вероятностям перехода символа 0 в символ 1 и наоборот. В этом случае выражение (4) приобретает вид

$$F[p_{01}(t_{\text{per}}); p_{10}(t_{\text{per}})] = \frac{\varepsilon t_{\text{per}}}{T_0}. \quad (5)$$

Наконец, для симметричной матрицы старения

$$p_{01}(t) = p_{10}(t) = p_{\text{ош}}(t) \quad (6)$$

уравнение (5) еще более упрощается

$$F[p_{\text{ош}}(t_{\text{per}})] = \frac{\varepsilon t_{\text{per}}}{T_0}. \quad (7)$$

(6) и (7) $p_{\text{ош}}(t)$ означает вероятность ошибки при считывании оичного символа с архивного носителя через время t с момента следней регенерации. В уравнении (7) обе части являются монотонными функциями t_{per} — в правой части линейно нарастающей от нуля до ε (при $t_{\text{per}} = T_0$), в левой части возрастающей от нуля при $t_{\text{per}} = 0$ до $F[p_{\text{ош}}(t_{\text{per}})] = \varepsilon_{t_{\text{per}}} \approx 0,5$ при очень больших t_{per} . Как правило, при достаточно большом сроке хранения T_0 уравнение (7) (как и уравнения (4), (5)) имеет единственное решение, которое может быть найдено тем или иным способом. Следует отметить, что может оказаться, особенно при малом сроке

хранения, что в (7) для максимально возможного периода регенерации ($t_{\text{per}} = T_0$) левая часть меньше правой:

$$F[p_{\text{ош}}(T_0)] < \frac{\varepsilon T_0}{T_0} = \varepsilon$$

и уравнение не имеет решения. Практически это означает, что в данном сроке хранения промежуточная регенерация вообще нужна.

Для иллюстрации метода расчета и выявления некоторых особенностей, характеризующих зависимость t_{per} от требований, типовых для любых систем хранения, рассмотрим пример.

Пусть для двоичной системы старение характеризуется симметричной матрицей вида

$$M = \begin{pmatrix} 1 - p(t) & p(t) \\ p(t) & 1 - p(t) \end{pmatrix},$$

где вероятность ошибки выражается через нормальный интеграл вероятности, т. е. функцией вида

$$p(t) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t_1 - t_0)^2}{2\sigma^2}} dt_1. \quad (1)$$

Эта зависимость позволяет учесть ряд особенностей процесса старения реальных носителей.

1. В начальный момент при создании архивной ленты, а также сразу после очередной регенерации (т. е. при $t = 0$) существует хотя и малая, но не нулевая вероятность ошибки.

2. Первоначальная интенсивность старения незначительна и $p(t)$ растет медленно.

3. С течением времени интенсивность старения возрастает и скорость увеличения $p(t)$ растет. По мере приближения к некоторому «критическому» времени t_0 , которое можно считать средним «временем жизни» носителя, начинается его интенсивное разрушение и $p(t)$ быстро возрастает от малого до предельного значения.

4. При $t \rightarrow \infty$ $p(t) \rightarrow \frac{1}{2}$ (это учитывается множителем в (10)). Отметим, что если для какой-либо конкретной системы хранения целесообразно считать начальную вероятность ошибки нулевой, то это легко учесть, видоизменив выражение (10):

$$p(t) = \frac{1}{2A\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t e^{-\frac{(t_1 - t_0)^2}{2\sigma^2}} dt_1. \quad (1)$$

В этом выражении

$$A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t_1 - t_0)^2}{2\sigma^2}} dt_1$$

— нормирующий множитель, обеспечивающий предельное значение

$$\lim p(t) = \frac{1}{2} \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

Параметры t_0 ; σ , входящие в (10) и (11), зависят от типа носителя, системы записи (в частности, от плотности), условий хранения. Так, например, для магнитной ленты эти параметры могут иметь значения $t_0 = 50 \div 100$ лет, $\sigma = 10 \div 15$ лет. В табл. 1 приведены вероятности ошибок $p(t)$ для трех вариантов значений σ и t_0 .

Таблица 1

Значения вероятности ошибок $p(t)$, определенные по формуле (10), для трех вариантов значений σ ; t_0 и математическое ожидание числа ошибок на стандартной МЛ ($1,2 \cdot 10^8$ дв. символов)

t лет	$t_0 = 50; \sigma = 10,41215$		$t_0 = 50; \sigma = 9,46746$		$t_0 = 100; \sigma = 19,32932$	
	$p(t)$	N	$p(t)$	N	$p(t)$	N
0	$3,93 \cdot 10^{-7}$	48	$3,23 \cdot 10^{-8}$	4	$5,85 \cdot 10^{-8}$	7
1	$6,32 \cdot 10^{-7}$	76	$5,68 \cdot 10^{-8}$	7	$7,64 \cdot 10^{-8}$	9
2	$1,006 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^2$	$0,995 \cdot 10^{-7}$	12	$9,99 \cdot 10^{-8}$	12
5	$3,90 \cdot 10^{-6}$	$4,68 \cdot 10^2$	$5,09 \cdot 10^{-7}$	61	$2,28 \cdot 10^{-7}$	27
10	$3,08 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^3$	$6,05 \cdot 10^{-6}$	$7,26 \cdot 10^2$	$8,06 \cdot 10^{-7}$	97
15	$1,95 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^4$	$5,44 \cdot 10^{-5}$	$6,53 \cdot 10^3$	$2,75 \cdot 10^{-6}$	$3,30 \cdot 10^2$
20	$9,94 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^5$	$3,84 \cdot 10^{-4}$	$4,61 \cdot 10^4$	$8,80 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^3$
25	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$4,92 \cdot 10^5$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$2,48 \cdot 10^5$	$2,61 \cdot 10^{-5}$	$3,13 \cdot 10^3$
30	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^6$	$8,67 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^6$	$7,37 \cdot 10^{-5}$	$8,84 \cdot 10^3$
40	$8,43 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^7$	$7,27 \cdot 10^{-2}$	$8,72 \cdot 10^6$	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$5,72 \cdot 10^4$
50	0,250	$3,0 \cdot 10^7$	0,250	$3,0 \cdot 10^7$	$2,43 \cdot 10^{-3}$	$2,92 \cdot 10^5$
60	0,416	$4,99 \cdot 10^7$	0,427	$5,12 \cdot 10^7$	$9,63 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^6$
70	0,486	$5,83 \cdot 10^7$	0,491	$5,89 \cdot 10^7$	$3,02 \cdot 10^{-2}$	$3,62 \cdot 10^6$
80	0,499	$5,99 \cdot 10^7$	0,4996	$5,99 \cdot 10^7$	$7,53 \cdot 10^{-2}$	$9,04 \cdot 10^6$
90	0,49969	$6,00 \cdot 10^7$	$\sim 0,5$	$6 \cdot 10^7$	0,151	$1,81 \cdot 10^7$
100	$\sim 0,5$	$6,00 \cdot 10^7$	$\sim 0,5$	$6 \cdot 10^7$	0,250	$3,0 \cdot 10^7$

Здесь σ подобраны таким образом, чтобы вероятности ошибки через два года хранения были равны $p_1(2) = 10^{-6}$; $p_2(2) = 10^{-7}$; $p_3(2) = 10^{-7}$. В таблице приведено также математическое ожидание числа ошибок N на полной МЛ стандартного размера ($d = 12,7$ мм, $L = 750$ м), содержащей около $1,2 \cdot 10^8$ дв. символов.

Пусть в рассматриваемом примере для защиты применяется 4-мерная кодовая матрица [3] с размерами координат $33 \times 32 \times 8 \times 8$. Устойчивость такой матрицы при использовании алгоритма декодирования, описанного в [4], может быть выражена с помощью следующих соотношений [5].

Вероятность правильного декодирования $P_{\text{пл}}$ равна

$$P_{\text{пл}} = [1 - P^*(\bar{A})]^g, \quad (12)$$

где g — число различных 4-мерных параллелепипедов в матрице; в данном примере $g = C_{33}^2 C_{32}^2 C_8^2 C_8^2 \cong 2,0532 \cdot 10^8$; событие $\bar{A}$ заключается в неправильном декодировании (ошибочном или отказе) одного (фиксированного) 4-мерного параллелепипеда;

$$P^*(\bar{A}) = P(\bar{A}) + 96p^5(1-p)^{11} + 824p^5(1-p)^{10} + 3152p^7(1-p)^9 \quad (13)$$

— вероятность такой комбинации ошибки в одном параллелепипеде, при которой происходит неправильное декодирование. В (13) три последних слагаемых учитывают особенности реального алгоритма декодирования, который отличается от «идеального» (осуществляющего декодирование по критерию максимального правдоподобия), а первое слагаемое

$$P(\bar{A}) = \sum_{i=8}^{16} C_{16}^i p^i (1-p)^{16-i} \quad (14)$$

— вероятность неправильного декодирования фиксированного 4-мерного параллелепипеда при «идеальном» алгоритме, реализующем критерий максимального правдоподобия. Величина p в (13) (14) представляет собой вероятность ошибки, которая в данном случае растет с течением времени согласно зависимости (10). Выражение (13) для рассматриваемой задачи можно упростить, если

учесть, что вероятности $P^*(\bar{A})$, $P_{\text{нд}}$ в данном случае можно определять не для всего диапазона, а только для сравнительно малых p , например для $p \leq 10^{-3}$. Для таких значений p второй член в выражении (13) на несколько порядков превышает сумму остальных членов. Поэтому с достаточной для практических расчетов точностью можно принять, что

$$P^*(\bar{A}) \approx 96p^{-5} (1-p)^{11} \approx 96p^5; \quad (15)$$

$$P_{\text{нд}} = (1 - 96p^5)^g \approx 1 - 96gp^5 = 1 - 1,9710 \cdot 10^{10} p^5. \quad (16)$$

Перейдем от вероятности $P_{\text{нд}}$ к вероятности неправильного декодирования $P_{\text{нд}}$, представляющей собой сумму вероятностей ошибки и отказа:

$$P_{\text{нд}} = 1 - P_{\text{нд}} = 1,9710 \cdot 10^{10} p^5. \quad (17)$$

Используя (7), (10), (17), получим нелинейное уравнение относительно периода регенерации $t_{\text{пер}}$:

$$\frac{\varepsilon t_{\text{пер}}}{T_0} = 1,971 \cdot 10^{10} \left[\frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{t_{\text{пер}}} e^{-\frac{(t_1 - t_0)^2}{2\sigma^2}} dt_1 \right]^5, \quad (18)$$

которое можно решить численно, если заданы ε и T_0 . Следует отметить, что в (18) входит отношение ε/T_0 , поэтому эти два параметра — «ненадежность» ε и срок хранения T_0 — можно заменить одним:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{T_0}. \quad (19)$$

На рис. 1 (кривые 1, 2, 3) представлены рассчитанные таким образом зависимости $t_{\text{пер}} = f(\lg \alpha)$ для трех вариантов функции $p(t)$ вида (10) при значениях t_0 ; σ , приведенных в табл. 1. Там же представлены значения вероятности ошибки в одном символе $\lg p(t_{\text{пер}}) = f(\lg \alpha)$, достигаемые к моменту регенерации (кривые 4

, 6). Пользуясь этими зависимостями, можно определить период регенерации при заданных ε и T_0 . Например, пусть требуется обеспечить хранение в течение $T_0 = 10^5$ лет при вероятности утраты одного закодированного блока вследствие отказа от декодирования или ошибки, не превышающей $5 \cdot 10^{-10}$. Для этих значений $\alpha = \varepsilon/T_0 = 5 \cdot 10^{-15}$. Если характеристики носителя соответствуют кривой 1, то период регенерации может быть равен $t_{\text{per}} = 8,2 \approx 8$ лет.

Анализ зависимостей рис. 1 показывает, что период регенерации сравнительно слабо зависит от требований по надежности сроку хранения. Например, для кривой 1 уменьшение α в 10^4 раз

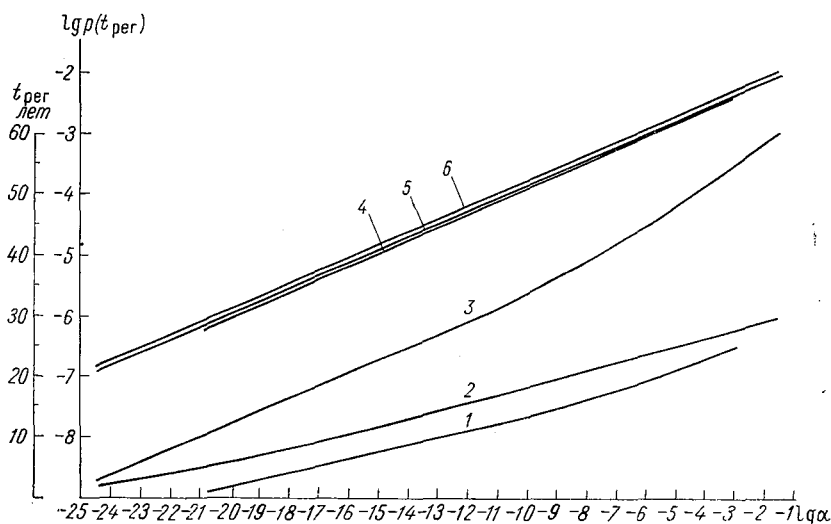


Рис. 1. Зависимости $t_{\text{per}} = f_1(\lg \alpha)$ и $\lg p(t_{\text{per}}) = f_2(\lg \alpha)$ для трех вариантов процесса старения.

1, 4) $t_0 = 50$, $\sigma = 10,41215$; 2, 5) $t_0 = 50$, $\sigma = 9,46746$; 3, 6) $t_0 = 100$, $\sigma = 19,32932$.

т значения $5 \cdot 10^{-14}$ ($\lg \alpha = -13,3$) до $5 \cdot 10^{-18}$ ($\lg \alpha = -17,3$) требует всего лишь двухкратного уменьшения t_{per} (с 10 до 5 лет). Значения вероятности ошибки к моменту регенерации зависят от α , но слабо зависят от параметров старения. Последнее объясняется характером функции, определяющей помехоустойчивость системы кодирования: при достаточно крупных размерах закодированного блока даже незначительное изменение вероятности ошибок в символах существенно изменяет вероятность неправильного декодирования. Это характерно не только для 4-мерной кодовой матрицы, но и для любых достаточно сложных систем кодирования.

В заключение необходимо отметить, что оценки периода регенерации, полученные на основе приведенной методики, следует рассматривать как приближенные и ориентировочные. Существует ряд факторов, снижающих точность таких оценок:

— матрица старения практически всегда бывает известна лишь приближенно. К тому же она зависит от условий хранения, партии

выпуска носителя, интенсивности использования архивных лент в процессе хранения и других факторов;

— наряду с независимыми ошибками могут быть также пятна, ошибки и сбои синхронизации;

— предположение о симметричности канала не всегда реализуется в действительности.

В связи с этим важное значение приобретает периодический контроль информации — когда период регенерации делится на несколько интервалов; в конце каждого интервала производится проверка архивных лент с определением фактического их состояния (уровня ошибок) и по результатам контроля принимается решение о продолжении хранения или проведении регенерации. Необходимо также подчеркнуть, что отмеченная выше слабая зависимость $t_{\text{рег}}$ от требований к хранению уменьшает возможный разброс $t_{\text{рег}}$ и позволяет выбрать для данной системы хранения один общий период регенерации независимо от вида информации.

Выводы

1. Приведенная методика позволяет рассчитать период регенерации для конкретной системы хранения информации при заданных требованиях к сроку и надежности хранения.

2. Определенный таким образом период регенерации слабо зависит от требований к надежности и сроку хранения. Для определенной технической системы может быть выбран единый срок регенерации для всех архивных лент.

3. Важное значение имеет периодический контроль состояния архивных лент. По результатам контроля принимается решение о продолжении хранения или назначается регенерация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашев Г. А. и др. Экономические вопросы длительного хранения информации. — Труды ВНИИГМИ—МЦД, 1978, вып. 31, с. 24—43.
2. Афиногенов Л. П. Матричная модель старения при длительном хранении информации. — Труды ГГО, 1975, вып. 347, с. 13—29.
3. Афиногенов Л. П. Можно ли длительно хранить информацию на магнитной ленте? — Метеорология и гидрология, 1974, № 11, с. 104—108.
4. Абашев Г. А. и др. Алгоритмы и программы кодирования и декодирования четырехмерной кодовой матрицы. — Труды ГГО, 1975, вып. 347, с. 68—77.
5. Абашев Г. А. и др. Помехоустойчивость многомерных кодовых матриц. — Труды ГГО, 1975, вып. 347, с. 78—91.

Л. П. Афиногенов

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ АРХИВНЫХ ЛЕНТ

Необходимость периодического контроля архивных лент вытекает как из экономических, так и из технических соображений. Стоимость регенерации составляет главную часть затрат на хранение [1]. Вместе с тем существует ряд факторов, таких, как условия хранения, частота обращения к архивным лентам в процессе хранения, тип и качество носителей и др., которые сильно влияют на интенсивность старения и приводят к тому, что фактически необходимый период регенерации для разных частей архива и даже для отдельных лент может значительно различаться. Все это обуславливает целесообразность введения регламентного контроля, который должен проводиться с фиксированным периодом, в несколько (3—5) раз меньшим, чем расчетный [2] период регенерации. Кроме регламентного контроля, информация о состоянии архивных лент может быть получена при любом обращении к ним, например при снятии копии для потребителей. Наконец, регенерации также всегда должен предшествовать контроль.

По результатам контрольной проверки, по какой бы причине она ни проводилась, должно быть принято решение о продолжении хранения или проведении регенерации. В данной статье рассматривается методика решения этого вопроса для технических носителей, в которых для записи информации используются двоичные символы.

Основным результатом проверки является вероятность ошибок в двоичных символах, в общем случае различная для переходов $1 \Rightarrow 0$ и $0 \Rightarrow 1$. Обозначим эти вероятности $p_{10}^{(1)}$ и $p_{01}^{(1)}$. Будем исходить из следующих предположений:

1. Известны результаты не только данной, но и предыдущей проверки $p_{10}^{(0)}$ и $p_{01}^{(0)}$, а также предельно-допустимая суммарная вероятность ошибки $p_{\text{пред}} = (p_{10} + p_{01})|_{\text{пред}}$, при которой требуется регенерация [2]. Если анализируемая проверка — первая, то

известны соответствующие характеристики $p_{10}^{(0)}$ и $p_{01}^{(0)}$ после записи архивной ленты.

2. Период между проверками невелик по сравнению с периодом регенерации. Во всяком случае можно считать, что факторы, определяющие старение в предстоящий отрезок времени до очередного контроля и на отрезке времени, прошедшем с момента предыдущего контроля, остаются одинаковыми.

Это позволяет в уравнении старения [3], которое в данном случае (двоичный канал) имеет вид

$$\begin{vmatrix} p'_{00}(t) & p'_{01}(t) \\ p'_{10}(t) & p'_{11}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p_{00}(t) & p_{01}(t) \\ p_{10}(t) & p_{11}(t) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -g_1 & g_1 \\ g_2 & -g_2 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

считать элементы определяющей матрицы g_1 ; g_2 не зависящими от времени.

Описываемая ниже методика анализа результатов контроля состоит в том, что решается уравнение (1) при начальных условиях

$$p_{01}(t_0) = p_{01}^{(0)}; \quad p_{10}(t_0) = p_{10}^{(0)}; \quad p_{01}(t_1) = p_{01}^{(1)}; \quad p_{10}(t_1) = p_{10}^{(1)}, \quad (2)$$

где t_0 — время предыдущей проверки, t_1 — время данной проверки.

В результате решения находится матрица старения и неизвестные (но не зависящие от времени) элементы определяющей матрицы. Полученная матрица старения дает возможность найти значения всех ее элементов для любого момента времени t . Определяются (прогнозируются) значения $p_{01}(t_2)$; $p_{10}(t_2)$ для t_2 , соответствующего моменту предполагаемого очередного контроля, и сумма $p_{01}(t_2) + p_{10}(t_2) = p_{\text{ош}}(t_2)$ сравнивается с предельным значением $p_{\text{пред}}$. При $p_{\text{ош}}(t_2) \leq p_{\text{пред}}$ можно продолжать хранение; при $p_{\text{ош}}(t_2) > p_{\text{пред}}$ назначается регенерация. Отметим, что в данной методике не делается предположение о симметрии канала, что, конечно, важно для практического применения.

