

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

***Н.О. ГРИГОРОВ, А.Г. САЕНКО
К.Л. ВОСКАНИЯ***

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ.
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ**

*Допущено Учебно-методическим объединением по образованию
в области гидрометеорологии в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности
Метеорология*



Санкт-Петербург
2012

ББК 26.23

УДК 551.508(075.8)

Н.О. Григоров, А.Г. Саенко, К.Л. Восканян. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2012 – 306 с.

ISBN 978-5-86813-333-6

Рецензенты: Н.М. Гаврилов – д-р ф-м. наук, профессор кафедры физики атмосферы Санкт-Петербургского государственного университета, А.С. Солонин – д-р ф-м. наук.

В книге изложены методы измерений основных метеорологических величин. Основное внимание уделено физико-математическим принципам измерения. Изложено устройство некоторых метеорологических приборов, в основном, на уровне структурных блок-схем. В конце книги рассказывается о перспективах развития метеорологических измерений.

Предназначена для студентов университетов, а также для других учебных заведений, специализирующихся в области метеорологии.

Meteorological measurements. Meteorological devices. In this book main methods of meteorological parameters measurements are described. Main attention is drawn to physical and mathematical bases of measurements. The arrangement of main meteorological devices is described, mainly as block-diagrams. In the final item future development of meteorological measurements is written.

The books written for students of institutes, universities and meteorological colleges.

ISBN 978-5-86813-333-6

© Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л., 2012

© Российский гидрометеорологический университет, (РГГМУ), 2012

ВВЕДЕНИЕ

Учебник написан в соответствии с программой дисциплины «Методы и средства гидрометеорологических измерений».

Метеорологические измерения являются основой наших знаний об атмосферных процессах. На протяжении всей истории человечества люди всегда стремились к количественной оценке атмосферных процессов, пользуясь сначала примитивными, а затем все более точными и надёжными метеорологическими приборами.

Основой для данной книги является курс лекций «Гидрометеорологические измерения», который Н.О. Григоров читает в Российском Государственном Гидрометеорологическом университете более 25 лет. В качестве базового учебника ранее использовался учебник Л. Г. Качурина «Методы метеорологических измерений», изданный в 1985 г. Однако время, прошедшее с тех пор, значительно изменило метеорологическую измерительную технику, хотя основные принципы устройства измерительных приборов, описанные Л. Г. Качуриным, используются и в настоящее время. Тем не менее, сейчас необходим новый учебник, который учитывает произошедшие изменения. В частности, в настоящую книгу вошли такие разделы, как измерение радиоактивности, основные принципы устройства цифровых метеорологических измерительных приборов, новые принципы устройства факсимильных аппаратов и устройств для передачи фотоснимков Земли с искусственных спутников. Значительной переработке подверглись и традиционные метеорологические измерения: измерения температуры, параметров ветра, атмосферного давления и влажности.

В конце книги авторы делают экскурс в будущее, указывая возможные пути развития метеорологической измерительной техники. Вполне возможно, что, как и большинство предсказаний, прогноз этот окажется, мягко говоря, не совсем точным. Тем не менее, основные пути совершенствования метеорологических приборов, как нам кажется, указаны правильно.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В РОССИИ

В 2005 г. метеорологи отмечали 280-летие организации инструментальных метеорологических измерений в России. 1 декабря 1725 г. Ф.Х. Майер, академик «Академии наук и всяческих искусств», созданной по указу Петра I, начал производство регулярных метеорологических измерений. В том же году указом Петра I была организована Великая Северная экспедиция, во время которой было организовано около 20 метеорологических станций. Уже в следующем, 1727 г. были опубликованы первые метеорологические измерения в России. Таким образом, создается сеть метеорологических станций в России. Дальнейшее развитие сети произошло уже в 1733-1743 г. во время Второй Камчатской экспедиции, когда было создано ещё 24 метеостанции. Забегая вперед, скажем, что создание метеорологической сети России опережало её становление в Западной Европе. Европейские станции во многом учитывали опыт российских, более совершенных в то время. Первая инструкция по производству метеорологических наблюдений была написана в 1735 г. академиком И. Г. Гмелиным. Она предписывала четыре срока суточных наблюдений.

М. В. Ломоносов дал мощный толчок развитию приборной базы метеорологических измерений. Он лично изготовил несколько оригинальных приборов, например, анемометр с крыльчатым колесом, совмещенный с большим флюгером. Крыльчатые анемометры применяются для измерения скорости ветра и по сей день. Ломоносов изготовил и первые самопишущие приборы для метеорологических измерений. В его петербургском доме действовала первая в мире метеорологическая обсерватория, оснащённая самопишущими приборами. Для измерения температуры на высоте нескольких метров от земли М.В. Ломоносов создал «аэродинамическую машину», поднимавшую термометр. Машина действовала по принципу вертолета. Впервые в истории М. В. Ломоносов применил стеклянную линзу для измерения температуры поверхности Солнца. По сути дела, это был первый радиационный термометр, действующий по принципу пассивной локации.

Дальнейшее развитие метеорологических измерений в России связано с именем академика А. Я. Купфера, основателя и первого заведующего Нормальной обсерватории в Петербурге (ныне – Главная Геофизическая Обсерватория им. А. И. Воейкова). Обсерватория была создана в 1834 г. В 1835 г. А. Я. Купфер составил «Руководство к деланию метеорологических

ких и магнитных измерений», прообраз современных «Наставлений гидрометеорологическим станциям и постам». В том же году было рекомендовано проводить измерения атмосферного давления по барометру конструкции А. Я. Купфера, который до 1870 г. был лучшим барометром в мире. В 1846 г. Купфер изобрел чашечный анемометр с крестом Робинзона. А. Я. Купфер занимался также вопросами обработки метеорологических измерений. В том же 1846 г. он издает «Выводы из метеорологических измерений, сделанных в Российском государстве», труд, который обобщал результаты многолетних наблюдений за погодой в России.

В 1847 г. был изобретен первый барометр-анероид, значительно упростивший измерение атмосферного давления. В то время учёные уже понимали, что первопричиной всех атмосферных явлений является солнечное излучение. Поэтому в 1850 г. в России начинаются первые регулярные актинометрические измерения. Актинометрические приборы того времени, конечно, сильно отличались от современных, однако принцип измерения был тот же – измерение температуры черного тела. Таким телом служил термометр, а для исключения ветровой погрешности его помещали в стеклянный баллон, из которого выкачивался воздух. Более совершенные актинометрические приборы – абсолютный пиргелиометр и относительный актинометр – были изобретены в конце 19 в., а регулярные наблюдения с их помощью начались в 1893 г. в Павловской обсерватории под Петербургом.