Уравнение (1) сводится к системе линейных (первого порядка) дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Его общее решение имеет вид

$$\begin{aligned} M(t) &= \begin{vmatrix} p_{00}(t) & p_{01}(t) \\ p_{10}(t) & p_{11}(t) \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} C_1 e^{-(g_1+g_2)t} + \frac{g_2}{g_1+g_2} & 1 - C_1 e^{-(g_1+g_2)t} - \frac{g_2}{g_1+g_2} \\ 1 - C_2 e^{-(g_1+g_2)t} - \frac{g_1}{g_1+g_2} & C_2 e^{-(g_1+g_2)t} + \frac{g_1}{g_1+g_2} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя часть начальных условий для $t = t_0$:

$$\begin{vmatrix} p_{00}(0) & p_{01}(0) \\ p_{10}(0) & p_{11}(0) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 - p_{01}^{(0)} & p_{01}^{(0)} \\ p_{10}^{(0)} & 1 - p_{10}^{(0)} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

можно найти постоянные интегрирования:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 1 - p_{01}^{(0)} - \frac{g_2}{g_1 + g_2} = p_{00}^{(0)} - \frac{g_2}{g_1 + g_2}; \\ C_2 &= 1 - p_{10}^{(0)} - \frac{g_1}{g_1 + g_2} = p_{11}^{(0)} - \frac{g_1}{g_1 + g_2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При подстановке этих значений (3) принимает вид

$$I(t) = \left\| \begin{aligned} &\left(p_{00}^{(0)} - \frac{g_2}{g_1 + g_2}\right) e^{-(g_1 + g_2)t} + \frac{g_2}{g_1 + g_2} \\ &1 - \left(p_{11}^{(0)} - \frac{g_1}{g_1 + g_2}\right) e^{-(g_1 + g_2)t} - \frac{g_1}{g_1 + g_2} \\ &1 - \left(p_{00}^{(0)} - \frac{g_2}{g_1 + g_2}\right) e^{-(g_1 + g_2)t} - \frac{g_2}{g_1 + g_2} \\ &\left(p_{11}^{(0)} - \frac{g_1}{g_1 + g_2}\right) e^{-(g_1 + g_2)t} + \frac{g_1}{g_1 + g_2} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Для того чтобы найти элементы определяющей матрицы g_1 и g_2 , надо использовать вторую часть начальных условий для $t = t_1$:

$$\left\| \begin{array}{cc} p_{00}(t_1) & p_{01}(t_1) \\ p_{10}(t_1) & p_{11}(t_1) \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} 1 - p_{01}^{(1)} & p_{01}^{(1)} \\ p_{10}^{(1)} & 1 - p_{10}^{(1)} \end{array} \right\|, \quad (7)$$

что приводит к системе нелинейных уравнений относительно g_1 и g_2 :

$$\left. \begin{aligned} \left(p_{00}^{(0)} - \frac{g_2}{g_1 + g_2}\right) e^{-(g_1 + g_2)t} + \frac{g_2}{g_1 + g_2} &= p_{00}^{(1)}; \\ \left(p_{11}^{(0)} - \frac{g_1}{g_1 + g_2}\right) e^{-(g_1 + g_2)t} + \frac{g_1}{g_1 + g_2} &= p_{11}^{(1)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Эта система допускает точное решение, которое мы приводим, опуская выкладки:

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= -\frac{1}{t_1} - \frac{p_{11}^{(1)} - p_{11}^{(0)} \frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}}{1 - \frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}} \ln \frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}; \\ g_2 &= -\frac{1}{t_1} - \frac{p_{00}^{(1)} - p_{00}^{(0)} \frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}}{1 - \frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}} \ln \frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь $p_{\text{ош}}^{(1)} = p_{01}^{(1)} + p_{10}^{(1)}$; $p_{\text{ош}}^{(0)} = p_{01}^{(0)} + p_{10}^{(0)}$ — суммарные вероятности ошибок при данной и предыдущей проверках.

Подставляя эти значения g_1 ; g_2 в (6), получим окончательно выражение для матрицы старения и всех ее элементов, в том числе и вероятностей $p_{10}(t)$; $p_{01}(t)$ для любого момента времени. Однако для прогноза на момент следующей проверки t_2 сами значения g_1 ; g_2 и вся матрица (6) не потребуются, если найти явные выражения для суммы $p_{\text{ош}}(t_2) = p_{01}(t_2) + p_{10}(t_2)$. Из (6) имеем для $p_{01}(t_2)$; $p_{10}(t_2)$ и их суммы $p_{\text{ош}}(t_2)$:

$$p_{01}(t_2) = 1 - \left(p_{00}^{(0)} - \frac{g_2}{g_1 + g_2} \right) e^{-(g_1 + g_2) t_2} - \frac{g_2}{g_1 + g_2};$$

$$p_{10}(t_2) = 1 - \left(p_{11}^{(0)} - \frac{g_1}{g_1 + g_2} \right) e^{-(g_1 + g_2) t_2} - \frac{g_1}{g_1 + g_2};$$

$$p_{\text{ош}}(t_2) = 1 - (p_{00}^{(0)} + p_{11}^{(0)} - 1) e^{-(g_1 + g_2) t_2} = 1 - (1 - p_{\text{ош}}^{(0)}) e^{-(g_1 + g_2) t_2}. \quad (10)$$

С другой стороны, складывая уравнения (8), найдем

$$(p_{00}^{(0)} + p_{11}^{(0)} - 1) e^{-(g_1 + g_2) t_1} + 1 = p_{00}^{(1)} + p_{11}^{(1)}.$$

Отсюда

$$e^{-(g_1 + g_2) t_1} = \frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}. \quad (11)$$

Возводя в степень t_2/t_1 и подставляя в (10), получим

$$p_{\text{ош}}(t_2) = 1 - (1 - p_{\text{ош}}^{(0)}) \left(\frac{1 - p_{\text{ош}}^{(1)}}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}} \right)^{t_2/t_1}. \quad (12)$$

Если промежутки времени между проверками равны, то $t_2 = 2t_1$ и

$$p_{\text{ош}}(t_2) = 1 - \frac{(1 - p_{\text{ош}}^{(1)})^2}{1 - p_{\text{ош}}^{(0)}}. \quad (13)$$

По этим формулам можно находить прогнозируемую вероятность суммарной ошибки для любых (по (12)) и равных (по (13)) промежутков времени между проверками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашев Г. А. и др. Экономические вопросы длительного хранения информации.— Труды ВНИИГМИ—МЦД, 1978, вып. 31, с. 24—43.
2. Афиногенов Л. П. Расчет периода регенерации в технических системах длительного хранения информации.— См. наст. сб., с. 74—80.
3. Афиногенов Л. П. Матричная модель старения при длительном хранении информации.— Труды ГГО, 1975, вып. 347, с. 13—29.

Г. А. Абашев, Л. П. Афиногенов, Г. Д. Горобьев

ЦИФРОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ НА МАГНИТНОЙ ПРОВОЛОКЕ

В практике автоматических метеорологических измерений возникает задача выдачи результатов на промежуточный технический носитель для последующего ввода их в ЭВМ. В качестве промежуточного носителя чаще всего используется перфолента. Однако по мере развития и совершенствования измерительных систем выявились определенные недостатки перфоленты как промежуточного носителя:

- максимальная скорость записи информации ограничена быстродействием перфораторов (до 150 байт/с) и в ряде случаев оказывается недостаточной;

- низкая плотность записи ведет к большому расходу перфоленты, которая является носителем однократного применения;

- устройства считывания перфолент работают недостаточно надежно.

Эти и другие недостатки обусловили разработку систем с выдачей данных на другой носитель — магнитную ленту. Обычно для записи и чтения применяются одно- и двухдорожечные ленточные и кассетные магнитофоны. Однако и в этих условиях общая плотность размещения информации на ленте ограничена из-за малой плотности дорожек. В связи с этим представляет интерес использование магнитной проволоки, которая позволяет существенно увеличить плотность и записывать на одну кассету (при тех же или меньших размерах) гораздо больший объем информации.

В данной работе приводится описание накопителя, разработанного на базе серийно выпускаемого проволочного магнитофона МН-63 со следующими основными характеристиками:

- носитель — магнитная проволока ЭИ-708 толщиной 50 мкм;
- продолжительность непрерывной записи на одной кассете 5,5 ч;
- время перемотки 34 мин;
- диапазон воспроизводимых частот 300—3000 Гц;
- питание — сеть переменного тока 50 Гц, 127/220 В;
- потребляемая мощность — не более 75 В · А;
- вес 12 кг.

Метод записи

В настоящее время широко применяется запись по двум уровням намагничивания носителя с насыщением, что обеспечивает максимально возможную амплитуду сигнала при считывании и относительно ее постоянство. Однако в данном случае был выбран трехуровневый метод записи с использованием положительной, от-

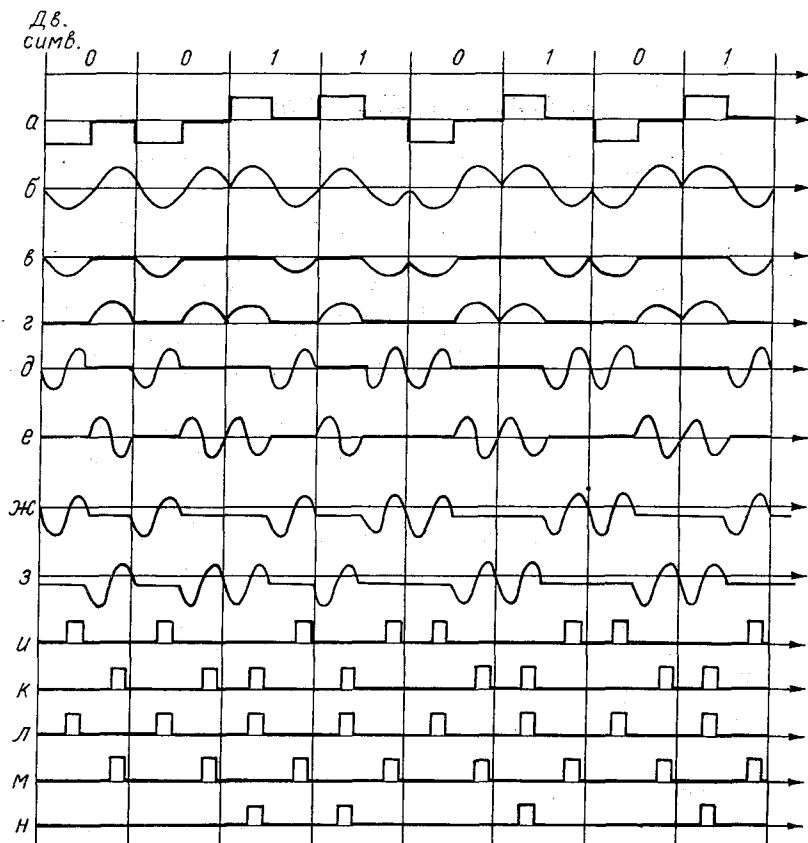


Рис. 1. Временные диаграммы записи/считывания.

рицательной и нулевой остаточной намагниченности. Главная причина такого выбора состоит в том, что при одноканальной записи основное значение приобретают условия синхронизации считывания. При записи по трем уровням задача обеспечения синхронизации решается очень просто. Кроме того, при считывании участков, где запись отсутствует, дефекты носителя (инородные включения, прилипшие на поверхности частицы) не вызовут появления ложных сигналов, так как эти участки имеют нулевую намагничен-

ность, и магнитное состояние головки воспроизведения в этом случае не меняется.

Выбранный метод записи состоит в том, что информация пишется на предварительно размагниченную (с помощью головки стирания) проволоку импульсами тока записи, причем двоичному «0» соответствует изменение намагниченности от нуля до отрицательной остаточной индукции и обратно, а двоичной «1» — от нуля до положительной остаточной индукции и обратно. Таким образом, при считывании «0» в головке воспроизведения появляется двупольный импульс с отрицательной первой полуволной, а при считывании «1» — с положительной. По способу распознавания этот метод можно назвать фазовым. Временные диаграммы сигналов записи и считывания приведены на рис. 1. Кроме отмеченной уже легкости синхронизации, к преимуществам этого метода следует отнести еще нечувствительность к колебаниям скорости протягивания носителя. К недостаткам метода относятся вдвое меньшая амплитуда сигнала воспроизведения (по отношению к двухуровневым методам записи) и снижение плотности записи (по сравнению с максимально возможной), обусловленное тем, что на каждый бит информации затрачивается два перепада сигнала носителя [1].

Устройство записи

На рис. 2 представлена блок-схема устройства записи, которая состоит из схемы управления, генератора тактов сдвига, ключей, регистра сдвига, делителя на 9, счетчика четности числа «1» и формирователя тока записи.

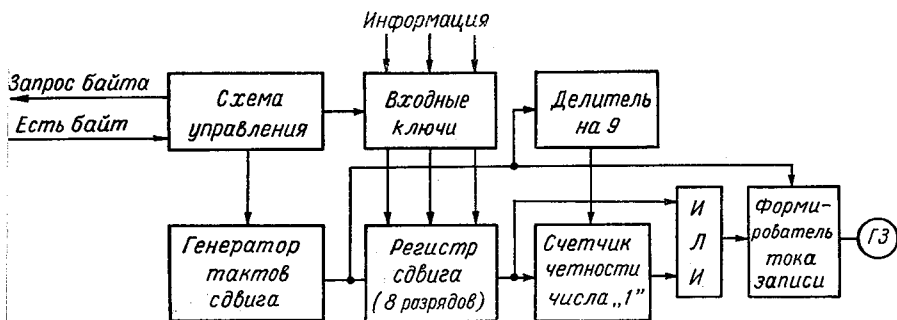


Рис. 2. Блок-схема устройства записи.

и формирователя тока записи. При включении устройства схема управления начинает непрерывно посылать сигналы запроса байта в источник данных. Когда получен ответ («есть байт»), схема управления засылает в регистр сдвига одновременно 8 разрядов входного байта через ключи и включает генератор тактов сдвига. Из регистра двоичные символы последовательно подаются на

формирователь тока записи в соответствии с методом записи, описанным выше. Формирователь включается по заднему фронту тактов сдвига на время ≈ 30 мкс, в результате чего на проволоку записываются импульсы, соответствующие значению двоичных разрядов (см. рис. 1 а). По мере вывода данных из регистра в счетчике четности производится подсчет числа «1». Если число «1» в байте оказалось четным, то в качестве 9-го разряда на проволоку записывается «1», в противном случае — «0». Таким образом, записанный 9-разрядный байт всегда содержит нечетное число двоичных единиц, что позволяет при считывании обнаруживать нечетное число ошибок. Частота генератора тактов сдвига выбрана так, что при непрерывной записи между байтами на проволоке остается промежуток с нулевой намагниченностью, который по длине эквивалентен записи 3 разрядов. Этот промежуток при считывании задает границы байтов.

Устройство воспроизведения

Устройство воспроизведения, блок-схема которого изображена на рис. 3, состоит из двух частей: схемы усиления и формирования сигналов воспроизведения и схемы логической обработки сигналов, преобразующей записанную информацию к исходному виду. Сигнал с головки воспроизведения амплитудой ≈ 10 мВ усиливается сначала предварительным усилителем до 60 мВ, а затем основным усилителем до ≈ 4 В. Предварительный усилитель с целью снижения относительного уровня шумов расположен на конце соединительного кабеля, подключаемого к магнитофону (о конструкции см. ниже). Полоса пропускания основного усилителя ограничена с целью подавления высокочастотных помех и повышения его устойчивости. Далее сигнал с выхода основного усилителя (см. рис. 1 б) с помощью диодов разветвляется в два канала: канал положительных импульсов и канал отрицательных импульсов. В каждом из каналов производится дифференцирование однополярного импульса (рис. 1 в, г) так, что в каждом из каналов опять образуется двуполярный сигнал (рис. 1 д, е). Такое преобразование позволяет четко различать соседние однополярные импульсы недифференцированного сигнала, «провал» между которыми при повышении плотности записи уменьшается.

Полученные двуполярные сигналы, в которые введено регулируемое (в каждом канале отдельно) отрицательное смещение, подаются на выходы усилителей-формирователей. Один из этих усилителей инвертирует сигнал с тем, чтобы обеспечить одинаковые в обоих каналах импульсы (рис. 1 з, ж) для дальнейшей обработки. Выходные сигналы усилителей с помощью триггеров Шмидта преобразуются в прямоугольные импульсы (рис. 1 и, к) и поступают в схему логической обработки. Триггеры Шмидта здесь играют роль пороговых устройств, предназначенных для отстройки от шума. Уровень сигнала, при котором происходит

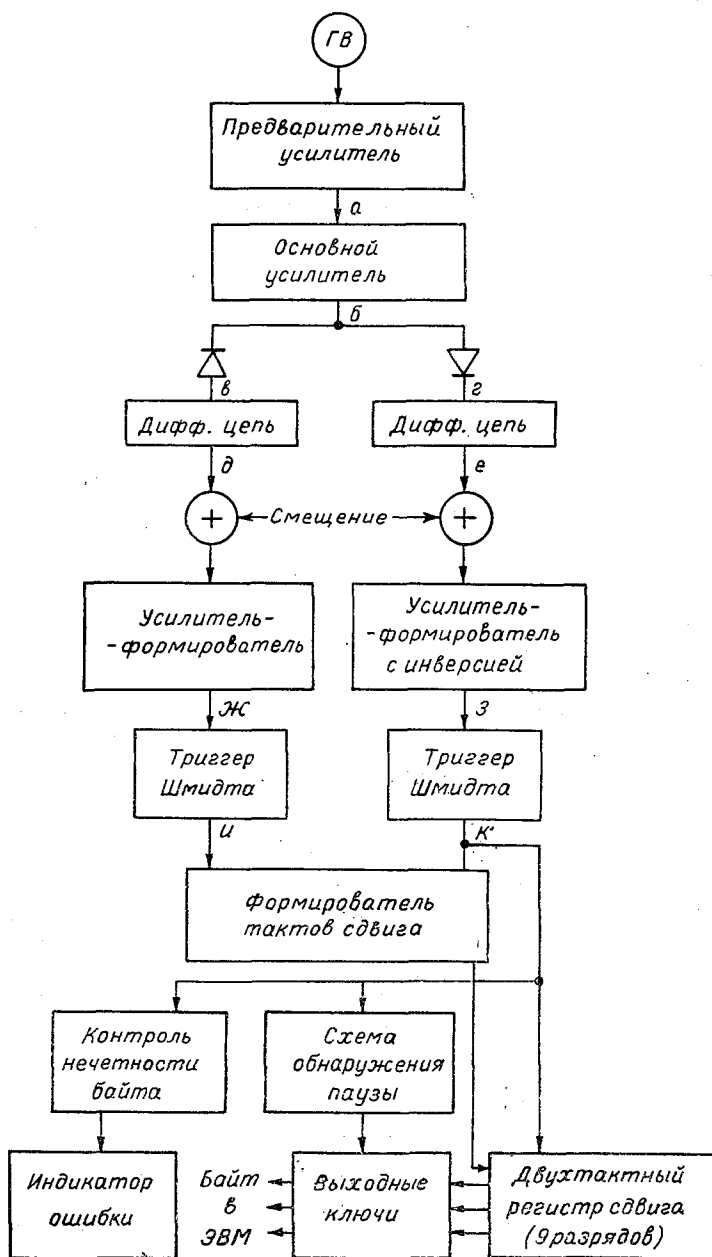


Рис. 3. Блок-схема устройства воспроизведения.

срабатывание триггеров, зависит от величины смещения, введенного в сигнал после дифференцирования.

Схема логической обработки состоит из формирователя тактов сдвига, 2-тактного регистра сдвига и выходных ключей. Кроме того, имеются схема обнаружения паузы между байтами, определяющая момент опроса регистра, и схема контроля нечетности байта и индикации ошибки. Формирователь тактов сдвига вырабатывает 2 такта на каждый воспроизведенный бит информации, причем информационная единица заносится в регистр в первом такте. Накопление последовательности битов в регистре происходит до тех пор, пока не поступит сигнал конца байта, вырабатываемый схемой обнаружения паузы, которая представляет собой обычный селектор скважности импульсов. В этот момент накопленный байт через выходные ключи выдается наружу, например в ЭВМ. В процессе приема входные биты поступают также на схему контроля нечетности числа единиц, выходной сигнал которой фиксируется индикатором ошибки по импульсу паузы. Если число двоичных «1» к моменту опроса схемы контроля оказалось четным, что свидетельствует об ошибочном воспроизведении байта, индикатор фиксирует ошибку. Последний может работать в двух режимах: запоминание первой же ошибки до сброса ее оператором и временное запоминание. Во втором случае ошибка сбрасывается в начале следующего байта.

Рассмотрим построение схемы формирователя тактов сдвига. По своей задаче она может быть выполнена на базе счетного триггера, формирующего на каждый нечетный входной сигнал 1-й такт сдвига, а на четный — 2-й такт. Однако такая схема беззащитна против помех. Один ложный сигнал, поступивший по любому входу, приведет к «обратной» работе схемы на протяжении всего байта. Поэтому в описываемом накопителе применен другой формирователь тактов, логическая схема которого приведена на рис. 4. Входные сигналы поступают на *S*-входы триггеров 1 и 2, которые при отсутствии входного воздействия удерживаются в состоянии «0» сигналом схемы «ИЛИ» 9. Триггеры 1, 2 выполнены так, что на их прямых выходах при нулевом сигнале на *R*-входах повторяется сигнал *S*-входа, поэтому появление входного сигнала на *S*-входе любого триггера вызывает снятие запрета на *R*-входах через схемы 6 и 9. Входной сигнал запоминается на соответствующем триггере, и одновременно с этим через схемы 4, 7 выдается 1-й такт сдвига. Схема 4 определяет условие для выдачи 1-го такта — разное состояние триггеров, а схема 7 укорачивает его до длительности входного сигнала. При поступлении второго входного импульса, который при правильной работе узла воспроизведения должен поступить на вход несработавшего триггера, состояние обоих триггеров совпадает, что является условием для выдачи через схему 5 2-го такта сдвига, который также укорачивается до длительности входного сигнала. По окончании 2-го такта через схемы 8, 9 триггеры сбрасываются, и схема вновь готова к приему следующего бита.

Описанная схема формирования тактов сдвига имеет преимущество по сравнению с формирователем на счетном триггере, поскольку она обладает избирательностью к порядку следования разнополярных импульсов. Из временной диаграммы (см. рис. 1) видно, что каждому биту в сигнале воспроизведения соответствует

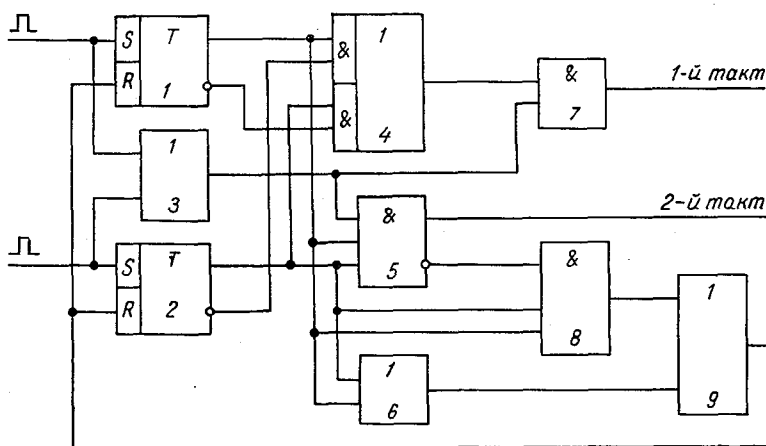


Рис. 4. Схема формирования тактов сдвига.

пара разнополярных импульсов. В случае, когда помеха нарушает это условие, схема при некоторых комбинациях полярности помехи и времени ее прихода по отношению к полезному сигналу продолжает правильно работать. Например, если помеха поступает между импульсами одного разряда и повторяет полярность первого из них, ошибки в работе устройства не произойдет.

Технические характеристики накопителя и организация его работы

Характеристики накопителя во многом определяются возможностями проволочного магнитофона, на базе которого спроектирован накопитель. Как указывалось выше, в этой разработке использован магнитофон типа МН-63.

Рассмотрим некоторые характеристики накопителя. Плотность записи составляет ≈ 5 бит/мм с учетом промежутков между байтами. Такая низкая плотность определяется в основном диаметром проволоки (50 мкм) и шириной зазора головки воспроизведения (15 мкм). Отметим, что эта плотность является предельной с точки зрения амплитуды воспроизводимого сигнала: дальнейшее увеличение плотности ведет к потере амплитуды и, как следствие, к увеличению вероятности ошибки при считывании.

Другой важной характеристикой является скорость записи, которая в данном случае составляет ≈ 60 байт/с при скорости протягивания проволоки 14,5 см/с. Емкость кассеты с проволокой

допускает непрерывную запись со скоростью 60 байт/с в течение 5,5 ч. Нужно сказать, что эта скорость записи является достаточной для большинства применений накопителя. Если все же требуется более быстрая запись, в накопителе предусмотрена работа со скоростью 500 байт/с, для чего используется режим «перемотка вперед».

Воспроизведение информации ведется всегда в режиме «перемотка вперед». Скорость выдачи байтов при этом составляет 500 байт/с, что позволяет «прочитать» полностью записанную кассету за ≈ 30 мин. Кроме высокой скорости выдачи, использование режима перемотки при воспроизведении выгодно еще и повышением амплитуды считываемого сигнала.

Конструктивно накопитель состоит из двух отдельных частей: магнитофона и блока дискретной обработки, соединенных кабелем. Как упоминалось выше, предварительный усилитель воспроизведения расположен в стакане, вмонтированном в соединительный кабель со стороны магнитофона.

Накопитель организован так, что при записи/считывании он может быть включен вместо соответствующих устройств, используемых в качестве носителя перфоленты. При записи накопитель подключается к источнику данных вместо перфоратора, например типа ПЛ-80. При этом накопитель вырабатывает серию тактовых аналогично перфоратору, по которому происходит подготовка и передача информации из источника данных в накопитель. Как и в случае перфоратора, имеется возможность управления пуском — остановом накопителя. При воспроизведении записанной информации накопитель включается вместо устройства считывания перфоленты, например типа FS-1500 (или другого). Работа накопителя в режиме считывания аналогична работе перфосчитывателя за исключением скорости выдачи (500 байт/с вместо 1500). При обнаружении ошибки считывания накопитель может выдать вместо ошибочного байта специальный символ, не используемый в качестве информационного.

Заключение

Описываемое устройство может быть использовано для длительного накопления данных, представленных в виде 8-разрядных байтов, поступающих со скоростью 60 или 500 байт/с, и для ввода накопленных данных в ЭВМ. Конструкция накопителя позволяет включать его вместо перфоратора типа ПЛ-80 при регистрации данных и вместо перфосчитывателя типа FS-1500 (или другого аналогичного) при вводе информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашев Г. А. Анализ методов дискретной записи на магнитный носитель. — Труды ВНИИГМИ—МЦД, 1978, вып. 31, с. 54—63.

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ СХЕМ С ОДНОСТОРОННИМИ, ДВУСТОРОННИМИ СИММЕТРИЧНЫМИ И ОПТИМАЛЬНЫМИ ШКАЛАМИ

Нелинейность неравновесных схем с аналоговыми приборами на выходе обычно учитывается при градуировке измерительных схем и не приводит к погрешности измерений. Исключение составляют приборы с большой нелинейностью, когда снижение чувствительности в какой-либо точке диапазона приводит к уменьшению цены деления и снижению точности измерений. При использовании цифровой техники переградуировка измерительного прибора, стоящего в диагонали поста или на выходе измерительной схемы, связана с изменением логики работы цифровых устройств, т. е. приводит к необходимости разработки нового цифрового прибора в каждом конкретном случае. При малых сериях выпускаемых измерительных устройств это нерентабельно. Поэтому часто используются линейные цифровые приборы, а нелинейность схемы входит в погрешность измерений.

Выходной сигнал измерительной схемы (например, мостовой) близкими к линейным характеристикам (рис. 1, кривая А) описывается полиномом типа

$$U = a + b(t - t_p) + c(t - t_p)^2 + d(t - t_p)^3, \quad (1)$$

где t — переменный параметр, например температура, которая изменяется в пределах $t_1 \leq t \leq t_2$; t_p — значение параметра, при

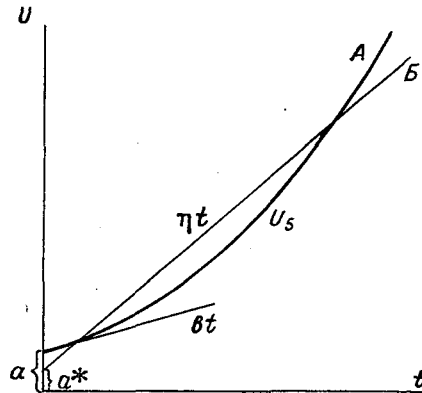


Рис. 1. Характеристика выходного сигнала измерительной схемы (А) и выходного сигнала линейного измерителя (Б).

котором $U=a$; оно очень близко к равновесному значению, когда $U=0$; U — выходной параметр измерительной схемы; a, b, c, d — коэффициенты степенного ряда, которые равны

$$a=U|_{t=t_p}; \quad b=\frac{\partial U}{\partial t}|_{t=t_p}; \quad c=\frac{\partial^2 U}{2\partial t^2}|_{t=t_p}; \quad d=\frac{\partial^3 U}{6\partial t^3}|_{t=t_p}; \quad (1)$$

a — начальный сдвиг градуировки при $t=t_p$, b — выходная чувствительность измерительной схемы при $t=t_p$.

Идеальная линейная зависимость (рис. 1, кривая Б) имеет вид

$$U_{ид}=a^*+\eta(t-t_p), \quad (2)$$

где η — чувствительность линейного измерительного прибора, установленного на выходе измерительной схемы, a^* — начальное смещение (обычно равное нулю), достигаемое небольшим сдвигом градуировки при $t=t_p$. Функция $U_{ид}=f(t)$ при правильном выборе a^* и η в нескольких точках (рис. 1) пересекает реальную кривую, описываемую полиномом (1).

Погрешность от нелинейности, т. е. отклонение реальной зависимости (1) от идеальной линейной (3), определяется выражением

$$\delta=U-U_{ид}=(a-a^*)+(b-\eta)(t-t_p)+c(t-t_p)^2+d(t-t_p)^3. \quad (3)$$

Коэффициенты этого ряда зависят от характеристик измерительного преобразователя, сопротивления резисторов моста, внутреннего сопротивления выходного прибора и т. д.

Задача данной работы — определить оптимальные значения (при заданном a^*) или a^* (при заданном a) и η как функции известных коэффициентов b, c, d , а также от диапазона измерения параметра t с целью уменьшения погрешности от нелинейности.

Решение подобной задачи в теории приближения [1] ведет к нормированию коэффициентов ряда относительно старшего (кубического) члена. Однако, если ряд сходится, а только в этом случае можно пренебречь всеми последующими членами ряда, старший член обычно меньше предыдущего и сильно изменяется при изменении параметров схемы.

Погрешность от нелинейности чаще определяется квадратичным членом. Поэтому целесообразнее нормировать функцию не относительно коэффициента при кубическом члене, а относительно коэффициента при квадратичном:

$$\delta=ct_n^2(K_a+K_b\alpha+\alpha^2+\tau_n\alpha^3)=ct_n^2K_\delta. \quad (4)$$

В этом выражении введены безразмерные коэффициенты:

$$K_a=\frac{a-a^*}{ct_n^2}; \quad K_b=\frac{b-\eta}{ct_n}; \quad \tau_n=\frac{dt_n}{c}; \quad \alpha=\frac{t-t_p}{t_n}, \quad (5)$$

где $t_n=\psi(t_2-t_1)$, коэффициент ψ может быть равен $+1$ или -1 . Кроме того, $\alpha_2-\alpha_1\equiv 1$ (α_1 и α_2 — коэффициенты при t_1 и t_2 соответственно).

ответственно). Значение τ_{Π} положительно, если d/c и t_{Π} имеют одинаковые знаки, и отрицательно, если знаки разные. Величины δK_{δ} зависят от α и при некоторых α_m достигают максимальных значений ($\delta_m, K_{\delta m}$).

Наибольший интерес представляет диапазон $-1 < \tau_{\Pi} < +1$, когда кубичный член меньше квадратичного.

Методом последовательных приближений или путем расчета конкретных вариантов общей теории [1] могут быть получены безразмерные коэффициенты (6), которые обеспечат минимальную погрешность от нелинейности при определенном τ_{Π} . Одновременно могут быть определены точки диапазона, в которых погрешности

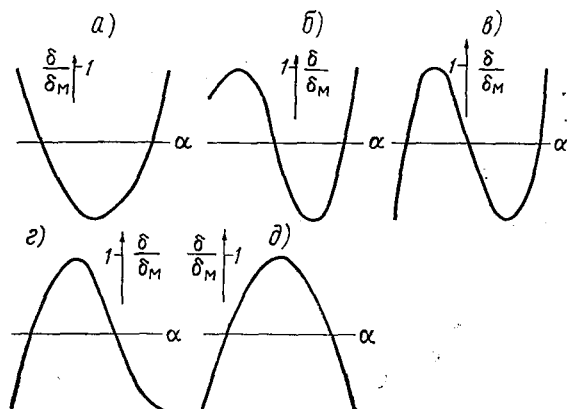


Рис. 2. Основные типы зависимости нормализованной погрешности от нелинейности (δ/δ_m) от нормализованного параметра α .

максимальны («максимальные» точки: $\alpha_{m1}, \alpha_{m2}, \alpha_{m3}, \alpha_{m4}$), и точки, где погрешности равны нулю («нулевые» точки: $\alpha_{01}, \alpha_{02}, \alpha_{03}$). Безразмерные коэффициенты определяют и тип зависимости $\delta = f(\alpha)$, которые примеры которой приведены на рис. 2.

Начальное смещение, чувствительность прибора, максимальная абсолютная погрешность и величина t определяются из выражений:

$$\begin{aligned} a^* &= a - K_a c t_{\Pi}^2; \\ \delta_m &= K_{\delta m} c t_{\Pi}^2; \\ \eta &= b - K_{\delta} c t_{\Pi}; \\ t &= t_p + \alpha t_{\Pi}. \end{aligned} \quad (7)$$

Через безразмерные коэффициенты может быть определена и относительная погрешность измерений

$$\delta_{\text{м от}} = \frac{\delta_m}{\eta t_{\Pi}} = \frac{K_{\delta m} c t_{\Pi}}{b - K_{\delta} c t_{\Pi}} \approx \frac{K_{\delta m} c t_{\Pi}}{b}, \quad (8)$$

которая в основном интересует разработчиков приборов.

Рассмотрим три варианта шкал измерительных схем, различающихся по точке расположения равновесия относительно измеряемого диапазона:

1. Односторонняя шкала, когда один из пределов измеряемого диапазона совпадает с точкой равновесия измерительной схемы.

2. Двусторонняя симметричная шкала, когда равновесная точка находится в середине измеряемого диапазона.

3. Оптимальная шкала, когда расположение точки равновесия диктуется только требованием уменьшения до минимума погрешности от нелинейности.

Полученные теоретические выражения сведены в табл. 1 для односторонней шкалы и в табл. 2 для симметричной и оптимальной шкал. Кроме того, результаты расчетов представлены на рисунках (рис. 3—8) и в виде табл. 3—5. В таблицах для каждого варианта даются значения безразмерных коэффициентов, а также нулевые и максимальные точки.

Для односторонней шкалы безразмерные коэффициенты зависят от отношения d/c , разности $t_2 - t_1$, а также от того, какой предел измеряемого диапазона совпадает с точкой равновесия t_2 ($t_1 < 0$) или t_1 при $t_2 > 0$. При введении коэффициента ψ безразмерные коэффициенты для односторонней шкалы перестают зависеть от места расположения точки равновесия. Величина $\psi = +1$, если t_p совпадает с минимальной границей измеряемого диапазона ($t_2 > 0$; $t_1 = 0$) и $\psi = -1$ — если с максимальной ($t_2 = 0$, $t_1 < 0$). Вид функции $\delta = f(\alpha)$ зависит только от τ_{π} . При больших положительных τ_{π} функция $\delta = f(\alpha)$ имеет параболический характер с максимальным δ в начале, конце и посередине ($\alpha_{m2}^{od} = 0,54 \pm 0,04$) шкалы (рис. 2 а). Функция δ равна нулю при $\alpha_{01}^{od} = 0,17 \pm 0,02$ и $\alpha_{02}^{od} = 0,87 \pm 0,02$ (рис. 3 а).

Коэффициенты $K_{\delta m}$, α_m , α_0 положительны при всех τ_{π} . Коэффициент максимальной погрешности $K_{\delta m}$ линейно уменьшается с уменьшением τ_{π} . При этом коэффициент K_a , определяющий начальное смещение, тождественно равен $K_{\delta m}$ (рис. 4). Коэффициент K_b растет с уменьшением τ_{π} таким образом, чтобы их сумма оставалась постоянной и равной 1,0. При положительных τ_{π} погрешность от нелинейности здесь в 8 раз меньше, чем в «исходном» варианте, когда в (4) $a = a^*$ и $b = \eta$ и погрешность от нелинейности определяется третьим и четвертым слагаемыми.

При τ_{π} , отрицательном в пределах от 0 до $-0,5$, характер зависимостей безразмерных коэффициентов от τ_{π} не изменится. Характерно, что коэффициент максимальной погрешности $K_{\delta m}$ продолжает уменьшаться до минимального значения, равного 0,02 при

$\tau_{\pi} = -\frac{2}{3}$. При τ_{π} меньше $-0,5$ меняется характер функции $\delta = f(\alpha)$. Один из максимумов отходит от левой границы диапазона, на который погрешность становится меньше максимальной (рис. 2 б). Погрешность на этом пределе при уменьшении τ_{π} сначала достигает нулевого уровня ($\tau_{\pi} = -0,63$), а затем рас-

Формулы безразмерных коэффициентов для односторонней шкалы

Пара-метр	$-\infty < \tau_n \leq -1$	$-1 \leq \tau_n \leq -\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3} \leq \tau_n \leq -\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2} \leq \tau_n \leq 0$	$0 \leq \tau_n < \infty$
K_δ	$\frac{(3 \tau_n +2)}{216} \times$ $\times \left\{ K^2 \left[\left(1 + \frac{3}{K^2} \right)^{3/2} - 1 \right] + 9 \right\}$	$\frac{(3\tau_n+1)^3}{108\tau_n^2}$	$\frac{1}{108\tau_n^2}$	$\frac{3 \tau_n +2}{216} \times$ $\times \left\{ K^2 \left[\left(1 + \frac{3}{K^2} \right)^{3/2} - 1 \right] + 9 \right\}$	$\frac{1}{8} (1 + 1,54\tau_n)$
K_a	$\frac{3 \tau_n +2}{216} \times$ $\times \left\{ K^2 \left[\left(1 + \frac{3}{K^2} \right)^{3/2} - 1 \right] + 9 \right\}$	$\frac{1}{108\tau_n^2} - \frac{3\tau_n+2}{12\tau_n}$	$\frac{1}{108\tau_n^2}$	$\frac{3 \tau_n +2}{216} \times$ $\times \left\{ K^2 \left[\left(1 + \frac{3}{K^2} \right)^{3/2} - 1 \right] + 9 \right\}$	$\frac{1}{8} (1 + 1,54\tau_n)$
K_b	$-(1 + \tau_n)$	$\frac{1}{4\tau_n} - \frac{3\tau_n+2}{4}$	$\frac{1}{4\tau_n}$	$-(1 + \tau_n)$	$-(1 + \tau_n)$
α_{M1}	0	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2\tau_n}$	$\frac{1}{6\tau_n}$	$\frac{1}{2} + \frac{K}{6} \left(\sqrt{1 + \frac{3}{K^2}} - 1 \right)$	$\frac{7\tau_n+4}{12\tau_n+8}$
α_{M2}	$\frac{1}{2} + \frac{K}{6} \left(\sqrt{1 + \frac{3}{K^2}} - 1 \right)$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{6\tau_n}$	$\frac{1}{2\tau_n}$	1	1
α_{M3}	1	1	0	0	0
α_{01}	См. рис. 3	$-0,866 - 0,622/\tau_n$ $-0,718 \leq \tau_n \leq -0,667$	$-0,0446(\tau_n)^{-1}$	См. рис. 3	См. рис. 3
α_{02}	См. рис. 3	$-1/3\tau_n$	$-(3\tau_n)^{-1}$	См. рис. 3	См. рис. 3
α_{03}	См. рис. 3	$0,866 - 0,0446(\tau_n)^{-1}$	$-0,622(\tau_n)^{-1}$	См. рис. 3	См. рис. 3

Примечания: 1. $K=3+\frac{\tau_n}{\tau_n}$. 2. Коэффициенты K_a, K_b, α_m при $\tau_n < -5$ и $-\frac{1}{3} < \tau_n < 0$ могут быть рассчитаны приближенно по варианту $0 \leq \tau_n < \infty$. 3. Коэффициент $\alpha_{03} = -0,622 (\tau_n)^{-1}$ в диапазоне $0,67 \leq \tau_n \leq -0,622$.