Описывая историю метеорологических измерений, нельзя пройти мимо имени Г. И. Вильда, создателя флюгера, названного его именем, который был создан в 1873 г. и применяется по настоящее время. В 1870 г. Г. И. Вильд сконструировал «нормальный» барометр, точность измерений которого составляла 0,01 мм ртутного столба! Такая точность и в настоящее время считается превосходной. Вместе с механиком Гаслером Вильд сконструировал самопишущий прибор для измерения количества твердых осадков.

Эффективность использования результатов метеорологических измерений сдерживала невозможность быстрого обмена информацией между станциями. Пока сведения передавали с помощью курьеров (на лошадях!), они успевали безнадежно устареть. Изобретение телеграфа открыло перед метеорологами ранее невиданные возможности. В 1861 г. была послана первая телеграмма, содержащая сведения о погоде, из Западной Европы в Россию. У метеорологов впервые появляется возможность в режиме реального времени следить за погодой на обширной территории. С тех

пор оперативность передачи данных о погоде всегда была и остается в настоящее время важнейшим фактором, определяющим эффективность работы метеорологической сети. В дальнейшем для этого использовались различные средства связи: телефон, телеграф, телетайп, наконец – компьютер. Для оперативной передачи данных в 1874 г. Международный метеорологический конгресс утвердил специальный метеорологический код, который применялся в России и в Западной Европе до 1911 г. Примерно в это же время утверждены специальные символы для атмосферных явлений и принята 10-балльная шкала количества облачности.

Началом наблюдений за атмосферным электричеством следует считать 1898 г., когда А. С. Попов создает грозоотметчик, первый пассивный радиолокатор для наблюдений за грозами. В 1914 г. в Павловской обсерватории начинаются регулярные наблюдения за атмосферным электричеством в приземном слое атмосферы. Чуть ранее, в 1908 г., там же, в Павловской обсерватории, начинаются наблюдения за количеством озона в приземном слое, значение которого в физике атмосферы к этому времени было уже ясно понято метеорологами. Создается прожекторная установка для измерения высоты нижней границы облаков в ночное время.

Россия является приполярной страной. Учёные всего мира понимали особую роль Северного Ледовитого океана в формировании погодных процессов. Поэтому России самой природой отведена ведущая роль в организации метеорологических измерений в полярных районах. Развитие средств транспорта и связи на рубеже IX – XX в. сделали возможным решение этой задачи. В 1913 г. организуется полярная станция на о. Шпицберген, откуда в Петербург передаются радиограммы. В 1914 г. стали поступать регулярные метеосводки с Карского моря (Югорский Шар, Вайгач, Маре-Сале), а в 1916 г. – с о. Диксон. В начале 20-х г. открывается первая советская радиостанция Маточкин Шар на Новой Земле. В 1937 г. первая метеорологическая сводка была передана с дрейфующей станции «Северный Полюс – 1». Дрейфующие станции в Северном Ледовитом океане с тех пор действовали почти постоянно, с перерывами во время второй мировой войны и в 90-х г. прошлого века.

Открытие радиоактивности в начале XX в. породило новую отрасль метеорологических измерений. В 1924 г. в Павловске (пригород Санкт-Петербурга) начинается непрерывная регистрация радиоактивности воздуха. Важность этих измерений многократно возросла во второй половине XX в., когда начались испытания ядерного оружия, и появилась опасность радиоактивного заражения местности.

В Советском Союзе метеорологическим наблюдениям придавалось серьезное значение. В 1921 г. подписан декрет об организации Метеорологической службы Российской Федерации. В 1927 г. в Ленинграде введён в эксплуатацию завод «Метприбор», выпускавший более 80 наименований приборов для метеорологических измерений. Непрерывно совершенствуется приборная база. В 1930 г. П.И. Молчанов запускает первый радиозонд для исследования процессов в свободной атмосфере. В начале 30-х гг. появляется автоматическая метеостанция для исследования полярных районов, которая устанавливалась в труднодоступном районе и работала без участия человека, передавая данные о погоде по радио. В 1950 г. станция была усовершенствована и стала выпускаться под именем АРМС-50 (автоматическая радиометеорологическая станция). В 1956 г. выпущена новая модификация – ДАРМС (дрейфующая автоматическая радиометеорологическая станция), широко используемая в Арктике и в Антарктике во второй половине XX в.

Развитие авиации поставило новые задачи перед метеорологами. Особое значение приобрело измерение прозрачности атмосферы. Появляются приборы для измерения метеорологической дальности видимости. Это, прежде всего, дымкомер В. В. Шаронова (1935 г.), нефелометр (1940), а в 1956 г. В. И. Горышин создает первый регистратор прозрачности атмосферы М-37. В 1959 г. создан прибор ИДВ (измеритель дальности видимости) конструкции В. А. Гаврилова, а в 1966 г. – РДВ-1 (регистратор дальности видимости), дальнейшие модификации которого (РДВ-2 и РДВ-3) применялись до конца XX в. Особую важность для авиации имеет также измерение высоты нижней границы облачности. В 1959 г. создается регистратор нижней границы облачности А-26, а в начале 60-х гг. – ИВО (измеритель высоты облачности), работающий на основе светолокационного метода. Модификации этого прибора (ИВО-1м, РВО-2, РВО-3) применяются и в настоящее время. Для использования на АМСГ разрабатываются специальные автоматические метеорологические станции (УАТГМС - 1964 г., и первая станция типа КРАМС - 1968 г.). Эти станции способны измерять достаточно большое количество параметров без участия человека и обрабатывать их.

4 октября 1957 г. с запуском первого искусственного спутника Земли начинается активное освоение Космоса человеком. Это открыло поистине космические горизонты перед метеорологическими измерениями. Если ранее исследование высоких слоев атмосферы велось, в основном, с помощью ракет (в 1958 г. геофизическая ракета достигла высоты 473 км),

то теперь появилась возможность изучать все атмосферные процессы не только «снизу», но и «сверху», из Космоса. В 1966 г. был запущен первый метеорологический спутник «Космос-122», в дальнейшем такие спутники запускаются регулярно.

В настоящее время метеорология немыслима без информации, получаемой со спутников. В этой области, как ни в одной другой, проявляется международное сотрудничество, поэтому сейчас, несмотря на то что запуском спутников занимаются только несколько стран, информация предоставляется практически всем странам, имеющим соответствующую приёмную аппаратуру. Так, жертв цунами в декабре 2004 г. могло бы быть значительно меньше, если бы страны Юго-Восточной Азии своевременно получили бы информацию об его приближении (за 2-3 ч., с момента образования до прихода опасных волн, можно было бы принять меры к эвакуации людей из опасных районов). К концу XX в. появились такие методы измерения, которые при установке их на спутниках позволяют в перспективе осуществлять глобальный мониторинг (измерение атмосферных параметров). Таким образом, в будущем сама организация метеорологических измерений претерпит серьезные изменения, а эффективность их существенно возрастет.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1. Классификация метеорологических приборов

Все приборы для измерения метеорологических параметров можно разделить по различным признакам. Например, по назначению (в зависимости от того, какой параметр они измеряют): термометры – для измерения температуры, анемометры – для измерения скорости ветра и т.д. Можно предложить и другие способы классификации. Прежде всего мы рассмотрим классификацию приборов по способу расположения датчика или отсутствия такового. Согласно этой классификации можно выделить *приборы непосредственного измерения и приборы с дистанционной связью*.

Приборы непосредственного измерения полностью расположены в точке измерения. Например, жидкостный термометр, который необходимо поместить в измеряемую среду. Для того чтобы провести измерение, наблюдатель должен находиться рядом с прибором, например, выйти на метеоплощадку. Это не всегда удобно и, разумеется, полностью исключает любые элементы автоматического измерения и управления прибором. Такие приборы создавались на первых этапах возникновения измерительной техники.

Приборы с дистанционной связью – это такие приборы, в которых датчик помещается в исследуемую среду и соединяется проводной или иной связью с пультом управления. Пульт управления, как правило, находится в помещении, где работает наблюдатель. Это, например, резисторные термометры (см. ниже), дистанционные анемометры и т.д. В этих приборах чётко можно выделить две части – *датчик*, помещаемый в точку измерения, и *пульт управления*, содержащий электрические схемы и показывающие элементы (стрелку со шкалой или цифровой индикатор). Датчик представляет собой (или содержит как составную часть) *первичный преобразователь*, преобразующий измеряемую величину в другую физическую величину, транслируемую по каналу связи. Например, датчик температуры преобразует температуру среды в электрический ток, значение которого зависит от температуры. Далее ток транслируется по кабелю в пульт управления. Можно представить себе приборы с радиосвязью, оптической связью и т.д.

Приборы непосредственного измерения также как и приборы с дистанционной связью должны иметь датчик, находящийся в контакте с ок-

ружающей средой. Поэтому их можно объединить общим названием – *контактные приборы*. Существуют, однако, *бесконтактные приборы*, у которых датчик, как таковой, вообще отсутствует. Бесконтактные приборы иначе называются *локаторами*. Их также можно разделить на две группы: *активные и пассивные локаторы*.

Активные локаторы содержат передатчик и приёмник. Передатчик излучает оптический, акустический или электромагнитный сигнал в направлении исследуемого участка среды (например, радиолокатор излучает в атмосферу электромагнитное излучение). Этот сигнал рассеивается исследуемым объёмом воздуха, причём рассеянный сигнал зависит от свойств рассеивающего объема. Далее рассеянный сигнал принимается приёмником, который может быть расположен как в непосредственной близости от передатчика, так и на некотором расстоянии от него. Обычно рассеянный (т. е. принятый приёмником) сигнал очень слаб. Его усиливают, подвергают различным преобразованиям, а затем, в зависимости от входящего сигнала, определяют параметры исследуемого объема. Для этого, конечно, необходимо знать законы взаимодействия сигнала с исследуемой средой – в нашем случае, с атмосферным воздухом. Следовательно, использование локатора предполагает наряду с измерением математический расчёт.

Пассивный локатор не содержит передатчика. В нем используется свойство исследуемой среды генерировать некий сигнал, параметры которого определяются свойствами среды. Например, любое тело (разумеется, и атмосферный воздух), имеющее температуру выше абсолютного нуля, излучает электромагнитный сигнал. Излучение этого сигнала (его принято называть тепловым излучением) зависит от температуры тела. Следовательно, измерив параметры принятого теплового излучения, можно определить температуру удаленного объема воздуха.

Достоинством локаторов является прежде всего возможность определения параметров достаточно удалённых объектов. Поэтому применение локаторов описывается в разделе дисциплины «Гидрометеорологические измерения», называемом «Дистанционное зондирование атмосферы». Эта дисциплина изучается студентами старших курсов после изучения основного предмета «Гидрометеорологические измерения».

Теперь рассмотрим другую классификацию метеорологических измерительных приборов, связанную со способами измерения. Согласно этой классификации все измерительные приборы можно разделить на два типа: *абсолютные и относительные измерительные приборы*.

Абсолютные приборы основаны на сравнении измеряемого параметра с другим таким же параметром, значение которого можно регулировать в процессе измерения. Наблюдатель в процессе измерения добивается равенства величины измеряемого и регулируемого параметра. Например, чашечные весы являются абсолютным прибором. На одну чашку весов помещают взвешиваемое тело, на другую – гири, массу которых подбирают в процессе измерения. При достижении равновесия весов делается заключение о равенстве масс на обеих чашках. Легко понять, что такие приборы не содержат показывающих элементов – стрелочного указателя или цифрового индикатора. Они не требуют калибровки. В метеорологических измерениях такие приборы используются редко, поскольку процесс измерения достаточно длительный. Их обычно используют в лаборатории для калибровки относительных приборов.

Относительные приборы основаны на преобразовании измеряемой величины в другую физическую величину, значение которой измерить достаточно просто (например, угол отклонения стрелки, высота столбика ртути, электрический ток и т.п.). Эти приборы требуют предварительной калибровки, так как содержат стрелочный указатель, а значит, положение стрелки необходимо сопоставить с измеряемой величиной. Примером такого прибора являются пружинные весы, угол отклонения стрелки которых зависит от массы взвешиваемого тела. Такие приборы в использовании проще, чем абсолютные. Поэтому в метеорологических измерениях их используют очень часто. При этом не нужно забывать, что относительные приборы требуют регулярной периодической поверки и калибровки.

Помимо этой классификации измерительные (в том числе метеорологические) приборы, можно разделить и по другим признакам. Выделим *показывающие приборы, записывающие приборы и информационно-измерительные системы*.