Формулы безразмерных коэффициентов для симметричной и оптимальной шкал

Параметр	Симметричная шкала			Оптимальная шкала
	$-\infty < \tau_{\Pi} \leq -2$	$-2 \leq \tau_{\Pi} \leq 2$	$-0,8 < \tau_{\Pi} < 0,8$	$\tau_{\Pi} < 0$
$K_{\Delta \Pi}$	$\frac{(1 - 1,5\tau_{\Pi})^3}{108\tau_{\Pi}^2}$	$\frac{1}{108} \left\{ \frac{4}{\tau_{\Pi}^2} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(1 + \frac{3}{4} \tau_{\Pi}^2 \right)^{1/2} - 1 \right] + 9 \right\}$	$\frac{1}{8} + \frac{\tau_{\Pi}^2}{128}$	$\frac{(1 + 1,5\tau_{\Pi})^3}{108\tau_{\Pi}^2}$
K_a	$\frac{1}{108\tau_{\Pi}^2} + \frac{2 - 1,5\tau_{\Pi}}{24\tau_{\Pi}}$	$\frac{1}{108} \left\{ \frac{4}{\tau_{\Pi}^2} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(1 + \frac{3}{4} \tau_{\Pi}^2 \right)^{3/2} - 1 \right] - 18 \right\}$	$-\frac{1}{8} + \frac{\tau_{\Pi}^2}{128}$	$-\frac{1}{27\tau_{\Pi}^2} - \frac{1}{16}$
K_b	$0,25 + 0,25\tau_{\Pi}^{-1} - 0,187\tau_{\Pi}$	$-0,25\tau_{\Pi}$	$-0,25\tau_{\Pi}$	$K_{bc} = 0,333\tau_{\Pi}^{-1} -$ $-0,187\tau_{\Pi}$
α_{M1}	$0,25 - 0,5\tau_{\Pi}^{-1}$	$+0,5$	$+0,5$	$\alpha_{M1} = 0,5$
α_{M2}	$-0,25 - 0,167\tau_{\Pi}^{-1}$	$0,333\tau_{\Pi}^{-1} \left(\sqrt{1 + 0,75\tau_{\Pi}^2} - 1 \right)$	$\frac{\tau_{\Pi}}{8} \left(1 - \frac{1}{16}\tau_{\Pi}^2 \right)$	$\alpha_{M2} = +0,25$
α_{M3}	$-0,5$	$-0,5$	$-0,5$	$\alpha_{M3} = -0,25$
α_{01}	$0,433 - 0,622(\tau_{\Pi})^{-1}$ до $\tau_{\Pi} < -9,3$	См. рис. 8	См. рис. 8	$\alpha_{M4} = -0,5$ $+ 0,433$
α_{02}	$-\frac{1}{3\tau_{\Pi}}$	См. рис. 8	См. рис. 8	0
α_{03}	$-0,433 - \frac{0,0447}{\tau_{\Pi}}$	См. рис. 8	См. рис. 8	$-0,433$
α_{01}				$0,5 - \frac{1}{3\tau_{\Pi}}$
α_{02}				$\frac{1}{1}$

Таблица 3

Численные значения безразмерных коэффициентов для односторонней шкалы

τ_{Π}	$K_{\delta M}^{OD}$	K_a^{OD}	K_b^{OD}	α_{M1}^{OD}	α_{M2}^{OD}	α_{M3}^{OD}	α_{01}^{OD}	α_{02}^{OD}	α_{03}^{OD}
100	19,37	19,37	-101	0,582	1	0	0,200	0,884	—
10	2,05	2,05	-11	0,578	1	0	0,197	0,883	—
5	1,087	1,087	-6	0,574	1	0	0,193	0,881	—
2	0,510	0,510	-3	0,562	1	0	0,185	0,878	—
1,5	0,414	0,414	-2,5	0,558	1	0	0,181	0,877	—
1,0	0,318	0,318	-2,0	0,550	1	0	0,176	0,874	—
0,8	0,279	0,279	-1,8	0,545	1	0	0,173	0,873	—
0,6	0,240	0,240	-1,6	0,539	1	0	0,169	0,871	—
0,4	0,202	0,202	-1,4	0,531	1	0	0,164	0,867	—
0,2	0,164	0,164	-1,2	0,519	1	0	0,157	0,863	—
+0,1	0,144	0,144	-1,1	0,511	1	0	0,152	0,859	—
+0,03	0,131	0,131	-1,03	0,504	1	0	0,148	0,855	—
0,00	0,125	0,125	-1,00	0,500	1	0	0,146	0,853	—
-0,03	0,119	0,119	-0,97	0,496	1	0	0,143	0,851	—
-0,1	0,106	0,106	-0,90	0,485	1	0	0,139	0,846	—
-0,2	0,088	0,088	-0,80	0,465	1	0	0,131	0,833	—
-0,4	0,053	0,053	-0,6	0,392	1	0	0,106	0,762	—
-0,6	0,0257	0,0257	-0,42	0,278	0,833	0	0,074	0,555	—
-0,67	0,0208	0,0208	-0,375	0,250	0,75	0/1	0,067	0,500	0,933
-0,8	0,027	-0,027	-0,212	0,125	0,708	1	—	0,417	0,922
-1,0	0,074	-0,074	0	0	0,667	1	—	0,333	0,970
-1,5	0,168	-0,168	+0,5	0	0,623	1	—	0,255	0,898
-2,0	0,264	-0,264	+1,0	0	0,608	1	—	0,237	0,895
-5	0,841	-0,841	+4,0	0	0,587	1	—	0,212	0,888
-10	1,80	-1,80	+9,0	0	0,582	1	—	0,206	0,887
-100	19,12	-19,12	+99	0	0,577	1	—	0,201	0,885

Таблица 4

Численные значения безразмерных коэффициентов для симметричной шкалы

$ \tau_{\Pi} $	$K_{\delta M}^C$	K_a^C	K_b^C	α_{M1}^C	α_{M2}^C	α_{M3}^C	α_{01}^C	α_{02}^C	α_{03}^C
100	3,12	-0,063	-19,0	0,5	0,248	-0,255	0,433	-0,0033	-0,44
10	0,379	-0,071	-2,10	0,5	0,233	-0,30	0,429	-0,033	-0,495
5	0,228	-0,079	-1,137	0,5	0,217	-0,35	0,424	-0,067	—
2	0,148	-0,102	-0,500	0,5	0,167	-0,5	0,411	-0,167	—
1,5	0,140	-0,111	-0,375	0,5	0,142	-0,5	0,404	-0,214	—
1,0	0,132	-0,118	-0,25	0,5	0,107	-0,5	0,394	-0,266	—
0,8	0,130	-0,120	-0,20	0,5	0,091	-0,5	0,388	-0,286	—
0,6	0,128	-0,122	-0,15	0,5	0,071	-0,5	0,382	-0,306	—
0,4	0,127	-0,124	-0,10	0,5	0,049	-0,5	0,375	-0,324	—
0,2	0,125	-0,125	-0,05	0,5	0,025	-0,5	0,365	-0,340	—
0,1	0,125	-0,125	-0,025	0,5	0,012	-0,5	0,360	-0,347	—
0,0	0,125	-0,125	0,000	0,5	0,000	-0,5	0,350	-0,350	—

Численные значения безразмерных коэффициентов для оптимальной шкалы

τ_{Π}	$K_{\delta M}^{оп}$	$K_a^{оп}$	$K_b^{оп}$	$\alpha_1^{оп}$	$\alpha_2^{оп}$
-100	3,122	-0,0625	-18,74	0,503	-0,497
-50	1,562	-0,0625	-9,36	0,507	-0,493
-20	0,625	-0,0624	-3,72	0,517	-0,483
-10	0,312	-0,0621	-1,841	0,533	-0,467
-5	0,156	-0,0610	-0,870	0,567	-0,433
-3	0,094	-0,0584	-0,451	0,611	-0,389
-2	0,0625	-0,0533	-0,208	0,667	-0,333
-1,5	0,0468	-0,0461	-0,059	0,722	-0,278
-1,2	0,0375	-0,0368	+0,053	0,778	-0,222
-1,1	0,0344	-0,0319	+0,097	0,803	-0,197
-1,0	0,0312	-0,0255	+0,146	0,833	-0,167
-0,9	0,0281	-0,0168	+0,204	0,873	-0,127
-0,8	0,025	-0,0047	0,267	0,917	-0,083
-0,7	0,0218	+0,0130	0,346	0,977	-0,023
-0,67	0,0208	+0,0208	0,376	1,00	0,00
-0,6	0,0187	+0,067	0,442	1,055	+0,055
-0,4	0,0125	+0,169	0,758	1,333	+0,333
-0,2	0,0062	+0,862	1,63	2,167	+1,167

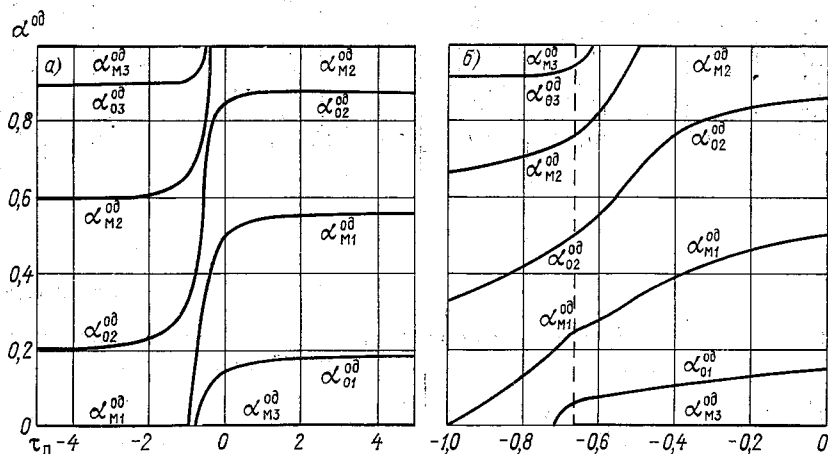


Рис. 3. Зависимость максимальных (α_{M1} , α_{M2} , α_{M3}) и минимальных (α_{01} , α_{02} , α_{03}) точек от величины нормализованного диапазона (τ_{Π}) при $-4 < \tau_{\Pi} < +4$ (а) и $-1 < \tau_{\Pi} < 0$ (б).

в другую сторону и при $\tau_{\Pi} = -\frac{2}{3}$ снова достигает максимума. Таким образом, в точке $\tau_{\Pi} = -\frac{2}{3}$ функция $\delta = f(\alpha)$ имеет четыре максимума (рис. 2 в), расположенных на границах диапазо-

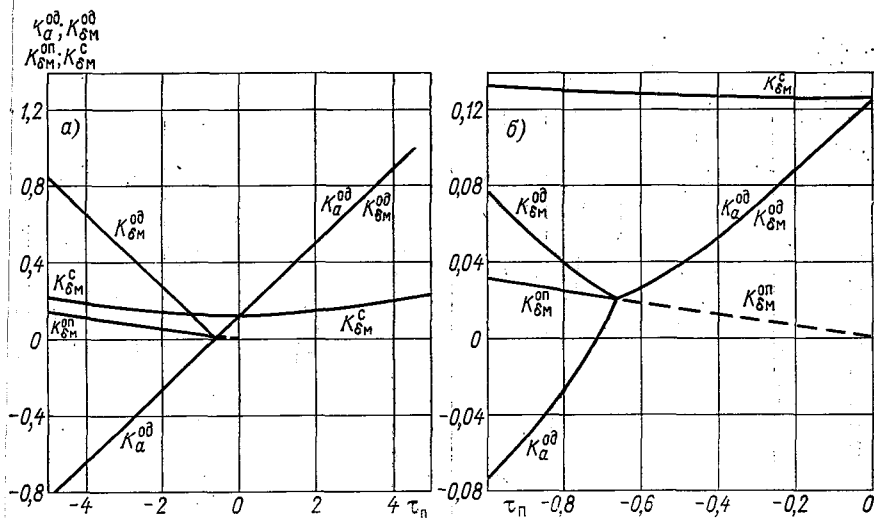


Рис. 4. Зависимость безразмерных коэффициентов K_a^{od} , $K_{\delta M}^{od}$, $K_{\delta M}^c$, $K_{\delta M}^{op}$ от величины нормализованного диапазона при $-5 < \tau_n < +5$ (а) и $-1 < \tau_n < 0$ (б).

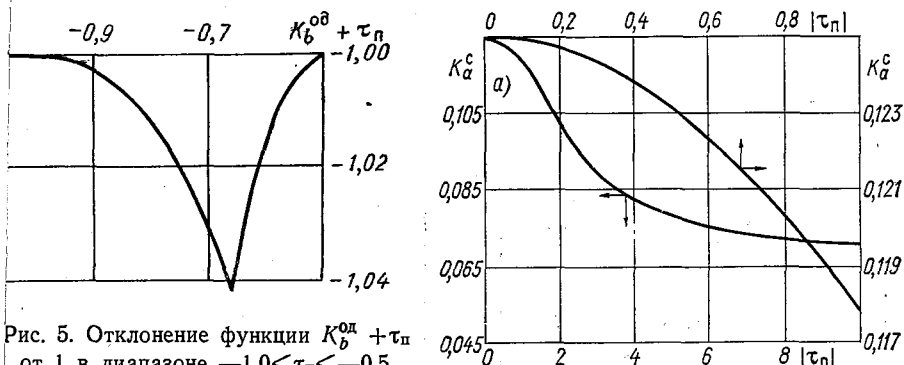


Рис. 5. Отклонение функции $K_b^{od} + \tau_n$ от 1 в диапазоне $-1.0 \leq \tau_n \leq -0.5$.

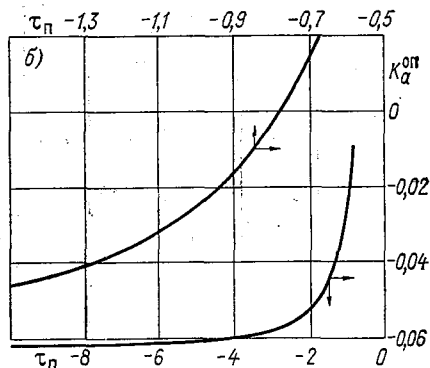


Рис. 6. Начальное отклонение в зависимости от нормализованного диапазона двусторонней симметричной (а) и оптимальной (б) шкал.

Стрелки на кривых здесь и далее указывают масштаб.

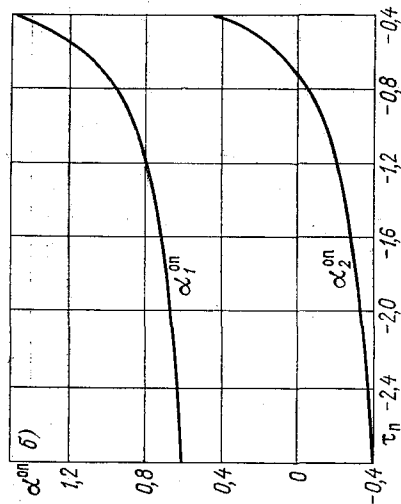
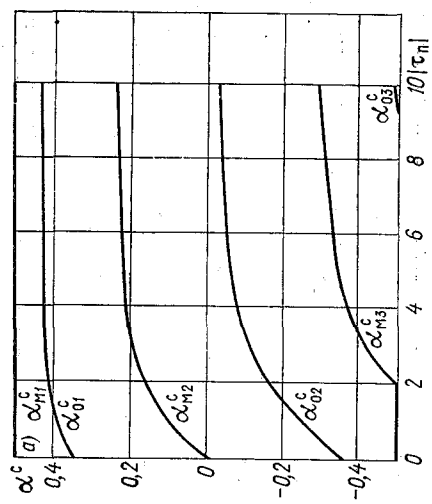


Рис. 8. Максимальные и минимальные (а)

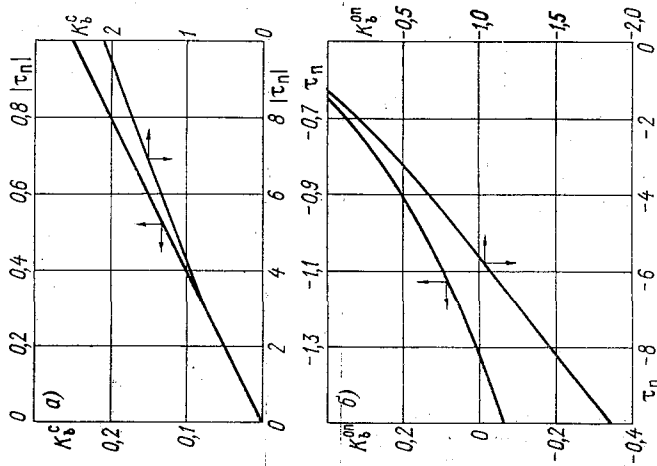


Рис. 7. Коэффициент измерения чувствительности для симметричной (а) и оптимальной (б) шкал в зависимости от нормализованного диапазона.

в, при $\alpha_{м2}^{од} = 0,25$ и $\alpha_{м3}^{од} = 0,75$. Погрешность от нелинейности этой точке в 48 раз меньше, чем в исходном варианте.

При $\tau_{\pi} < -\frac{2}{3}$ погрешность на правой границе диапазона начинает уменьшаться, при $\tau_{\pi} = -0,72$ пересекает нулевой уровень, при $\tau_{\pi} = -1$ достигает отрицательного максимума (рис. 2 з). При этом $K_{\delta м}^{од} \neq K_a^{од}$, коэффициент $K_a^{од}$ при $\tau_{\pi} < -0,72$ становится отрицательным, сумма $K_b^{од} + \tau_{\pi} \neq 1$ (рис. 5) до $\tau_{\pi} = -1$. При $\tau_{\pi} \leq -1$ два максимума снова совпадают с границами диапазонов (рис. 2 д), а третий лежит около 0,6. Нулевые точки находятся около 0,22 и 0,90.