Показывающие приборы имеют на выходе какой-либо указатель, например, стрелку со шкалой (вместо стрелки может использоваться столбик ртути или иной подвижный указатель) или цифровой индикатор. Показания прибора считываются и записываются оператором-измерителем. При отсутствии оператора показания прибора остаются непрочитанными.

Записывающие приборы имеют на выходе устройство, записывающее значение измеряемой величины. Это может быть самописец с бумажной лентой, на которой происходит запись изменения измеряемой величины, или электронное устройство для записи, например, оперативная память компьютера. Такие приборы предпочтительнее показывающих, так как

они не требуют непосредственного присутствия оператора. Работа оператора сводится только к техническому обслуживанию прибора и к анализу записанной информации. Запись информации представляет собой первую ступень автоматизации измерений. Простейшими приборами такого типа являются барограф, термограф, гигрограф и другие.

Информационно-измерительные системы (ИИС) имеют ещё большую степень автоматизации измерений. ИИС, как правило, измеряет не одну, а несколько величин. Измерения ведутся по заранее заданной программе, записанной в памяти ИИС. Эта программа измерений может автоматически изменяться в зависимости от измеряемых параметров, например, при штормовой ситуации измерения проводятся гораздо чаще. ИИС не только измеряет и записывает показания в оперативную память, она еще и транслирует информацию по каналам связи к потребителям, а также содержит цепочки обратной связи, которые позволяют управлять отдельными блоками системы. Такая ИИС уже не может быть названа просто прибором, хотя бы в силу её сложности. Типичным примером метеорологической ИИС является комплексная радиоэлектронная аэродромная метеорологическая станция (КРАМС).

Приведем еще одну классификацию измерительных приборов: *приборы для измерения мгновенного значения величин и интегрирующие приборы.*

Приборы для измерения мгновенного значения, как это следует из их названия, измеряют то значение величины, которое она имеет в настоящий момент. При этом подразумевается, что измеряемая величина непрерывно изменяется, а значит, показания прибора изменяются также непрерывно. Так, например, работают термометры, анемометры, гигрометры, актинометрические приборы, измеряющие потоки радиации и другие приборы.

Интегрирующие приборы измеряют суммарное значение некоторой величины, накопленное в течение определенного промежутка времени, который задается в процессе измерения. Таким прибором является, например, осадкомер Третьякова – он измеряет сумму осадков за промежуток времени между измерениями. В противоположность осадкомеру плювиограф является прибором для измерения мгновенного значения, так как он даёт возможность измерить интенсивность осадков – иначе говоря, мгновенное значение потока осадков. Еще пример – счётчик Гейгера измеряет мощность дозы радиации (мгновенное значение), а радиофлуоресцентный прибор «Флюорад» измеряет дозу радиации, накопленную за задаваемый интервал времени.

Говоря о классификации измерительных приборов, необходимо упомянуть об *аналоговых и цифровых приборах*.

Аналоговые приборы имеют на выходе стрелочный или иной указатель со шкалой. Выходная величина этих приборов, например угол отклонения стрелки, изменяется в соответствии с измеряемой величиной. Можно сказать, что эти величины изменяются аналогично – отсюда название типа прибора. Такие приборы работают с аналоговым сигналом, например, это напряжение или ток, который может принимать любое значение в определенном интервале, причём его значение зависит от измеряемой величины.

Цифровые приборы имеют на выходе цифровой индикатор, состоящий из отдельных элементов. В этих приборах используется цифровой сигнал, представляющий собой последовательность импульсов (например, импульсов тока). Амплитуда каждого из импульсов может принимать только два значения: низкого уровня (ноль) или высокого уровня (условно его называют единичным импульсом). Эти импульсы подчиняются определённому коду – чаще всего это двоичный код, в котором закодировано значение измеряемой величины. Таким образом, измеряемая величина может быть прочитана только при анализе последовательности нескольких импульсов.

2. Классификация методов измерения

Методом измерения называется совокупность приёмов, принципов и средств измерения исследуемых параметров. Основными методами, применяемыми в метеорологических измерениях, являются метод непосредственной оценки, дифференциальный метод и нулевой метод.

Метод непосредственной оценки заключается в том, что значение измеряемой величины определяют сразу же по стрелочному указателю или по цифровому индикатору. Как правило, блок-схема прибора, в котором осуществляется этот метод, представляет собой цепочку преобразователей, оканчивающуюся показывающим или записывающим прибором. Такой метод осуществляется, например, в барометре-анероиде, индукционном анемометре и многих других приборах.

Достоинство такого метода – простота процесса измерений. Действительно, процесс измерения заключается в том, что наблюдатель смотрит на указатель показывающего прибора и записывает его показания. Требования к квалификации наблюдателя, соответственно, минимальные. К дос-

тоинствам можно отнести и быстроту процесса измерения, а также возможность быстро представить себе направление и скорость изменения измеряемой величины. Например, следя за стрелкой указателя скорости ветра можно представить себе, увеличивается скорость ветра или уменьшается, а также сколь быстро идет её изменение.

Недостатком такого метода является погрешность, вносимая каждым преобразователем, входящим в цепочку. Соответственно, общая погрешность измерения должна учитывать погрешности всех преобразователей, таким образом точность измерения обычно не очень высокая.

Дифференциальный (разностный) метод заключается в том, что измеряется, собственно, не сама величина, а разность между измеряемой величиной и другой такой же физической величиной, значение которой известно. Этот метод применяется чаще всего в тех случаях, когда значение измеряемой величины заведомо очень большое, а требования к точности измерения также очень жесткие.

Приведем пример. Допустим, требуется измерить расстояние с точностью до одного миллиметра. Это нетрудно, если расстояние невелико – до нескольких десятков сантиметров. Но если измеряемое расстояние составляет несколько километров, то измерить его с такой точностью методом непосредственной оценки (например, с помощью мерной ленты или линейки) практически невозможно. Тогда поступают так. Из измеряемого расстояния L вычитают постоянную величину L_0 , которая близка к измеряемой, и значение которой известно. Образовавшаяся разность ΔL , ($\Delta L = L - L_0$) составляет небольшую величину, которую можно достаточно точно измерить методом непосредственной оценки (рис. 1).

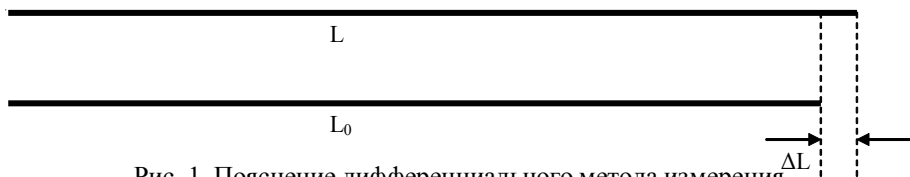


Рис. 1. Пояснение дифференциального метода измерения

Достоинством такого метода является более высокая, чем при применении метода непосредственной оценки, точность измерения. К недостаткам относятся сложность изготовления прибора (а значит, и более высокая стоимость) и большое время, затраченное на измерение. Действительно, блок-схема прибора должна включать в себя генератор опорной, постоянной величины, а также блок, выделяющий разность величин. Процесс измерения может включать в себя вычисление измеряемой величины

по измеренному значению разности величин. Соответственно, требования к квалификации измерителя в этом случае должны быть повышенными.

Дифференциальный метод измерения реализуется, например, в лазерном доплеровском измерителе скорости ветра (см. ниже), в струнном микробарометре и в некоторых других приборах.

Нулевой метод измерения реализуется в абсолютных приборах. Его можно считать дифференциальным методом измерения, в котором образовавшаяся разность измеряемой и вычитаемой величины равна нулю. Суть метода уже была объяснена при рассмотрении работы абсолютных приборов в разделе «Классификация метеорологических приборов».

3. Основные характеристики измерительных приборов

При работе с измерительными приборами необходимо прежде всего знать их основные характеристики, определяющие пригодность прибора для измерений данной величины в данных условиях. Обычно эти характеристики приводятся в паспорте прибора или в техническом описании. Перечислим их.

Важнейшей характеристикой прибора является его *чувствительность*. Согласно определению, абсолютная чувствительность любого прибора (S) - это отношение изменения выходной величины (Y) к вызвавшему ее изменению входной величины (X). Математически это можно выразить в виде производной:

$$S = \frac{dY}{dX} . \quad (1)$$

Входная величина – эта, собственно, величина, которую измеряет данный прибор (например, температура, влажность и т.д.). Выходная величина – это та, в которую преобразуется входная величина в процессе работы прибора (например, высота столба ртути, угол отклонения стрелки и т.д.). Если известна зависимость $Y(X)$, которая определяется устройством прибора, то можно, используя уравнение (1), выразить чувствительность и определить её величину.

Введем понятие *относительной чувствительности* прибора. Это отношение абсолютной чувствительности к значению выходной величины Y :

$$S = \frac{1}{Y} \frac{dY}{dX} . \quad (2)$$

Относительная чувствительность показывает, на какую часть от выходной величины изменяется сама выходная величина при изменении входной величины на единицу. Например, известно, что при изменении температуры на один градус изменение высоты столбика ртути составляет 1 мм. Много это или мало? Для ответа на этот вопрос необходимо знать саму высоту столбика ртути. Если она равна, скажем, одному сантиметру, то один миллиметр – это достаточно много, это одна десятая часть от самого значения высоты. Относительная чувствительность в этом случае равна 0,1 1/К. Но если высота столбика ртути, например, 50 см, то относительная чувствительность термометра в 50 раз ниже.

Важной особенностью относительной чувствительности является то обстоятельство, что она имеет одинаковую размерность для всех однотипных приборов. Например, для термометров – 1/К, для барометров – 1/Па и т.д. Значит, однотипные приборы, имеющие разную конструкцию, можно сравнивать между собой по их относительной чувствительности.

Второй важнейшей характеристикой прибора является *погрешность измерения*. Обычно она выражается так: $\pm \Delta X$, где X - измеряемая (входная) величина. Величину ΔX можно определить, зная чувствительность прибора и погрешность измерения выходной величины ΔY :

$$\Delta X = \frac{\Delta Y}{S} . \quad (3)$$

Погрешность измерения выходной величины ΔY обычно равна половине деления шкалы для стрелочных приборов. Для других приборов значение ΔY определяется исходя из физической природы величины Y .

Не нужно, однако, думать, что погрешность измерения полностью описывается уравнением (3). Как правило, к этому значению нужно прибавить погрешности, обусловленные влиянием других физических величин на работу прибора. Поэтому вопрос о погрешностях каждого прибора мы будем обсуждать особо. Кроме того, при измерениях также присутствуют случайная, систематическая и инструментальная погрешности. Нахождение средней величины измеренного значения с достаточной степенью достоверности – это отдельная математическая задача, решение которой находится за пределами данного курса.

Важнейшей характеристикой работы прибора является его инерция. *Инерция* прибора – это его свойство показывать измеряемую величину с задержкой во времени. В паспорте каждого прибора содержится пара-

метр, описывающий его инерцию. Для термометра это коэффициент тепловой инерции, для ротоанемометров – путь синхронизации и т.д. Существуют, однако, безынерционные приборы, у которых инерция или вообще отсутствует, или пренебрежимо мала.

Глава 1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

1.1. Тепловая инерция термометров

Тепловая инерция является общим свойством всех термометров, обладающих термометрическим телом или датчиком. *Термометрическое тело* - это часть термометра, которая должна принять температуру окружающей среды. Например, для ртутного термометра это резервуар со ртутью. Понятно, что если термометр имел температуру, отличающуюся от температуры окружающей среды, то для того, чтобы его термометрическое тело восприняло бы температуру среды, понадобится некоторое время.

Свойство термометра воспринимать температуру окружающей среды с задержкой во времени, называется *тепловой инерцией термометра*. Тепловая инерция обусловлена конечной скоростью теплообмена между термометрическим телом и средой. Она является нежелательным свойством, так как измерения могут проводиться только по истечении некоторого времени. От чего же зависит это время? Сколько же нужно ждать? Для ответа на этот вопрос рассмотрим процесс теплообмена термометрического тела с окружающей средой. В качестве примера рассмотрим резервуар жидкостного термометра. Полученные выводы будут носить общий характер для всех термометров, обладающих термометрическим телом.

Теплообмен между термометрическим телом и окружающей средой складывается из двух процессов: конвективного и радиационного (рис. 1.1). Тогда уравнение теплообмена между термометрическим телом и средой можно записать в виде:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha \cdot S(\theta - T) + BS' \quad (1.1)$$

где Q - количество тепла, запасенное термометрическим телом;

τ - время;

α - коэффициент конвективного теплообмена между термометрическим телом и средой;

S - площадь поверхности термометрического тела;

θ - температура окружающей среды;

T - температура термометрического тела;

B - алгебраическая сумма радиационных потоков, действующих на термометрическое тело;

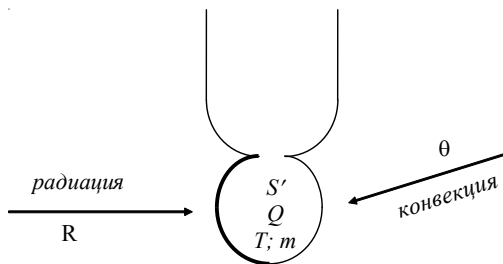


Рис. 1.1. Поток тепла, действующие на резервуар термометра

S' - часть поверхности термометрического тела, которая подвергается воздействию радиационных потоков.