В двусторонней симметричной шкале ($t_1 = -t_2$) множитель $= +1$, если $\frac{d}{c} > 0$, и $\psi = -1$, если $\frac{d}{c} < 0$. Характер зависимости $\delta = f(\alpha)$ меняется от параболического вида при $\tau_{\pi} = 0$ стремясь кстремальными значениями и двумя пересечениями нуля в точках $-0,353$ и $+0,353$ (рис. 2 д) к почти синусоидальному при $\tau_{\pi} \rightarrow \infty$ с четырьмя экстремумами ($-0,5$; $-0,25$; $+0,25$; $+0,5$) и тремя пересечениями нулевого уровня в точках $-0,437$, 0 и $+0,433$ (рис. 2 в). Второй экстремум появляется при $|\tau_{\pi}| > 2$ (рис. 2 з), третье пересечение нуля имеет место при $|\tau_{\pi}| > 9,3$.

За исключением диапазона $-1,3 < \tau_{\pi} < 0$, погрешность симметричной шкалы меньше погрешности односторонней. В диапазоне $-5 < \tau_{\pi} < +5$ коэффициент максимальной погрешности $K_{\delta м}^c$ (рис. 4) лежит в пределах $0,12-0,22$. При $\tau_{\pi} = 0$ $K_{\delta м}$ обоих вариантов шкал совпадают и равны $0,125$. Величины K_a^c и K_b^c даны на рис. 6 а и рис. 7 а.

Оптимальный вариант шкалы характеризуется минимальностью погрешности от нелинейности при определенном значении отношения $\frac{dt_{\pi}}{c}$. При всех τ_{π} вид зависимости $\delta = f(\alpha)$ одинаков (рис. 2 в), меняется только амплитуда погрешностей. Погрешность $\delta = f(\alpha)$ имеет четыре максимума ($-0,5$; $-0,25$; $+0,25$; $+0,5$) и три нулевых уровня ($0,433$; 0 ; $-0,433$).

Оптимальная шкала может быть получена только при $\tau_{\pi} < 0$ и при

$$c = -3 dt_{cp}, \quad (9)$$

где t_{cp} — середина измеряемого диапазона. При d/c положительном t_{cp} должно быть меньше нуля, а $\psi = -1$. При d/c отрицательном t_{cp} должно быть больше 0, а $\psi = +1$.

Коэффициент максимальной погрешности $K_{\delta м}^{оп}$ (рис. 4) уменьшается при $\tau_{\pi} \rightarrow 0$. Однако в диапазоне от $-\frac{2}{3}$ до 0 для соблюдения требования (9) точка равновесия должна находиться вне

диапазона измеряемого параметра, что может ухудшить общую погрешность измерений, хотя погрешность от нелинейности в этом диапазоне уменьшается в 100 раз и более по сравнению с исходной. Коэффициенты $K_a^{\text{оп}}$ и $K_b^{\text{оп}}$ даны на рис. 6 б и рис. 7 б; $K_a^{\text{оп}}$ равен нулю при $\tau_{\text{н}} = -0,78$ и стремится к $-0,0625$ при $\tau_{\text{н}} \rightarrow \infty$; коэффициент $K_b^{\text{оп}}$ пересекает ноль при $\tau_{\text{н}} = -1,33$ и линейно возрастает по абсолютной величине с ростом абсолютной величины

Расположение краев диапазонов (α_1 и α_2), рис. 8 б и, следовательно, точки равновесия схемы с оптимальной шкалой зависят от $\tau_{\text{н}}$. При $\tau_{\text{н}} \rightarrow -\infty$ $\alpha_1 = -0,5$, а $\alpha_2 \rightarrow +0,5$, т. е. $t_2 = -t_1$, что соответствует двусторонней симметричной шкале. При $-\infty < \tau_{\text{н}}$

$< -\frac{2}{3}$ шкала будет двусторонней, но несимметричной. При $\tau_{\text{н}}$

$= -\frac{2}{3}$ один из пределов диапазона совпадает с точкой равновесия,

что соответствует односторонней шкале. При $-\frac{2}{3} < \tau_{\text{н}} < \infty$ точка равновесия будет находиться вне диапазона измеряемого параметра.

Приведем пример расчета. Выходные характеристики высокоомного моста с термотранзистором в одном из плеч описываются выражением

$$U = a - (2,5 \text{ мВ/}^\circ\text{C})(t - t_p) - (4,5 \cdot 10^{-4} \text{ мВ/}^\circ\text{C}^2)(t - t_p)^2 - (9 \cdot 10^{-7} \text{ мВ/}^\circ\text{C}^3)(t - t_p)^3. \quad (1)$$

Положим, что требуется измерять температуру в пределах от -50 до $+50^\circ\text{C}$, т. е. в интервале 100°C . Если $t_p = -50^\circ\text{C}$, $\eta = b$, $a = 0$, то в исходном варианте погрешность от нелинейности будет равна 5 мВ или 2%. Используя изложенную выше теорию, можно уменьшить погрешность от нелинейности. При односторонней шкале и $t_p = t_1 = -50^\circ\text{C}$, $t_2 = +50^\circ\text{C}$ $\tau_{\text{н}} = 0,2$ и $K_{\delta_{\text{м}}}^{\text{оп}} = 0,16$. При $t_p = t_2 = +50^\circ\text{C}$ и $t_1 = -50^\circ\text{C}$ $\tau_{\text{н}} = -0,2$ и $K_{\delta_{\text{м}}}^{\text{оп}} = 0,087$. В последнем случае $\delta_{\text{мот}} = 0,15\%$ (0,4 мВ), что в 13 раз меньше исходного варианта и в два раза меньше, чем при $t_p = -50^\circ\text{C}$. Расположение $t_p = 0^\circ\text{C}$ приводит к двусторонней симметричной шкале и тогда $K_{\delta_{\text{м}}}^{\text{оп}} = 0,125$, что больше, чем для односторонней шкалы с $t_p = 50^\circ\text{C}$. В оптимальной схеме $K_{\delta_{\text{м}}}^{\text{оп}} = 6,2 \cdot 10^{-3}$ ($\delta_{\text{мот}} = 0,01\%$), что на порядок меньше погрешности односторонней шкалы и в 200 раз меньше исходного варианта. Однако температура равновесия в данном случае будет на 116°C выше максимальной температуры и составит 166°C . Такой сдвиг температуры равновесия может привести к большей погрешности, обусловленной другими причинами, например классом измерительного прибора по сравнению с погрешностью от нелинейности. В некоторых слу

даях приходится ставить прибор более высокого класса, лишь бы уменьшить погрешность от нелинейности.

Для односторонней шкалы с $t_p = +50^\circ\text{C}$ (табл. 1) чувствительность прибора должна быть равна $\eta = b - K_b^{\text{одст}} t_{\Pi} = -2,53 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$, а начальное смещение $a - a^* = K_a^{\text{одст}} t_{\Pi}^2 = -0,4 \text{ мВ}$. Вместо установления a (или a^*) и η можно приравнять нулю погрешность при температурах $+36,9$ и $-33,3^\circ\text{C}$ ($\alpha_{01} = 0,131$; $\alpha_{02} = 0,833$). Погрешности максимальны ($\pm 0,15^\circ\text{C}$) при температурах -50 , $+3,5$; $+50^\circ\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахиезер Н. И. Лекции по теории аппроксимации.— М.: Наука, 1965.— 107 с.
2. Каганов М. А., Фогельсон И. Б. Об оптимизации параметров номинальной линеаризованной характеристики измерительного преобразователя.— В кн.: Контрольно-измерительная техника. Львов, 1979, вып. 26, с. 76—81.
3. Фогельсон И. Б. Транзисторные термодатчики.— М.: Советское радио, 1972.— 128 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

При пульсационных измерениях турбулентных переносов нужны малоинерционные датчики пульсаций температуры, влажности и некоторых других метеорологических элементов. Известны и применяются для измерений температуры термосопротивления, термодиоды и термотриоды, различные типы резистивных преобразователей для измерения влажности [1]. Встречаются среди этих преобразователей и малоинерционные, пригодные для микрометеорологических измерений, однако они, как правило, нелинейны, причем эта нелинейность очень сильная: аналитическое выражение зависимости сопротивления или проводимости этих преобразователей от входных неэлектрических величин имеет вид экспоненты.

К пульсационным измерительным схемам обычно предъявляются кроме малой инерции, следующие требования:

1. Обеспечение постоянства чувствительности по диапазону изменений среднего значения входного процесса.

2. Автоматическое исключение в выходном напряжении среднего значения исследуемого процесса.

3. Фиксированная частота среза по низшим частотам.

Для измерения пульсаций влажности при помощи гигристого преобразователя, проводимость которого аппроксимирует зависимость

$$G = G_0 e^{B(r-r_0)},$$

где G_0 , G — проводимости при относительной влажности r_0 и r соответственно, B — коэффициент пропорциональности, в работе была предложена схема с операционным усилителем. Входные сопротивления усилителя являются проводимостью первичного преобразователя G и фиксированная проводимость G_0 , питаем

т противофазных источников напряжения u_r и u_0 . Усилитель схвачен обратной связью (сопротивление обратной связи R).

На рис. 1 изображены указанная принципиальная схема и ее структура. Особенность такой схемы с операционным усилителем состоит в том, что она позволяет измерять приращения проводимости первичного преобразователя в широком диапазоне ее изменений (на несколько порядков), а также при малых абсолютных значениях проводимости, когда сопротивление преобразователя превышает десятки мегом. Однако для поддержания при этом постоянства чувствительности в случае нелинейного преобразователя необходима регулировка параметров измерительной схемы. Ниже рассмотрены возможные способы такой регулировки.

На входе звена R токи $I_{\text{вх}}$ и I_6 включены в противофазе. Выходное напряжение измерительной схемы, как следует из структуры (рис. 1 а), равно

$$u_{\text{вых}} = (u_r G - u_0 G_6) R. \quad (2)$$

Проводимость G_6 нужна для балансировки измерительной схемы, т. е. такой настройки, чтобы при среднем значении измеряемого процесса, например влажности $r = r_0$, выходное напряжение было равно нулю, что имеет место при

$$u_r G_0 = u_0 G_6. \quad (3)$$

При малых отклонениях входной величины r от r_0 характеристика преобразователя $G(r)$ может быть линеаризована в окрестности G_0, r_0 , т. е.

$$G \approx G_0 + \frac{\partial G}{\partial r} (r - r_0). \quad (4)$$

Используя (3) и (4), получим

$$u_{\text{вых}} = \left[u_r G_0 + u_r \frac{\partial G}{\partial r} (r - r_0) - u_0 G_6 \right] R = u_r R \frac{\partial G}{\partial r} (r - r_0).$$

В частном случае первичного преобразователя с экспоненциальной характеристикой (1) $\frac{\partial G}{\partial r} \Big|_{r_0} = G_0 B$, откуда

$$u_{\text{вых}} \approx u_0 G_6 R B (r - r_0). \quad (5)$$

В работе [2] было предложено поддерживать неизменным произведение $G_6 R$ и тем самым обеспечить постоянную чувствительность измерительной схемы к пульсациям входной

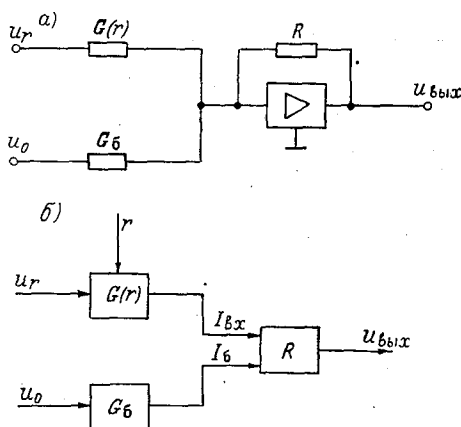


Рис. 1. Измерительная схема с дистанционной ручной балансировкой.

а — принципиальная схема, б — структурная.

неэлектрической величины $r = r_0$. Этот способ обеспечения постоянства чувствительности неудобен тем, что нужно изменять в процессе работы устройства одновременно значения сопротивления двух резисторов: G_6 и R , сохраняя $G_6 R = \text{const}$.

Однако указанный способ поддержания постоянства чувствительности не является единственно возможным. Из выражения (5) видно, что при соблюдении условия (3) за счет регулирования u_r при $u_0 = \text{const}$ выходное напряжение для первичного преобразователя с экспоненциальной характеристикой не зависит от напряжения питания преобразователя u_r . Это открывает возможность балансировать схему путем регулирования этого напряжения. Такой способ балансировки схемы удобнее по сравнению с регулировкой резисторов G_6 и R . Кроме того, открывается возможность дистанционной автоматической регулировки.

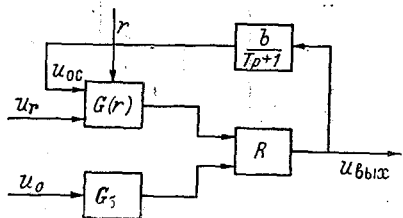


Рис. 2. Измерительная схема с автоматической балансировкой.

На рис. 2 изображена измерительная схема с параметрическим преобразователем, питаемым арифметической суммой напряжений u_r и напряжения, поступающего от цепи инерционной отрицательной обратной связи. Для этой схемы

$$u_{\text{вых}} = [(u_r - u_{0c}) G - u_0 G_6] R.$$

В статическом режиме на выходе устройства устанавливается некоторое напряжение $U_{\text{вых}}$, связанное с напряжением обратной связи соотношением $U_{0c0} = U_{\text{вых}0} b$ (b — статический коэффициент передачи цепи обратной связи). Определим начальное значение проводимости преобразователя G_0 именно для статического режима. Тогда, согласно (6),

$$U_{\text{вых}0} = [(u_r - U_{\text{вых}0} b) G_0 - u_0 G_6] R$$

или

$$U_{\text{вых}0} = \frac{(u_r G_0 - u_0 G_6) R}{1 + b G_0 R}.$$

Из (8) видно, что выходное напряжение в статике тем ближе к нулю, чем выше коэффициент усиления цепи обратной связи и чем меньше разность входных токов $u_r G_0 - u_0 G_6$. В частном случае ($u_r G_0 = u_0 G_6$), являвшемся условием баланса для схем, изображенной на рис. 1, $U_{\text{вых}0} = 0$.

Проанализируем работу устройства, изображенного на рис. 2, в общем случае, когда $u_r G_0 \neq u_0 G_6$. Для этого, используя операторную форму, представим напряжение обратной связи в виде суммы постоянной и переменной составляющих:

$$u_{0c} = U_{\text{вых}0} b + (u_{\text{вых}} - U_{\text{вых}0}) \frac{b}{Tp + 1}.$$

здесь p — оператор Лапласа, T — постоянная времени цепи обратной связи.

Подставим (9) в (6):

$$(u_{\text{вых}} - U_{\text{вых}_0}) \left(1 + \frac{bGR}{Tp + 1} \right) = [(u_r - U_{\text{вых}_0} b) G - u_0 G_0] R - U_{\text{вых}_0}.$$

используя (7) и имея в виду, что $G = G_0 + \Delta G$, а также вводя обозначение $\Delta u_{\text{вых}} = u_{\text{вых}} - U_{\text{вых}_0}$, получим

$$\Delta u_{\text{вых}} = \frac{(u_r - U_{\text{вых}_0} b) \Delta GR}{1 + \frac{bGR}{Tp + 1}}. \quad (10)$$

для первичного преобразователя с экспоненциальной характеристикой, линеаризованного в окрестности G_0 , r_0 , приращение

$$\Delta G \approx G_0 B (r - r_0),$$

куда с учетом (7)

$$\Delta u_{\text{вых}} \approx \frac{(u_0 G_0 R + U_{\text{вых}_0} B (r - r_0))}{1 + \frac{bGR}{Tp + 1}} \approx \frac{u_0 G_0 R B (r - r_0)}{1 + \frac{bGR}{Tp + 1}}. \quad (11)$$

После преобразований, выполненных с целью представить правую часть (11) в виде разности выходных сигналов безынерционного и инерционного звеньев, получим

$$\Delta u_{\text{вых}} \approx u_0 G_0 R B (r - r_0) \left(1 - \frac{bGR}{1 + bGR} \frac{1}{1 + \frac{T}{1 + bGR} p} \right). \quad (12)$$

При скачкообразном изменении на входе $r - r_0$ выходное напряжение сначала изменяется скачком с коэффициентом передачи $G_0 R B$, а затем спадает по экспоненте с эквивалентной постоянной

времени замкнутой системы $T_{\text{зкв}} = \frac{T}{1 + bGR}$ к значению, тем

более близкому к $U_{\text{вых}_0}$, чем лучше выполняется неравенство

$bGR \gg 1$. Постоянная времени $T_{\text{зкв}}$ зависит от коэффициента передачи разомкнутой системы bGR и поэтому выбор ее значения, разделенного нижней граничной частотой в исследуемом процессе r , практически осуществляется соответствующим выбором значения T . Так как $bGR \gg 1$, приходится значительно увеличить T сравнению с требуемым значением $T_{\text{зкв}}$.

Поскольку $G(r)$ меняется по диапазону изменений входного процесса r , для стабилизации $T_{\text{зкв}}$ необходимо обеспечить $bG = \text{const}$, что достигается введением в цепь обратной связи передаточного звена с коэффициентом передачи, обратно пропорциональным G .

На рис. 3 изображена структурная схема устройства, в обратной связи которого введено звено с переменным коэффициентом передачи $b = \frac{k_{oc}}{G(r)}$. Следует отметить, что указанное звено должно быть включено именно до фильтра, чтобы напряжение обратной связи u_{oc} не испытывало быстрых колебаний в такт с изменениями G .

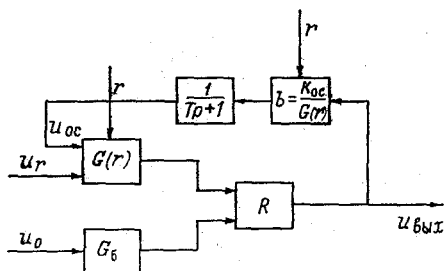


Рис. 3. Измерительная схема с автоматической балансировкой и фиксированной частотой среза по низшим частотам.

В статическом режиме $U_{00_0} = U_{вых_0} \frac{k_{oc}}{G_0}$; откуда, по аналогии с (7),

$$U_{вых_0} = \left[(u_r - U_{вых_0} \frac{k_{oc}}{G_0}) G_0 - u_0 G_0 \right] R. \quad (1)$$

В динамике напряжение обратной связи для рассматриваемой схемы (рис. 3) примет вид

$$u_{oc} = U_{вых_0} \frac{k_{oc}}{G_0} + (u_{вых} - U_{вых_0}) \frac{k_{oc}}{G} \frac{1}{Tp + 1}. \quad (1)$$

Подставляя (14) в (6) и используя (13), получим выражение для приращения выходного напряжения:

$$\Delta u_{вых} = \frac{\left(u_r - U_{вых_0} \frac{k_{oc}}{G_0} \right) \Delta G R}{1 + \frac{k_{oc} R}{Tp + 1}}. \quad (1)$$

Для преобразователя с экспоненциальной характеристикой

$$\Delta u_{вых} \approx [u_0 G_0 R B (r - r_0) + U_{вых_0}] \left(1 - \frac{k_{oc} R}{1 + k_{oc} R} \frac{1}{1 + \frac{Tp}{1 + k_{oc} R}} \right). \quad (1)$$

Таким образом, пульсационная измерительная схема, выполненная по структуре, изображенной на рис. 3, имеющая в обратной связи звено с переменным коэффициентом передачи, в случае

применения первичного параметрического преобразователя с экспоненциальной характеристикой обладает следующими свойствами, вытекающими из анализа выражения (16):

1. Постоянство чувствительности к пульсациям измеряемой электрической величины $r - r_0$.

2. Автоматическое исключение в выходном напряжении составляющей, пропорциональной среднему значению r_0 исследуемого процесса.

3. Фиксированная частота среза по низким частотам $f_H = \frac{1}{T_{\text{экв}}} = \frac{1 + k_{\text{ос}} R}{T}$.