Первое слагаемое в правой части (1.1) - конвективный поток тепла, второе - радиационный. Знак первого слагаемого зависит от знака разности $(\theta - T)$. Если термометр холоднее окружающего воздуха, то происходит его нагрев, если теплее - то охлаждение. Знак второго слагаемого зависит от знака величины B . Так как наибольший вклад в сумму радиационных потоков вносит солнечная радиация и излучение близлежащих нагретых предметов, можно сказать, что величина B практически всегда положительна.

Учтём известное соотношение между запасом тепла и температурой:

$$dQ = mc \cdot dT,$$

где m - масса термометрического тела;

c - удельная теплоемкость вещества, из которого это тело изготовлено (например, ртуть для ртутного термометра).

Разделив (1.1.) почленно на αS и подставив выражение для dQ , получим:

$$\frac{mc}{\alpha S} \cdot \frac{dT}{d\tau} = \theta - T + \frac{BS'}{\alpha S}.$$

Обозначив:

$$\frac{mc}{\alpha S} = \lambda \quad \text{и} \quad \frac{BS'}{\alpha S} = R,$$

имеем:

$$\lambda \cdot \frac{dT}{d\tau} = \theta - T + R. \quad (1.2)$$

Решим уравнение (1.2), используя следующие предположения.

1. Температура окружающей среды изменяется по линейному закону:

$$\theta = \theta_0 + \gamma \cdot \tau,$$

где θ_0 - температура среды в момент времени, принятый за нулевой (например, момент установления контакта термометра со средой);

γ - скорость изменения температуры среды. Для необходимого промежутка времени (10 - 20 мин) это предположение достаточно хорошее.

Изменение температуры среды в течение 10 -20 мин или вообще отсутствует, или может быть аппроксимировано линейным законом.

2. Градиент температуры внутри термометрического тела отсутствует, температура всех его точек постоянна. Разумеется, это не так. Но учёт градиента температур сильно усложнит уравнение и мало изменит полученные выводы.

3. Величина B является постоянной в течение времени установления температуры.

4. Начальные условия примем в виде:

$$T_{\tau=0} = T_0.$$

Обратим внимание на то, что величины λ и R являются константами, по крайней мере, в течение того промежутка времени, пока температура термометра и среды будут выравниваться. Правда, коэффициент конвективного теплообмена α , входящий в выражение для λ , зависит от плотности окружающей среды ρ и скорости ее движения относительно термометра V :

$$\alpha = a + b\sqrt{\rho \cdot V}, \quad (1.3)$$

где a и b - константы. Но в течение малого промежутка времени ρ и V можно считать постоянными.

Проведем замену переменной в уравнении (1.2):

$$x = T - \theta = T - \theta_0 - \gamma \cdot \tau,$$

Соответственно:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{dx}{d\tau} + \gamma,$$

тогда уравнение (1.2) перепишется в виде: $\lambda \left(\frac{dx}{d\tau} + \gamma \right) = -x + R$

или $\lambda \frac{dx}{d\tau} = -x + R - \gamma\lambda$.

Разделяя переменные, получим:

$$\frac{dx}{x - R + \gamma\lambda} = -\frac{d\tau}{\lambda}.$$

С учётом того, что R , γ и λ являются константами, можем внести их под дифференциал:

$$\frac{d(x - R + \gamma\lambda)}{x - R + \gamma\lambda} = -\frac{d\tau}{\lambda}. \quad (1.4)$$

Проинтегрируем (1.4) от нулевого момента времени до текущего τ :

$$\int_{x_0}^x \frac{d(x - R + \gamma\lambda)}{x - R + \gamma\lambda} = -\int_0^\tau \frac{d\tau}{\lambda}.$$

Получим:

$$\ln \frac{x - R + \gamma\lambda}{x_0 - R + \gamma\lambda} = -\frac{\tau}{\lambda}.$$

Проведя обратную замену переменной от x к T и выразив из левой части величину $T - \theta$, получим:

$$T - \theta = (T_0 - \theta_0 - R + \gamma\lambda) \cdot e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - \gamma\lambda + R \quad (1.5)$$

Анализ этого уравнения довольно труден. Поэтому введём дополнительные упрощения. Сначала рассмотрим самый простой случай.

Случай 1. Предположим, радиационные потоки отсутствуют вообще: $B = 0$, а следовательно $R = 0$; температура среды постоянна ($\theta = \text{const}$), т.е. $\gamma = 0$. Тогда уравнение (1.5) запишется в виде:

$$T - \theta = (T_0 - \theta) \cdot e^{-\frac{\tau}{\lambda}}. \quad (1.6)$$

В правой части стоит экспоненциальная зависимость, что отвечает поставленному требованию $T \big|_{\tau \rightarrow \infty} \rightarrow \theta$. Действительно, $T - \theta \big|_{\tau \rightarrow \infty} \rightarrow 0$.

Однако какова скорость изменения температуры термометра T ? Из уравнения (1.6) видно, что она зависит от величины λ : если λ мало, то температуры термометра и среды выравниваются быстро, если велико - то медленно (кривые 1 и 2 на рис. 1.2).

Значит, параметр λ является важной константой для термометра. Назовём его *коэффициентом тепловой инерции термометра*. Поскольку в формуле (1.6) показатель экспоненты должен быть безразмерным, то ясно, что λ имеет размерность времени. Из формулы (1.6) становится ясен физический смысл этой величины.

Время, в течение которого разность температур между термометрическим телом и окружающей средой уменьшается в e раз (при постоянной температуре среды) называется коэффициентом тепловой инерции термометра.

Коэффициент тепловой инерции можно выразить графически (рис. 1.2) отрезком на оси абсцисс - λ_1 и λ_2 .