Последняя схема (рис. 3) отвечает требованиям, предъявляемым к автоматическим пульсационным датчикам, и может использоваться с различными полупроводниковыми первичными преобразователями (термисторами, гигристорами, фоторезисторами и др.), имеющими, как правило, экспоненциальную характеристику. Для исследовательских целей, когда заранее неизвестен спектр частот исследуемого входного процесса, может применяться схема разомкнутой обратной связи и ручной дистанционной балансировки при помощи напряжения u_r , питающего входной преобразователь. Чувствительность при этом может также регулироваться дистанционно пропорционально изменениям напряжения u_0 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афиногенов Л. П., Грушин С. И., Романов Е. В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы.— Л.: Гидрометеоздаг, 1977.— 319 с.

2. Романов Е. В. Полуавтоматический коррелятор для измерения вертикального турбулентного потока влаги.— Труды ГГО, 1972, вып. 292, с. 159—171.

Л. П. Афиногенов, Е. И. Плешкова, М. В. Попов

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА

Предварительные замечания

Акустический анемометр, о котором пойдет речь в данной статье, описан в [1—3]. Напомним вкратце принцип действия прибора. Отличительной особенностью анемометра является то, что его акустическая измерительная система реализует временной (фазовый) способ выявления времени запаздывания акустического сигнала, а измерение этого запаздывания производится по схеме частотной системы. Такой принцип работы обеспечивает ряд существенных преимуществ как перед обычными фазовыми (временными), так и перед частотными анемометрами.

В задачу статьи входит анализ составляющих инструментальной погрешности анемометра, оценка суммарной погрешности,хождение погрешности определения $|v|$ и φ по данным двух анемометров. Помимо оценки возможной точности анемометр подобного типа, проведенный анализ позволяет высказать рекомендации по улучшению характеристик прибора.

Для выявления отдельных составляющих погрешности и вывода соответствующих формул на рис. 1 дается упрощенная структурная схема анемометра.

Генератор $G1$ периодически посылает на излучатель I через ключ K прямоугольные импульсы с высокочастотным заполнением от генератора G . Узлы $УФ1$ и $УФ2$ усиливают и формируют поступающие с приемников $П1$ и $П2$ сигналы. Триггеры $Tг1$ и $Tг2$ опракидываются передним фронтом сигнала посылки на излучатель, возвращаются в исходное состояние передними фронтами принятых сигналов. Сигналы с выходов триггеров открывают ключи $K1$ и $K2$ для прохождения частоты f_2 от генератора $G2$ в счетчики $Сч1$ и $Сч2$, имеющие одинаковую емкость. Когда в процессе счета триггер на выходе счетчика устанавливается в состояние «1», запирающий вход соответствующего ключа поступает сигнал

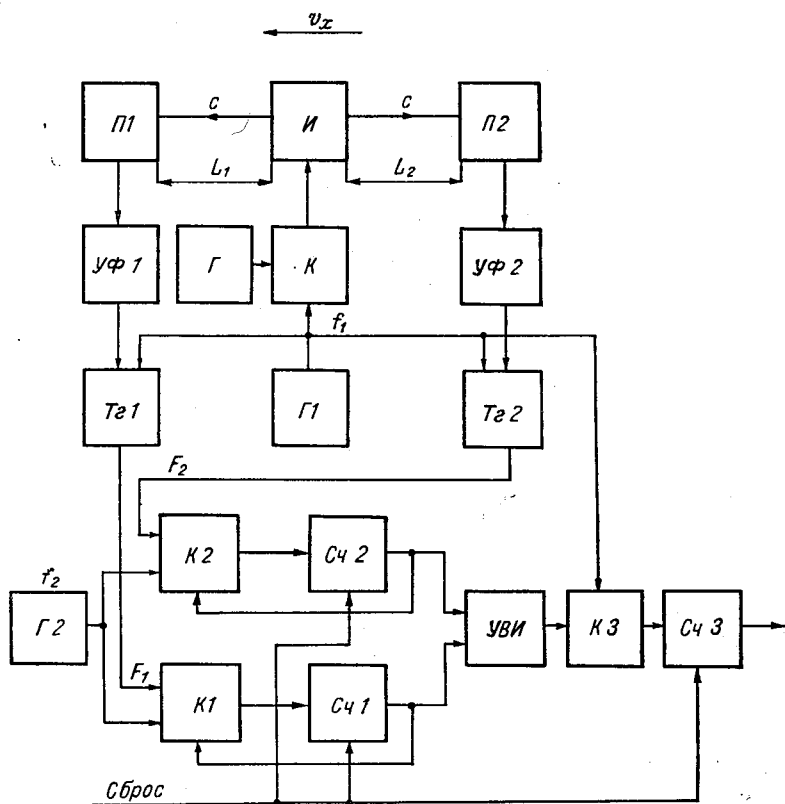


Рис. 1. Структурная схема анемометра.

счет в данном счетчике прекращается. Устройство выявления интервала УВИ определяет разницу во времени Δt появления выходных сигналов счетчиков Сч1 и Сч2:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{N_0}{f_1 f_2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right), \quad (1)$$

где t_1 , t_2 — время счета каждого из счетчиков; $N_0 = 2^n$ — емкость счетчиков (n — число разрядов); τ_1 , τ_2 — времена пробега акустического сигнала от излучателя до каждого из приемников:

$$\tau_1 = \frac{L_1}{c - v_x}, \quad \tau_2 = \frac{L_2}{c + v_x}, \quad (2)$$

L_1 , L_2 — расстояния от излучателя до приемников, c — скорость звука в неподвижном воздухе, v_x — составляющая скорости ветра вдоль оси анемометра.

Ключ $K3$ и счетчик $Cч3$ предназначены для измерения ΔL . Во время интервала Δt $K3$ открыт, и на вход $Cч3$ проходят импульсы частоты f_1 . Число импульсов, зафиксированное в $Cч3$:

$$N_3 = \Delta t f_1 = \frac{N_0}{f_2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right). \quad (5)$$

Подставив выражения (2) в (3) и учитывая равенства $b_1 = L_1 = L_2 = L$, получим

$$N_3 = 2 \frac{N_0}{f_2 L} v_x. \quad (6)$$

Отсюда следует окончательная рабочая формула:

$$v_x = \frac{f_2 L}{2 N_0} N_3. \quad (7)$$

Можно указать несколько источников инструментальной погрешности такого прибора:

- 1) отличие базовых расстояний L_1 и L_2 от расчетного значения;
- 2) дополнительные задержки сигналов, связанные с конечным временем нарастания фронтов,
- 3) нестабильность частоты f_2 ,
- 4) дискретность счета в счетчиках.

Рассмотрим составляющие погрешности в порядке их перечисления.

Погрешность от изменения длины базы $\Delta L v_x$

Ошибки в длине базы возникают при установке базового расстояния. При этом можно применить два метода установки базы.

По первому методу базы L_1 и L_2 устанавливаются независимо. Естественно, что каждая база может иметь ошибку относительно расчетной величины L , причем, вообще говоря, $L_1 \neq L_2$. Найдем абсолютную погрешность скорости, полагая $L_1 = L + \Delta L_1$ и $L_2 = L + \Delta L_2$.

Из формулы (5) следует

$$\Delta v_x = \frac{f_2 L}{2 N_0} \Delta N_3. \quad (8)$$

Используя выражения (2) и (3), получим

$$N_3 = \frac{N_0}{f_2} \left(\frac{c + v_x}{L_1} - \frac{c - v_x}{L_2} \right).$$

Найдем выражение для ΔN_3 в зависимости от ΔL_1 и ΔL_2 :

$$\Delta N_3 = \frac{\partial N_3}{\partial L_1} \Delta L_1 + \frac{\partial N_3}{\partial L_2} \Delta L_2 = \frac{N_0}{f_2} \left(- \frac{c + v_x}{L_1^2} \Delta L_1 + \frac{c - v_x}{L_2^2} \Delta L_2 \right). \quad (9)$$

Подставив (7) в (6) и учитывая, что ΔL_1 и $\Delta L_2 \ll L$ (при базе $= 20 \div 30$ см легко добиться $\Delta L_{1,2} \leq 0,5$ мм), получим выражение для погрешности скорости:

$$\Delta_1^I v_x \approx -\frac{c+v_x}{2} \frac{\Delta L_1}{L} + \frac{c-v_x}{2} \frac{\Delta L_2}{L}.$$

Очевидно, что знаки $\Delta L_{1,2}$ оказывают существенное влияние на величину погрешности. При этом максимальная абсолютная погрешность может достигать

$$\Delta_1 v_{x \text{ макс}} = \frac{c+v_x}{2L} |\Delta L_1| + \frac{c-v_x}{2L} |\Delta L_2| \approx \frac{c}{2} (|\Delta L_1| + |\Delta L_2|).$$

Второй метод установки базового расстояния дает значительно лучшие результаты. В этом случае устанавливается только одна база. Вторая база делается равной первой с помощью регулировки, обеспечивающей нулевое показание анемометра при отсутствии ветра. Обе базы, так же как и в первом случае, могут иметь ошибки относительно $L_{\text{расч}}$ и отличаться друг от друга. Однако это отличие определяется точностью настройки нуля прибора и весьма мало, так что практически $L_1 = L_2$. Найдем погрешность для этого метода установки исходя из формулы (5):

$$\Delta_1^{\text{II}} v_x = \frac{f_2 N_3}{2N_0} \Delta L.$$

Подставив выражение (4) для N_3 , получим

$$\Delta_1^{\text{II}} v_x = \frac{\Delta L}{L} v_x. \quad (8)$$

Относительная погрешность (%)

$$\frac{\Delta_1^{\text{II}} v_x}{v_x} = \frac{\Delta L}{L}. \quad (9)$$

Отсюда следует вывод: относительная погрешность, связанная с неточностью установки базового расстояния по второму методу, равна погрешности установки базы и постоянна по всему диапазону.

Проиллюстрируем вышесказанное примером. Пусть $L = 20,0$ см, $v_x = 5$ м/с. Базы устанавливаются по первому методу: $\Delta L_1 = -0,1$ мм, $\Delta L_2 = 0,1$ мм. Тогда

$$\left. \frac{\Delta_1^I v_x}{v_x} \right|_{\text{макс}} = \frac{340}{10} \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,2} \cdot 100 = 3,4\%.$$

Базы устанавливаются по второму методу: $\Delta L = 0,1$ мм. Тогда

$$\frac{\Delta_1^{\text{II}} v_x}{v_x} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,2} \cdot 100 = 0,05\%.$$

Таким образом, следует использовать именно второй метод установки базового расстояния, при котором данная составляющая погрешности становится пренебрежимо малой. Однако необходимо иметь в виду, что установка нуля прибора при регулировке должна контролироваться с достаточно высокой точностью.

Погрешность от дополнительных задержек сигнала $\Delta_2 v_x$

В связи с тем, что в анемометре используются высокочастотные пьезоэлектрические элементы (излучатель, приемники), работающие на частоте механического резонанса, огибающая принимаемого акустического сигнала имеет затянутые фронты. Это служит причиной появления дополнительных задержек $\Delta\tau$. Сигналы на выходах $Tg1$ и $Tg2$ удлиняются на величину $\Delta\tau$, что приводит к ошибкам измерения скорости ветра. В общем случае задержки в обоих каналах могут несколько различаться: $\Delta\tau_1 \neq \Delta\tau_2$. Запишем:

$$\tau'_1 = \tau_1 + \Delta\tau_1,$$

$$\tau'_2 = \tau_2 + \Delta\tau_2.$$

Тогда выражение (3) для N_3 будет иметь вид

$$N_3 = \frac{N_0}{f_2} \left(\frac{1}{\tau'_1} - \frac{1}{\tau'_2} \right)$$

и

$$\Delta N_3 = \frac{\partial N_3}{\partial \tau'_1} \Delta\tau_1 + \frac{\partial N_3}{\partial \tau'_2} \Delta\tau_2.$$

Учитывая, что $\Delta\tau$ достаточно мало по сравнению с τ (например, при $L = 0,2$ м и частоте резонанса $f = 250$ кГц $\tau \approx 500 \div 600$ мкс, а $\Delta\tau \approx 10 \div 20$ мкс), после дифференцирования получим

$$\begin{aligned} \Delta N_3 &= \frac{N_0}{f_2} \left(-\frac{\Delta\tau_2}{\tau_2^2} - \frac{\Delta\tau_1}{\tau_1^2} \right) = \frac{N_0}{f_2} \left[\frac{(c - v_x)^2}{L^2} \Delta\tau_2 - \frac{(c + v_x)^2}{L^2} \Delta\tau_1 \right] \approx \\ &\approx \frac{N_0}{f_2} \frac{c^2}{L^2} (\Delta\tau_2 - \Delta\tau_1). \end{aligned}$$

Подставив последнее выражение в формулу (6) для Δv_x , получим абсолютное значение погрешности

$$\Delta_2 v_x = \frac{c^2}{2L} |\Delta\tau_2 - \Delta\tau_1|. \quad (10)$$

Относительная погрешность

$$\frac{\Delta_2 v_x}{v_x} = \frac{c^2}{2L} \frac{|\Delta\tau_2 - \Delta\tau_1|}{v_x} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Рассмотрим пример. Пусть $L=0,2$ м, $v_x=5$ м/с, $\Delta\tau_2=15$ мкс, $\Delta\tau_1=13$ мкс. Тогда

$$\Delta_2 v_x = \frac{340^2}{2 \cdot 0,2} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \approx 0,58 \text{ м/с,}$$

$$\frac{\Delta_2 v_x}{v_x} = \frac{0,578}{5} \cdot 100 = 11,6 \%.$$

Эту погрешность можно в значительной степени уменьшить и даже свести к нулю. Для этого следует искусственно сдвинуть момент опрокидывания каждого из триггеров T_{21} и T_{22} относительно переднего фронта посылки на время, равное соответствующей $\Delta\tau$. Успешное решение этой задачи зависит от возможной точности компенсации и стабильности самих дополнительных задержек. Например, можно добиться компенсации в пределах стабильности $\Delta\tau$. Если нестабильность $\Delta\tau$ составляет 5%, то $|\Delta\tau_2 - \Delta\tau_1| \approx 0,75$ мкс. Это даст $\Delta_2 v_x = 0,22$ м/с и относительную погрешность для $v_x = 5$ м/с $\frac{\Delta_2 v_x}{v_x} = 4,4 \%$.

Из вышеизложенного следует, что дополнительные задержки вызывают сравнительно большую относительную погрешность, особенно значительную при малых скоростях ветра. Для ее уменьшения необходимо использовать элементы с высокой резонансной частотой или вообще применять широкополосные излучатель и приемники, а также вводить индивидуальную компенсацию дополнительных задержек в каждом канале.

Погрешность нестабильности частоты генератора Γ_2 $\Delta_3 v_x$

Погрешность, связанная с нестабильностью генератора, следует из формулы (5):

$$\Delta_3 v_x = \frac{N_3 L}{2N_0} \Delta f_2.$$

Подставив сюда выражение (4) для N_3 , получим

$$\Delta_3 v_x = \frac{\Delta f_2}{f_2} v_x. \quad (12)$$

Относительная погрешность

$$\frac{\Delta_3 v_x}{v_x} = \frac{\Delta f_2}{f_2} \cdot 100 \%. \quad (13)$$

Следовательно, относительная погрешность, зависящая от нестабильности генератора Γ_2 , равна относительной погрешности частоты генератора и не зависит от v_x .

При использовании LC-генератора можно считать $\Delta_3 v_x = 1\%$. В случае применения кварцевого генератора эта составляющая погрешности становится пренебрежимо малой.

Эта погрешность связана с ограниченной емкостью счетчиков (*Сч1*, *Сч2*, *Сч3*), осуществляющих преобразование аналогов сигналов (τ_1 , τ_2 , Δt) в дискретную форму путем счета импульсов фиксированной частоты. Особенность рассматриваемой схемы в этом смысле состоит в том, что счетчики *Сч1* и *Сч2*, обеспечивающие вместе с УВИ формирование интервала Δt , пропорционального скорости ветра v_x , заполняются «пачками». Число импульсов в каждой пачке приблизительно (с точностью, зависящей от частоты f_2) пропорционально соответствующему интервалу (τ_1 , τ_2), причем преобразование интервала в дискретный эквивалент (число импульсов в пачке) носит случайный характер вследствие несинхронности моментов начала и конца интервалов с импульсами генератора Γ . В процессе измерения эффект нестабильности

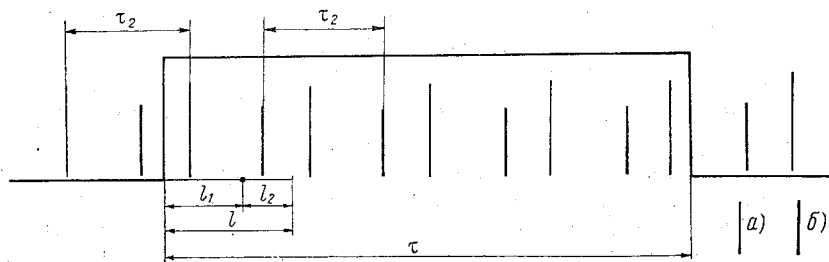


Рис. 2. Наложение интервала τ на последовательность импульсов частоты f_2 .

ности числа импульсов в пачке осредняется по большому числу посылок, и суммарная погрешность уменьшается. Это обстоятельство требует более детального анализа данной погрешности.

Найдем математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение числа импульсов в одной пачке. Обозначим $\left[\frac{\tau}{\tau_2} \right]$ целую часть числа $\frac{\tau}{\tau_2}$, $\left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\}$ — дробную ($\tau_2 = \frac{1}{f_2}$ — период частоты заполнения).

На рис. 2 изображена последовательность импульсов частоты f_2 и интервал τ . Отложим от начала интервала τ отрезок длины $l = \tau_2 = \frac{1}{f_2}$ и разделим его на две части: $l_1 = \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} \tau_2$ и $l_2 = \tau_2 - l_1 = \tau_2 \left(1 - \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} \right)$. Первый импульс последовательности с одинаковой вероятностью может попасть в любую точку отрезка l . Вероятность того, что он попадет на l_1 (случай а), равна

$$p_1 = \frac{l_1}{l} = \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\}.$$

При этом, как легко убедиться, на интервал τ попадет $n_1 = (n + 1)$ импульсов, где $n = \left[\frac{\tau}{\tau_2} \right]$.

Вероятность попадания первого импульса на отрезок l_2 (случай б)

$$p_2 = \frac{l_2}{l} = 1 - p_1 = 1 - \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\}.$$

и этом на интервал τ попадет $n_2 = n$ импульсов.

Математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение числа импульсов, попавших на интервал τ , равны:

$$\begin{aligned} M_n &= n_1 p_1 + n_2 p_2 = (n+1) \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} + n \left(1 - \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} \right) = \\ &= \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} + \left[\frac{\tau}{\tau_2} \right] = \frac{\tau}{\tau_2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_n &= (n+1 - M_n)^2 p_1 + (n - M_n)^2 p_2 = \left(n+1 - \frac{\tau}{\tau_2} \right)^2 \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} + \\ &+ \left(n - \frac{\tau}{\tau_2} \right)^2 \left(1 - \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} \right) = \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} \left(1 - \left\{ \frac{\tau}{\tau_2} \right\} \right), \end{aligned}$$

$$\sigma_n = \sqrt{D_n}.$$

Таким образом, математическое ожидание равно расчетному значению, а дисперсия может меняться от 0 до 0,25.

Нестабильность количества импульсов в пачке приводит тому, что число пачек, необходимых для заполнения счетчика емкостью N_0 при данной скорости ветра, колеблется. Возможное число пачек определяется следующим образом.