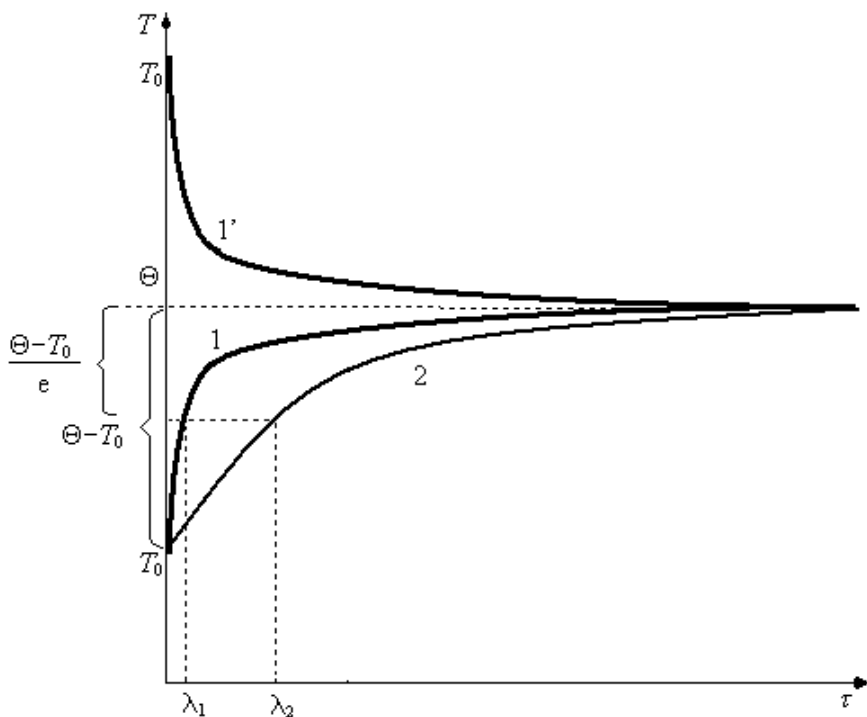


Рис. 1.2. Зависимость температуры термометрического тела от времени в случае $\Theta = \text{const}$; $B = 0$

Для измерителя желательно иметь термометр с малым коэффициентом инерции. Вспомним, что $\lambda = mc/\alpha S$.

С учётом формулы $\alpha = a + b\sqrt{\rho V}$ дадим рекомендации по его изготовлению. Термометрическое тело такого термометра должно:

- обладать малой массой m ;
- быть изготовленным из материала с малой удельной теплоёмкостью c ;
- обладать возможно большей поверхностью S .

Кроме того, полезно вводить аспирацию термометра (обдув потоком воздуха), увеличивая V . Заметим, что при измерении температуры более плотных сред (например, воды) коэффициент тепловой инерции уменьшается. С точки зрения этих рекомендаций ртутный термометр обладает большим коэффициентом инерции, чем спиртовой; а шарообразный резервуар термометра (имеющий наименьшую поверхность) менее предпочтителен, чем, например, цилиндрический.

Абсолютно те же выводы могут быть сделаны в случае $T_0 > \theta$ (кривая 1', рис. 1.2). При этом в обеих частях уравнения (1.6) изменяется знак.

Случай 2. Радиационные потоки по-прежнему отсутствуют ($R = 0$), а температуру примем линейно изменяющейся ($\gamma \neq 0$). Тогда основное уравнение (1.5) перепишем соответственно:

$$T - \theta = (T_0 - \theta_0 + \gamma\lambda)e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - \gamma\lambda. \quad (1.7)$$

Анализ этого уравнения приводит к выводу, что при условии $\tau \rightarrow \infty$ ($T - \theta$) $\rightarrow -\gamma\lambda$. Это означает, что термометр никогда не покажет температуру окружающей среды и даже по истечении очень большого времени между температурой среды и показаниями термометра будет существовать разность, равная по модулю $|\gamma\lambda|$. Эта величина носит название *инерционной погрешности*, или *инерционной поправки* к показаниям термометра. Знак инерционной поправки зависит от знака скорости изменения температуры среды γ . Если $\gamma > 0$ (температура увеличивается), то инерционную поправку надо прибавлять к показаниям термометра, если $\gamma < 0$ (температура среды падает), то наоборот - поправку надо вычитать из показаний термометра. Это легко иллюстрируется графиками (рис. 1.3). Обратите внимание - ни знак, ни величина инерционной поправки не зависят от знака и величины первоначальной разности температур ($T_0 - \theta_0$). Кривые 1 и 2 на рис. 1.3 а, б стремятся к одной и той же асимптоте.

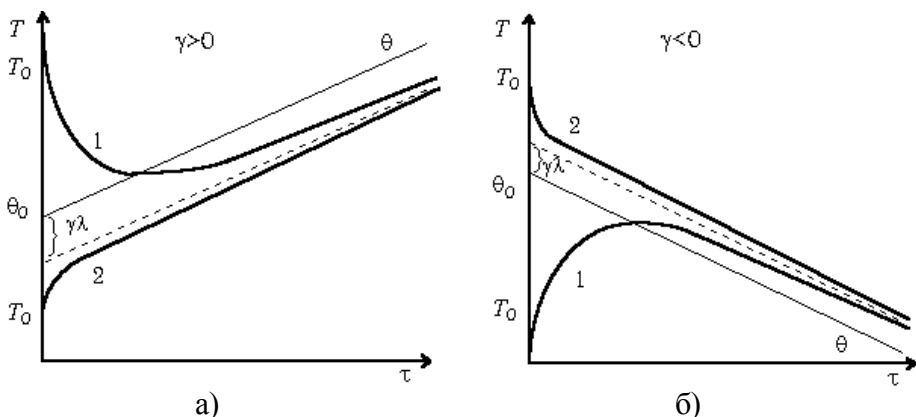


Рис. 1.3. Изменение показаний термометра в случае линейного:
а) увеличения, б) уменьшения температуры среды

Чтобы лучше запомнить сказанное, сформулируем универсальное правило. При линейном изменении температуры окружающей среды показания термометра *отстают* от истинной температуры среды на величину $|\gamma\lambda|$ (по истечении достаточно большого интервала времени).

Для уменьшения инерционной поправки следует уменьшать коэффициент тепловой инерции термометра, т.е. руководствоваться теми рекомендациями, которые мы уже дали.

А теперь рассмотрим вопрос: каково же должно быть значение коэффициента инерции реальных метеорологических термометров, чтобы инерционная поправка была бы всегда пренебрежимо малой?