Для первого канала

$$V_{11} = N_{1 \text{ мин}} = \left[\frac{N_0}{n_1^{(1)} + 1} \right] + 1 \text{ с вероятностью } p_{11},$$

$$V_{12} = N_{1 \text{ мин}} + 1 \text{ с вероятностью } p_{12},$$

.....

$$V_{1k} = N_{1 \text{ мин}} + (k-1) = N_{1 \text{ макс}} = \left[\frac{N_0}{n_1^{(1)}} \right] + 1 \text{ с вероятностью } p_{1k},$$

если $\frac{N_0}{n_1^{(1)}+1}$ и $\frac{N_0}{n_1^{(1)}}$ не целые числа. В противном случае

$$N_{1 \text{ мин}} = \frac{N_0}{n_1^{(1)} + 1} = \left[\frac{N_0}{n_1^{(1)} + 1} \right], \quad N_{1 \text{ макс}} = \frac{N_0}{n_1^{(1)}} = \left[\frac{N_0}{n_1^{(1)}} \right].$$

Аналогично для второго канала. Среднее число пачек, заполняющих счетчики в каждом из каналов, равно:

$$N_{1 \text{ ср}} = \sum_{i=1}^{k_1} N_{1i} p_{1i},$$

$$N_{2 \text{ ср}} = \sum_{i=1}^{k_2} N_{2i} p_{2i}.$$

По расчету число пачек должно быть для каждого канала дующим:

$$N_{1 \text{ расч}} = \frac{N_0}{\tau^{(1)}/\tau_1}, \quad N_{2 \text{ расч}} = \frac{N_0}{\tau^{(2)}/\tau_2}.$$

Отметим, что возможен случай, когда $N_{\text{расч}} < N_{\text{мин}}$, поскольку $N_{\text{мин}} = \left[\frac{N_0}{\left[\frac{\tau}{\tau_2} \right] + 1} \right] + 1$.

Разность чисел пачек, заполняющих счетчики, пропорциональна скорости ветра. Расчетное значение разности равно

$$\Delta N_{\text{расч}} = N_{2 \text{ расч}} - N_{1 \text{ расч}} = \frac{N_0}{f_2} \left(\frac{1}{\tau^{(2)}} - \frac{1}{\tau^{(1)}} \right).$$

Разность средних значений N составляет

$$\Delta N_{\text{ср}} = N_{2 \text{ ср}} - N_{1 \text{ ср}} = \sum_{i=1}^{k_2} N_{2i} p_{2i} - \sum_{i=1}^{k_1} N_{1i} p_{1i}.$$

Погрешность в определении ΔN

$$\delta(\Delta N) = \Delta N_{\text{расч}} - \Delta N_{\text{ср}} = \delta A_2 - \delta A_1,$$

где

$$\delta A_2 = N_{2 \text{ расч}} - N_{2 \text{ ср}}, \quad \delta A_1 = N_{1 \text{ расч}} - N_{1 \text{ ср}}.$$

Величины δA_1 и δA_2 при данной конструкции (L) и параметрах (N_0, f_2) прибора зависят только от составляющей скорости ветра v_x , т. е. от точки диапазона, в которой производится измерение. Можно показать, что:

а) почти для всего диапазона, за исключением небольшого участка, охватывающего значение $v_x = 0$, $\delta A_1, \delta A_2$ можно рассматривать как независимые случайные величины (по отношению к случайному аргументу — значению v_x);

б) каждая из величин $\delta A_1, \delta A_2$ лежит в пределах $-1 < \delta A < 1$, поэтому абсолютное значение погрешности $\Delta N \approx \delta(\Delta N) < 2$.

Любое число пачек N_i между $N_{\text{макс}}$ и $N_{\text{мин}}$ состоит из m_1 паков ($n+1$) импульсов и m_2 пачек по n импульсов. Вероятность, что счетчик заполнится за N_i пачек, зависит от распределения m_1 и m_2 . Запишем

$$\begin{cases} m_1(n+1) + m_2 n \geq N_0, \\ m_1 + m_2 = N_i. \end{cases}$$

Отсюда можно найти предельные значения m_1 и m_2 для каждого N_i :

$$d_1 \leq m_1 \leq d_2,$$

где $d_1 = N_0 - N_i n$; $d_2 = N_0 - (N_i - 1) n$.

да

$$N_i - d_2 \leq m_2 \leq N_i - d_1.$$

я $N_{\text{макс}}$

$$d_1 = 0; \quad d_2 = N_0 - (N_{\text{макс}} - 1)n.$$

я $N_{\text{мин}}$

$$d_1 = N_0 - N_{\text{мин}}n; \quad d_2 = N_{\text{мин}}.$$

Вероятность того, что счетчик заполнится за N_i пачек,

$$p(N_i) = p(d_1 \leq m_1 \leq d_2).$$

Применив к данному случаю интегральную теорему Муавра—Пласа [4], можно найти

$$p(N_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Границы интегрирования a и b равны:

$$a = \frac{d_1 - N_i p_1}{\sqrt{N_i p_1 p_2}},$$

$$b = \frac{d_2 - N_i p_1}{\sqrt{N_i p_1 p_2}}.$$

Интеграл находится с помощью таблиц [5].

Определив все значения N_i и их вероятности, можно найти значения разности ΔN чисел пачек, заполняющих счетчики, и их вероятностные характеристики.

В табл. 1 и 2 приводятся данные расчета для анемометра, имеющего $L = 0,2$ м, $N_0 = 6 \cdot 2^{12}$, $\tau_2 = \frac{1}{f_2} = 4,1124$ мкс.

В табл. 1 указаны значения числа импульсов в пачке и их вероятности в обоих каналах, в табл. 2 — результаты определения $p(N)$, ΔN , $p(\Delta N)$, математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение ΔN .

Таблица 1

Распределение числа импульсов в пачке

м/с	n_1	$p_1^{(1)}$	$n_1 + 1$	$p_2^{(1)}$	n_2	$p_1^{(2)}$	$n_2 + 1$	$p_2^{(2)}$
I канал					II канал			
0	144	0,100	145	0,900	144	0,100	145	0,900
5	146	0,374	147	0,626	142	0,624	143	0,376
10	148	0,153	149	0,847	140	0,658	141	0,342
15	151	0,863	152	0,137	138	0,635	139	0,365
20	153	0,501	154	0,499	136	0,556	137	0,444
25	155	0,065	156	0,935	134	0,427	135	0,573
30	158	0,549	159	0,451	132	0,244	133	0,756
35	161	0,952	162	0,048	130	0,014	131	0,986
40	163	0,268	164	0,732	129	0,738	130	0,262
45	166	0,492	167	0,508	127	0,416	128	0,584
50	169	0,622	170	0,378	125	0,052	126	0,948

Числа пачек и их вероятностные характеристики

φx м/с	$\frac{N_{11} \text{ мин}}{p_{11}}$	$\frac{N_{12}}{p_{12}}$	$\frac{N_{13} \text{ макс}}{p_{13}}$	$\frac{N_{21} \text{ мин}}{p_{21}}$	$\frac{N_{22}}{p_{22}}$	$\frac{N_{23} \text{ макс}}{p_{23}}$	$\frac{\Delta N_{11}}{p_{11}}$	$\frac{\Delta N_{12}}{p_{12}}$	$\frac{\Delta N_{13}}{p_{13}}$
0	$\frac{170}{0,999997}$		$\frac{171}{3 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{170}{0,999997}$		$\frac{171}{3 \cdot 10^{-6}}$			
5	$\frac{168}{1-4,6 \cdot 10^{-20}}$		$\frac{169}{4,6 \cdot 10^{-20}}$	$\frac{172}{2,6 \cdot 10^{-43}}$	$\frac{173}{1-10^{-24}}$	$\frac{174}{1,7 \cdot 10^{-18}}$	$\frac{4}{2,6 \cdot 10^{-43}}$	$\frac{5}{1-4,6 \cdot 10^{-20}}$	$\frac{6}{1,7 \cdot 10^{-18}}$
10	$\frac{165}{0,00022}$	$\frac{166}{0,99985}$	$\frac{167}{0,00023}$	$\frac{175}{0,0058}$		$\frac{176}{0,9942}$	$\frac{10}{1,3 \cdot 10^{-6}}$		$\frac{11}{2,18 \cdot 10^{-4}}$
15	$\frac{162}{7,6 \cdot 10^{-98}}$		$\frac{163}{1-7,6 \cdot 10^{-98}}$	$\frac{177}{5,3 \cdot 10^{-17}}$	$\frac{178}{1-1,2 \cdot 10^{-16}}$	$\frac{179}{1,4 \cdot 10^{-17}}$	$\frac{15}{\approx 0}$	$\frac{16}{\approx 0}$	$\frac{17}{\approx 0}$
20	$\frac{160}{0,00523}$		$\frac{161}{0,99477}$	$\frac{180}{0,00798}$		$\frac{181}{0,99202}$	$\frac{20}{0,0417}$		$\frac{21}{5,2 \cdot 10^{-3}}$
25	$\frac{158}{0,99952}$		$\frac{159}{0,00048}$	$\frac{183}{1-1,5 \cdot 10^{-14}}$		$\frac{184}{1,5 \cdot 10^{-14}}$	$\frac{25}{0,99952}$		$\frac{26}{1,4 \cdot 10^{-14}}$
30	$\frac{155}{0,00466}$		$\frac{156}{0,99534}$	$\frac{185}{0,00287}$	$\frac{186}{0,99573}$	$\frac{187}{0,0014}$	$\frac{30}{13,4 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{31}{0,0046}$	$\frac{32}{6,5 \cdot 10^{-6}}$
35	$\frac{152}{0}$		$\frac{153}{1}$	$\frac{188}{0,94895}$	$\frac{189}{0,00055}$	$\frac{190}{0,0505}$	$\frac{36}{\approx 0}$	$\frac{37}{\approx 0}$	$\frac{38}{\approx 0}$
40	$\frac{150}{0,00135}$		$\frac{151}{0,99865}$	$\frac{190}{0,0037}$		$\frac{191}{0,9963}$	$\frac{40}{5 \cdot 10^{-6}}$		$\frac{41}{0,0013}$
45	$\frac{148}{1-10^{-28}}$		$\frac{149}{10^{-28}}$	$\frac{192}{0}$	$\frac{193}{1-4 \cdot 10^{-12}}$	$\frac{194}{1 \cdot 10^{-12}}$	$\frac{44}{0}$	$\frac{45}{1-4 \cdot 10^{-12}}$	$\frac{46}{10^{-12}}$
50	$\frac{145}{0}$		$\frac{146}{0}$	$\frac{196}{0}$		$\frac{197}{0}$	$\frac{51}{0}$		$\frac{52}{0}$

$\varphi, M/C$	$\frac{M/V21}{p_{21}}$	$\frac{M/V22}{p_{22}}$	$\frac{M/V23}{p_{23}}$	$\frac{M/V31}{p_{31}}$	$\frac{M/V32}{p_{32}}$	$\frac{M/V33}{p_{33}}$	$M_{\Delta N}$	$D_{\Delta N}$	$\sigma_{\Delta N}$
0							0	0	0
5				$\frac{3}{12 \cdot 10^{-63}}$	$\frac{4}{4,6 \cdot 10^{-20}}$	$\frac{5}{7,8 \cdot 10^{-38}}$	5-4,6·10 ⁻²⁰	4,6·10 ⁻²⁰	2,14·10 ⁻¹⁰
10	$\frac{9}{5,8 \cdot 10^{-3}}$		$\frac{10}{0,994}$	$\frac{8}{1,3 \cdot 10^{-6}}$		$\frac{9}{2,3 \cdot 10^{-3}}$	10,015	8,8·10 ⁻³	9,38·10 ⁻²
15				$\frac{14}{5,3 \cdot 10^{-17}}$	$\frac{15}{1-1,2 \cdot 10^{-16}}$	$\frac{16}{1,4 \cdot 10^{-17}}$	15-2,8·10 ⁻¹⁵	23·10 ⁻¹⁵	1,5·10 ⁻⁷
20				$\frac{19}{0,0079}$		$\frac{20}{0,987}$	19,923	1,7·10 ⁻²	0,13
25				$\frac{24}{0,00048}$		$\frac{25}{7,2 \cdot 10^{-18}}$	25	4,8·10 ⁻⁴	0,022
30				$\frac{29}{0,0029}$	$\frac{30}{0,991}$	$\frac{31}{0,0014}$	30,0007	0,0089	0,094
35				$\frac{35}{0,94895}$	$\frac{36}{0,00055}$	$\frac{37}{0,0505}$	35,082	0,192	0,438
40				$\frac{39}{0,0037}$		$\frac{40}{0,99495}$	39,9956	0,005	0,07
45				$\frac{43}{0}$	$\frac{44}{10^{-28}}$	$\frac{45}{1,6 \cdot 10^{-40}}$	45-1,4·10 ⁻¹⁰	0	0
50				$\frac{50}{0,9967}$		$\frac{51}{5,3 \cdot 10^{-4}}$	49,9999	0,0032	0,056

Из табл. 2 следует, что для данного примера число пачек, заполняющих счетчики, имеет два или три значения, причем почти для всех значений v_x только одно из них имеет вероятность, близкую к единице. Разброс ΔN может иметь до пяти значений, наиболее вероятным является только одно из них. Это приводит к тому, что $\sigma_{\Delta N}$ в большинстве случаев весьма мало и не превышает одной пачки. В точке $v_x = 0$ ΔN , $M_{\Delta N}$, $D_{\Delta N}$, $\sigma_{\Delta N}$ равняются нулю, так как при отсутствии ветра в счетчики $Cч1$ и $Cч2$ попадает одинаковое число импульсов.

Среднее значение дисперсии составляет

$$\overline{D_{\Delta N}} = \frac{\sum D}{n} = \frac{0,2354}{11} = 0,0214.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\overline{\sigma_{\Delta N}} = \sqrt{\overline{D_{\Delta N}}} = 0,146.$$

Нестабильность числа импульсов в пачке приводит к разбросу числа пачек, это и является источником погрешности определения $v_x \Delta_4 v_x$. Найдем $\Delta_4 v_x$.

Время заполнения счетчика зависит от числа пачек, прошедших в счетчик, и следовательно, разность времен заполнения равна

$$\Delta t = \Delta N \frac{1}{f_1}.$$

Используя формулы (3) и (4), получим

$$v_x = \frac{f_2 L}{2N_0} \Delta N.$$

Погрешность дискретности $\Delta_4 v_x$ равна

$$\Delta_4 v_x = \frac{\partial v_x}{\partial (\Delta N)} \delta (\Delta N) = \frac{f_2 L}{2N_0} \delta (\Delta N). \quad (1)$$

Для рассматриваемого примера анемометра коэффициент $\frac{f_2 L}{2N_0} = 1$. Если за $\delta (\Delta N)$ принять $\overline{\sigma_{\Delta N}}$, то $\Delta_4 v_x = 0,146$ м/с.

Таким образом, погрешность дискретности определяется разбросом разности чисел пачек, заполняющих счетчики. Если принять $\delta (\Delta N) = \sigma_{\Delta N}$, то можно считать, что абсолютная погрешность дискретности постоянна по всему диапазону. Для уменьшения погрешности дискретности следует снижать «вес» одной пачки в общем числе пачек, увеличивая емкость счетчиков N_0 .

Погрешность дискретности счетчика $Cч3 \Delta_4^{(2)} v_x$

Работа счетчика $Cч3$ аналогична работе $Cч1$ и $Cч2$: на вход $Cч3$ также поступает пачка импульсов. Счетчик $Cч3$ не обязательно считает частоту f_1 , он может работать от независимого генератора. В этом случае возникает погрешность дискретности $\Delta_4^{(2)} v_x$ такого же характера, как и рассмотренная выше.

Суммарная погрешность акустического анемометра

В качестве оценки суммарной погрешности примем суммарное среднее квадратическое значение

$$\Delta v = \sqrt{\Delta_1^2 v_x + \Delta_2^2 v_x + \Delta_3^2 v_x + \Delta_4^2 v_x}. \quad (15)$$

Рассмотрим пример. Пусть база прибора установлена по второму способу, нестабильность генератора $\Gamma 2$ составляет 1%, $v_x = 5$ м/с. Тогда

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L} v_x\right)^2 + \left(\frac{c^2}{2L} |\Delta \tau_2 - \Delta \tau_1|\right)^2 + \left(\frac{\Delta f_2}{f_2} v_x\right)^2 + \left(\frac{f_2 L}{2N_0} \sigma_{\Delta N}\right)^2},$$

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,2} \cdot 5\right)^2 + 0,58^2 + 0,05^2 + 0,0214} = 0,6 \text{ м/с.}$$

Относительная погрешность составляет 12%. Видно, что наибольший вклад в погрешность дают дополнительные задержки сигналов и погрешность дискретности. Погрешностью $\Delta_1 v_x$ при втором способе установки базы можно пренебречь. Для исключения погрешности $\Delta_3 v_x$ следует использовать кварцевый генератор. Введем компенсацию дополнительных задержек, тогда $\Delta v_x = \sqrt{0,22^2 + 0,0214} = 0,265$ м/с, что составляет 5,3%.

Для дальнейшего уменьшения погрешности необходимо использовать высокочастотные чувствительные элементы и уменьшить погрешность дискретности, увеличив емкость $Cч1$ и $Cч2$.

В случае применения широкополосных элементов погрешность от дополнительных задержек можно свести к нулю. Тогда погрешность измерения составляющей скорости ветра будет определяться только погрешностью дискретности.

Погрешность определения $|v|$ и φ по данным двух анемометров

Поскольку анемометр измеряет составляющую вектора скорости ветра вдоль своей базы, для нахождения вектора скорости требуются данные двух приборов. База второго анемометра

расположена перпендикулярно базе первого. Модуль скорости ветра $|\mathbf{v}|$ и направление φ равны:

$$|\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{v_x}{v_y}.$$

Погрешность модуля скорости ветра

$$\Delta |\mathbf{v}| = \frac{\partial |\mathbf{v}|}{\partial v_x} \Delta v_x + \frac{\partial |\mathbf{v}|}{\partial v_y} \Delta v_y = \frac{v_x}{|\mathbf{v}|} \Delta v_x + \frac{v_y}{|\mathbf{v}|} \Delta v_y.$$

Если считать, что погрешность модуля скорости состоит из двух составляющих:

$$\Delta_x |\mathbf{v}| = \frac{v_x}{|\mathbf{v}|} \Delta v_x$$

и

$$\Delta_y |\mathbf{v}| = \frac{v_y}{|\mathbf{v}|} \Delta v_y,$$

то средняя квадратическая ошибка определения модуля равна

$$\sigma_{|\mathbf{v}|} = \sqrt{\Delta_x^2 |\mathbf{v}|^2 + \Delta_y^2 |\mathbf{v}|^2}.$$

Полагая, что Δv_x и Δv_y — средние квадратические ошибки каждого из анемометров и что они одинаковы, получим

$$\sigma_{|\mathbf{v}|} = \Delta v. \quad (16)$$

Таким образом, средняя квадратическая ошибка определения модуля вектора скорости ветра равна средней квадратической ошибке определения составляющих вектора. Погрешность определения направления равна

$$\Delta \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial v_x} \Delta v_x + \frac{\partial \varphi}{\partial v_y} \Delta v_y = \frac{v_y}{|\mathbf{v}|^2} \Delta v_x + \frac{v_x}{|\mathbf{v}|^2} \Delta v_y.$$

Полагая средние квадратические ошибки обоих анемометров равными $\Delta v_x = \Delta v_y$, получим среднюю квадратическую ошибку

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\Delta_x^2 \varphi + \Delta_y^2 \varphi} = \frac{\Delta v}{|\mathbf{v}|}. \quad (17)$$

Таким образом, средняя квадратическая ошибка определения равна относительной ошибке определения модуля вектора скорости

Динамическая погрешность

Эта погрешность связана с периодом осреднения скорости ветра в приборе. Анемометр измеряет среднюю скорость за различные промежутки времени, например 1, 3, 10 и 60 с. В схеме, изображенной на рис. 1, период осреднения достигается изменением частоты генератора посылок $\Gamma 1$.

Оба счетчика, $Cч1$ и $Cч2$, работают в течение периода осреднения T , причем один из счетчиков заполняется за время T , а второй продолжает считать еще в течение интервала Δt . Длительность Δt зависит от скорости ветра. Особенность схемы состоит в том, что скорость ветра определяется за этот интервал Δt и результат измерения распространяется на весь период осреднения. При переменной скорости ветра в этих условиях возникает динамическая погрешность.

Можно считать, что при $T=1$ с и даже при $T=3$ с динамическая погрешность мала, но при больших периодах осреднения она может достигать значительной величины.

Для уменьшения погрешности следует изменить структурную схему и работу прибора: ввести в схему счетчик циклов, одновременно повысить и сделать постоянной частоту генератора $\Gamma 1$. Счетчики $Cч1$ и $Cч2$ должны автоматически проводить циклы измерения. Каждый период осреднения будет набираться из различного числа циклов. Счетчик циклов будет считать заданное число и по окончании периода осреднения считывать содержимое счетчика $Cч3$.

Новая структурная схема приводится в следующем разделе.

Выводы и рекомендации

В результате анализа составляющих погрешности можно сделать следующие выводы:

1) относительные погрешности, связанные с неточностью установки базы и нестабильностью генератора $\Gamma 2$, не зависят от скорости ветра. Простыми средствами их можно довести до пренебрежимо малых значений;

2) относительная погрешность, связанная с дополнительными задержками, дает наибольший вклад в общую погрешность, особенно значительный на малых скоростях;

3) погрешность дискретности носит случайный характер и определяется средним квадратическим отклонением чисел пачек, заполняющих счетчики;

4) в приборе может возникать динамическая погрешность, если период осреднения скорости ветра определяется частотой генератора посылок $\Gamma 1$, как это представлено на рис. 1.

Для уменьшения погрешности целесообразно принимать следующие меры:

1) устанавливать только одно базовое расстояние, а второе приближать к первому с помощью регулировки нулевого показания прибора при отсутствии ветра, причем установку нуля следует контролировать достаточно точно;

2) применять высокочастотные или широкополосные чувствительные элементы и вводить индивидуальную компенсацию задержек в каждом канале;

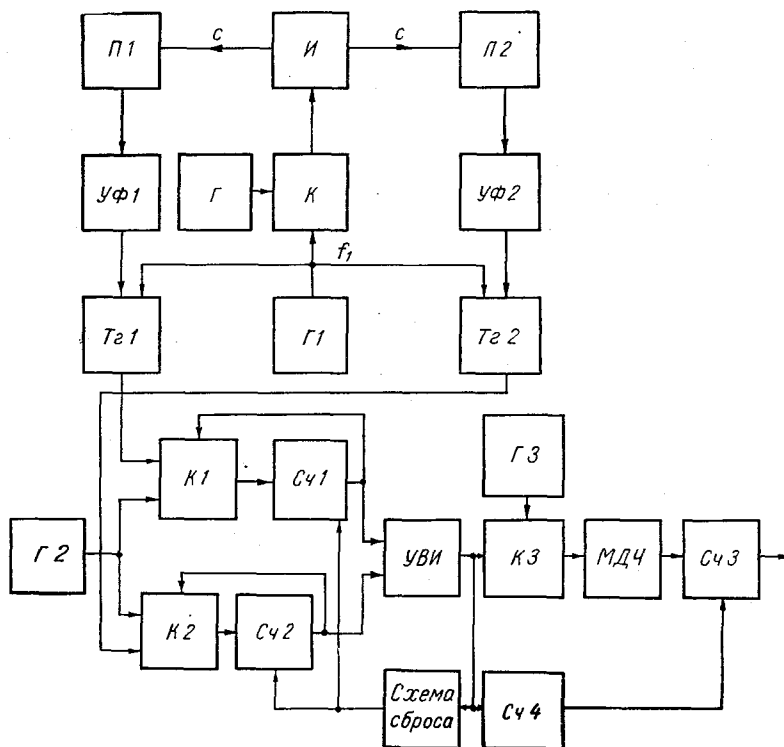


Рис. 3. Структурная схема анемометра со счетчиком измерительных циклов.

- 3) использовать кварцевый генератор в качестве генератора Г2
- 4) увеличить емкость счетчиков N_0 ;
- 5) повысить и сделать постоянной частоту генератора Г1;
- 6) ввести в схему счетчик измерительных циклов и на вход счетчика Сч3 поставить масштабный делитель частоты.

На основе рекомендаций можно предложить новую структурную схему (рис. 3), представляющую собой такую же структурную схему, как на рис. 1, дополненную рядом узлов.

Схема сброса автоматически сбрасывает счетчики Сч1 и Сч2 в конце каждого интервала Δt , в результате чего Сч1 и Сч2 непрерывно проводят измерительные циклы.

Счетчик циклов $Cч4$ считает циклы по интервалам Δt и по до-
вижении заданного периода осреднения подает сигнал считыва-
я в $Cч3$.

Интервалы Δt с выхода $УВИ$ управляют ключом $K3$. Для общ-
ости в схему введен генератор $G3$, частоту которого считает $Cч3$.
а входе $Cч3$ стоит масштабный делитель с переменным коэффи-
иентом счета для обеспечения постоянства цены 1 импульса счет-
ика при всех периодах осреднения. Выбор периода осреднения
роизводится путем ввода определенных чисел в счетчик циклов
масштабный делитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авт. св. № 568022 (СССР). Устройство для измерения скорости ветра.
И. П. Афиногенов, М. В. Попов.—Бюлл. открытий, изобретений, промышлен-
ных образцов и товарных знаков, 1977, № 29.
2. Афиногенов Л. П., Попов М. В., Плешкова Е. И. Аку-
гический анемометр.—Труды ГГО, 1979, вып. 414.
3. Афиногенов Л. П., Грушин С. И., Романов Е. В. аппара-
ура для исследований приземного слоя атмосферы.—Л.: Гидрометеиздат, 1977,
81—97.
4. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей.—М.: Наука, 1965.—400 с.
5. Таблицы нормального интеграла вероятностей, нормальной плотности и ее
ормированных производных.—М.: изд. Математического ин-та им. В. А. Стек-
ова, 1960.—136 с.

В. Ю. Александров, В. С. Лоцило

ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ ЛЬДОВ ПРИ ПОМОЩИ ЭВМ

В настоящее время на арктических и среднеширотных замерзающих морях широкое распространение получила радиолокационная аэросъемка ледяного покрова с целью оперативного обеспечения мореплавания [1, 2]. Радиолокационные снимки хотя и уступают аэрофотоснимкам по разрешающей способности, но выгодно отличаются тем, что могут быть получены при любых метеословиях и в любое время суток. Трудности процесса визуального дешифрирования и большой объем получаемой информации вызывают необходимость разработки методов машинного дешифрирования радиолокационных снимков.

В статье излагаются некоторые итоги исследований в данном направлении, в частности алгоритм, позволяющий осуществлять машинное дешифрирование, и результаты его экспериментальной проверки. Разработанный алгоритм позволяет классифицировать льды разного возраста и состояния по изображению на радиолокационном снимке, относя их к одному из следующих классов: 1) вода, 2) серо-белый лед, 3) белый лед, 4) однолетний лед, 5) тертый и торосистый однолетний лед, 6) однолетний лед с включениями старого, 7) многолетний лед.

Алгоритм заключается в следующем:

1) для каждого из перечисленных выше типов льдов выбирается эталонная площадка изображения, на которой измеряются значения оптической плотности изображения и вычисляется их гистограмма;

2) на снимке с неизвестным видом льда измеряются значения оптической плотности и вычисляется их гистограмма;

3) полученная гистограмма сравнивается с эталоном. Определяемый вид льда относится к тому классу, мера близости с эталонной гистограммой которого минимальна.

Были также проведены исследования зависимости вероятности правильного распознавания от числа уровней квантования и меры близости. Были отобраны 3 типа близости [3]:

1) вариационное расстояние Колмогорова

$$K_{mn} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^T |P_m(z_j) - P_n(z_j)|,$$

где $P_m(z_j)$ и $P_n(z_j)$ — значения гистограмм в точках z_j ;

2) расстояние Бхаттачария

$$B_{mn} = -\log \rho_{mn},$$

$$\rho_{mn} = \sum_{j=1}^T [P_m(z_j) P_n(z_j)]^{1/2};$$

3) расстояние Матусита

$$D_{mn} = \left[\sum_{j=1}^T (\sqrt{P_m(z_j)} - \sqrt{P_n(z_j)})^2 \right]^{1/2}.$$

Результаты исследований приведены в табл. 1. На основании приведенных здесь данных, а также данных, полученных в результате дополнительных исследований, в качестве меры близости было выбрано вариационное расстояние Колмогорова и число уровней квантования гистограммы, равное 16. Можно отметить, что примерно такого же порядка является число полутоновых градаций, заключенных в радиолокационном изображении. Для ввода снимков в ЭВМ использовался фототелеграфный аппарат «Нева». С его помощью были введены в машину эталонные участки и вычислены их гистограммы оптических плотностей D (рис. 1).

Таблица 1

Зависимость вероятности правильного распознавания от вида меры близости и числа уровней квантования гистограммы

Расстояние	Число уровней				
	42	21	11	6	3
Колмогорова	0,6	0,7	0,7	0,7	0,3
Бхаттачария	0,6	0,5	0,5	0,3	0,2
Матусита	0,6	0,6	0,7	0,6	0,4

Для проверки данного алгоритма в ЭВМ было введено по 63 реализации однолетнего, многолетнего и однолетнего с включениями старого льдов. Из них было опознано правильно 61 — многолетнего и по 45 — многолетнего и однолетнего с включениями старого. Оценка для вероятности правильного распознавания дает

$$\hat{p} = \frac{N_{\text{прав}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{151}{189} \approx 0,8.$$

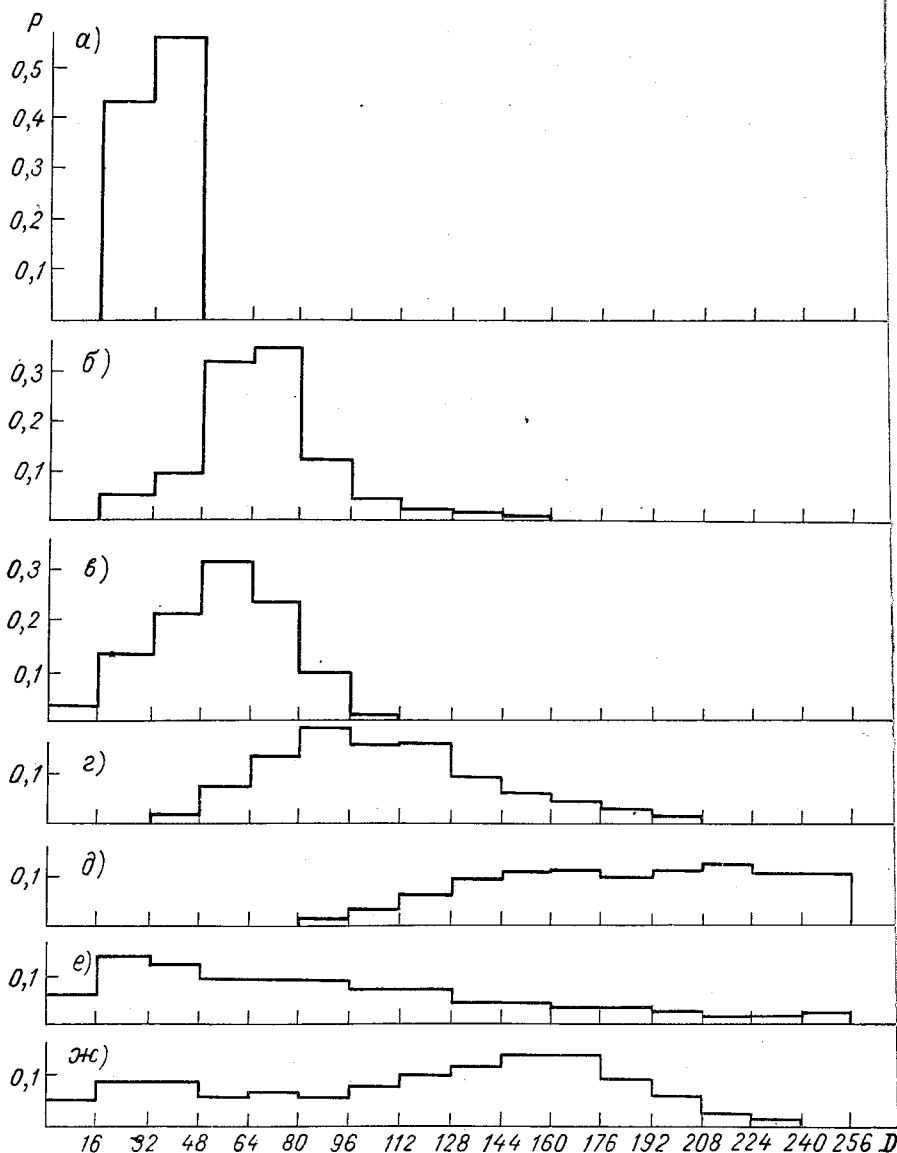


Рис. 1. Гистограммы распределения оптических плотностей для эталонных участков.

а — вода, б — серо-белый лед, в — белый лед, г — однолетний лед, д — однолетний лед с преобладанием тертого и торосистого, е — однолетний лед с включениями старого, ж — многолетний лед.

значения величины $\hat{p}$ позволяют произвести оценку истинного уровня ошибки классификатора. Если истинный, но неизвестный уровень ошибки классификатора равен p и если классификация k из n независимых, случайно взятых контрольных выборок неверна, то распределение k биномиально:

$$P(k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}.$$

Из свойств оценки для параметра p биномиального распределения следует, что вероятность того, что p лежит в интервале 0,75—0,85, равна 0,95. Правда, следует учесть, что оценка производилась для специально подобранных участков. Поэтому при работе с массовым материалом вероятность эта, по всей видимости, будет несколько меньше.

Рассмотрим результаты дешифрирования двух снимков. На первом (рис. 2) присутствуют вода, серо-белые и белые льды. На втором (рис. 3) — многолетний и однолетний льды. Дешифрирование производилось по площадкам 14×14 мм. Для опознавания типа льда на данном участке использовались значения оптической плотности, измеренные по одной из строк на данном участке. Из рассмотрения результатов дешифрирования снимка на рис. 2 видно, что из 48 участков правильно было распознано 35, т. е. процент правильного распознавания составил

$$P = \frac{35}{48} \cdot 100 = 73\%.$$

Из 13 ошибок, допущенных в процессе классификации, 5 — грубых, когда сморозь серо-белого и белого льдов принималась за включения старого льда в однолетний (1 случай) или за пространства чистой воды. В остальных 8 случаях серо-белые и белые льды принимались за однолетний.

При дешифрировании снимка, изображенного условно на рис. 3, процент правильного опознавания составил

$$P = \frac{10}{16} \cdot 100 \approx 62,5\%.$$

Несмотря на довольно низкий процент, грубых ошибок допущено не было. Все ошибки заключались в том, что многолетний лед принимался за включения старого льда в однолетний (2 случая), а однолетний — за серо-белый и белый, и в целом в результате дешифрирования граница между старыми и молодыми типами льдов выявилась четко.

Таким образом, полученные данные показывают:

- 1) возможно осуществить дешифрирование радиолокационных изображений морских льдов, используя описанный выше алгоритм;
- 2) при отнесении неизвестного типа льда к одному из классов из рассмотренных расстояний в качестве меры близости лучше всего использовать вариационное расстояние Колмогорова;

3) существует оптимальное число уровней квантования гистограммы, соответствующее наибольшей вероятности правильного опознавания, причем это число примерно совпадает с числом полутоновых градаций, заключенных в радиолокационном снимке.

Следует отметить, что рассмотренная методика может быть применена для дешифрирования не только радиолокационных изо-

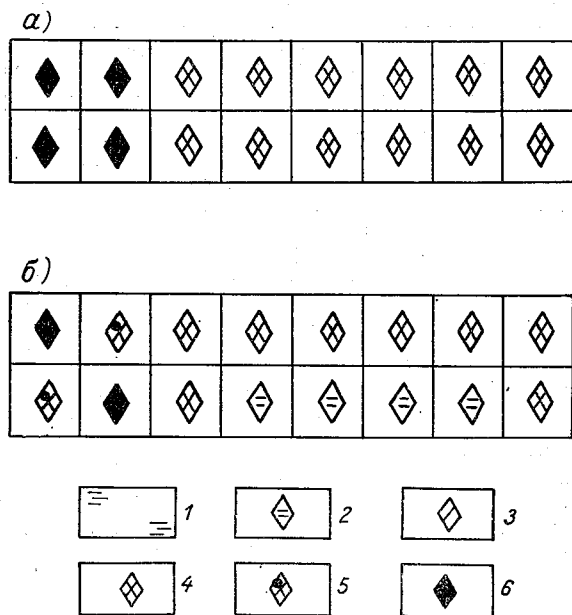


Рис. 3. Возраст льдов, определенный визуальным дешифрированием (а) и при помощи ЭВМ (б).

Усл. обозначения 1—5 см. рис. 2, 6 — многолетний лед.

бражений морских льдов, но и для аэрофотоснимков, тепловых снимков и т. п. Процент правильного распознавания при этом будет зависеть от потенциальной дешифрируемости самих изображений. Область применения методики не следует ограничивать одними льдами. Ее можно использовать для интерпретации изображений морской поверхности, определения типа облачности или почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новое средство получения ледовой информации/В. М. Глушков, С. Е. Конторов, В. С. Ложилов и др.—Морской флот, 1970, № 9, с. 27—28.
2. Радиолокационные станции бокового обзора/Под ред. А. П. Реутова.—М.: Советское радио, 1970. 359 с.
3. Vilmansen T. R. Feature Evaluation with measures of Probabilistic Dependence. IEEE Trans. on Comp., 1973, vol. C-22, N 4.

СОДЕРЖАНИЕ

Ю. В. Виноградов, Ю. Ф. Моисеев, Н. А. Петров, А. И. Плеснев. Принципы обмена метеорологической информацией в автоматизированной системе УВД	3
Ю. В. Виноградов, А. Е. Веселкин, Ю. Ф. Моисеев, А. И. Плеснев. Порядок обработки, хранения и отображения метеорологической информации в автоматизированной системе управления воздушным движением	10
С. И. Грушин, Н. А. Петров, Е. В. Романов. Принципы построения аэродромной метеорологической измерительно-информационной системы	18
Р. А. Круглов. Усовершенствование методики определения видимости взлетно-посадочной полосы (ВПП) в условиях низкой облачности	31
В. Е. Боханов. Интервалы осреднения при формировании «мгновенных» значений метеорологических величин для обслуживания посадки самолета	38
Е. Л. Бор, В. Е. Карпуша, Р. А. Круглов. Экспериментальный образец импульсного фотометра ИФ-1	44
В. Н. Аднашкин, А. А. Афанасьев, С. И. Грушин. О выборе размеров рассеивающего объема в нефелометрах	53
В. Н. Аднашкин. Погрешность фотометров рассеянного света (ФРС), обусловленная ослаблением света	58
Г. Б. Кимель, Е. И. Плешкова, Н. Г. Протопопов. Измерение составляющих вектора скорости ветра с помощью винтовых ветрочувствительных элементов	62
Л. П. Афиногенов. Расчет периода регенерации в технических системах длительного хранения информации	74
Л. П. Афиногенов. Анализ результатов контроля архивных лент	81
Г. А. Абашев, Л. П. Афиногенов, Г. Д. Горобьев. Цифровой накопитель на магнитной проволоке	85
И. Б. Фогельсон. Линеаризация неравновесных схем с односторонними, двусторонними симметричными и оптимальными шкалами	93
Е. В. Романов. Измерение пульсаций метеорологических элементов параметрическими преобразователями с экспоненциальной характеристикой	106
Л. П. Афиногенов, Е. И. Плешкова, М. В. Попов. Инструментальная погрешность акустического анемометра	112
В. Ю. Александров, В. С. Ложилов. Дешифрирование радиолокационных изображений морских льдов при помощи ЭВМ	130

Труды ГГО, вып. 433

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Редактор Г. И. Слабкович. Техн. редактор Г. В. Ивкова. Корректор Г. Н. Римапнт.

Сдано в набор 13.06.79. Подписано в печать 27.08.79. М-13165. Формат 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 9. Уч.-изд. л. 9,58. Тираж 700 экз. Индекс МЛ-223. Заказ № 245. Цена 65 коп. Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 ЛПО «Техническая книга» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.