Для этого она должна быть меньше допустимой погрешности измерений Δt , т.е. должно выполняться неравенство:

$$\gamma\lambda < \Delta t.$$

Отсюда найдем требование для λ :

$$\lambda < \frac{\Delta t}{\gamma}. \quad (1.8)$$

Разумеется, при использовании неравенства (1.8) в него следует подставить максимально возможную величину γ . Все метеорологические термометры сконструированы с учётом неравенства (1.8). Их реальные коэффициенты инерции составляют несколько десятков секунд.

В дальнейшем мы познакомимся с малоинерционными термометрами, а также с термометрами, вообще не имеющими тепловой инерции (акустические, радиационные термометры).

Обратим внимание еще на одну интересную особенность изменения показаний термометров в этом случае. Кривая 1 рис. 1.3, а имеет минимум. Кривая 1 на рис. 1.3, б имеет максимум. Моменты достижения этих экстремальных точек соответствуют точному равенству показаний термометра и температуры среды! Иными словами, кривая для показаний термометра пересекает кривую изменения температуры среды в экстремальных точках. Это можно доказать. Студентам предлагается сделать это в качестве домашнего упражнения.

Случай 3. Предположим теперь, что радиационные потоки $B \neq 0$, а температуру окружающего воздуха примем постоянной ($\gamma = 0$). Тогда из уравнения (1.5) следует:

$$T - \theta = (T_0 - \theta - R)e^{-\frac{\tau}{\lambda}} + R, \quad (1.9)$$

Видно, что при $\tau \rightarrow \infty$ разность $(T - \theta) \rightarrow R$. Следовательно, как и в предыдущем случае, термометр никогда не покажет температуру окружающей среды. Даже по истечении достаточно большого времени он будет показывать её с ошибкой, равной R , или $BS'/\alpha S$. Эта величина носит название *радиационной погрешности*, или *радиационной поправки*. В отличие от инерционной радиационная поправка всегда положительна (рис. 1.4). Ведь радиационные потоки могут только нагревать термометр. Она всегда вычитается из показаний термометра. Обратим внимание на то, что величина радиационной поправки не зависит от величины и знака первоначальной разности $(T_0 - \theta_0)$.

Для уменьшения радиационной погрешности можно рекомендовать только два способа. Во-первых, следует уменьшить радиационные потоки, т.е. затенять термометр. Во-вторых, увеличивать коэффициент конвекции α , для чего лучше всего применять аспирацию. Можно было бы рекомендовать увеличить поверхность термометра S , но это неизбежно приведет к увеличению S' - части поверхности, освещаемой радиационными потоками. Учитывая, что основным нагревающим потоком является солнечная радиация, метеорологические термометры помещают в специальные будки, которые красят в белый цвет для меньшего нагревания солнцем.

Поверхность термометрического тела делают зеркальной, а если это невозможно, помещают в специальный металлический экран, поверхность которого полируется до блеска.

После всего сказанного можно было бы рассмотреть самый общий случай, т.е. анализ полного уравнения (1.5). Не будем, однако, этого де-

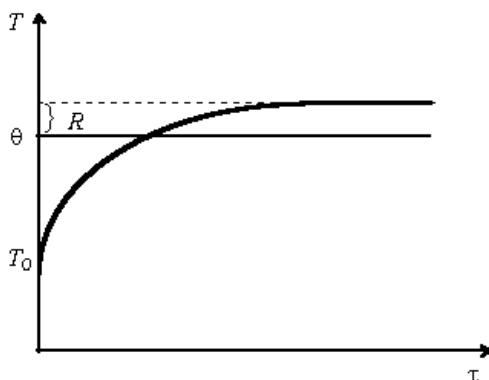


Рис. 1.4. Изменение показаний термометра в случае присутствия радиационных потоков

лять. Студентам же предлагается изобразить графическую зависимость по уравнению (1.5) в качестве полезного самостоятельного упражнения.

В завершение рассмотрим случай, когда температура окружающей среды флуктуирует. Поскольку флуктуации температуры невозможно представить каким-либо уравнением, ограничимся случаем прямоугольных флуктуаций температуры (рис. 1.5).

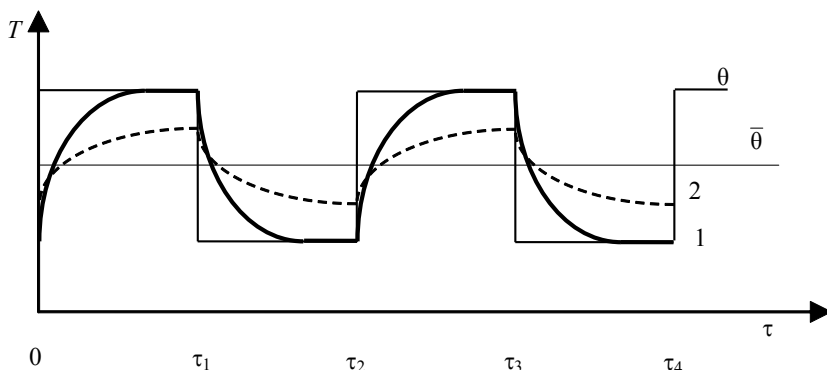


Рис. 1.5. Прямоугольные флуктуации температуры окружающей среды (θ) и показания термометров: 1 - малоинерционного, 2 - со значительной инерцией

Видно, что этот рисунок можно рассматривать как случай постоянной температуры среды в отдельных интервалах времени - от 0 до τ_1 , от τ_1 до τ_2 и т.д. В каждом таком интервале построим графики для показаний термометров: (1) - с малым λ , (2) - с большим λ . Видно, что показания малоинерционного термометра близки к значениям истинной температуры

среды, а термометр с большой инерцией дает показания, близкие к среднему значению температуры среды $\bar{\theta}$. Поэтому если наблюдателя интересует осредненное значение температуры (без учёта короткопериодических флуктуаций), то целесообразно пользоваться термометром, имеющим коэффициент тепловой инерции гораздо больше периода флуктуаций.

Если же желательно изучать именно флуктуации температуры, то необходимо иметь термометр с коэффициентом инерции гораздо меньше периода флуктуаций.

1.2. Резисторы и термисторы.

Зависимость сопротивления от температуры

Поскольку одним из главных требований, предъявляемых к современным метеорологическим приборам, является дистанционность, то наиболее интересны для нас такие датчики, которые преобразуют температуру в электрический сигнал: ток, напряжение или сопротивление. Одним из таких датчиков является металлический резистор - обычная тонкая проволока из меди, платины или других металлов.

Сопротивление резистора зависит от температуры. В самом деле, если электрический ток обусловлен движением свободных электронов в проводнике, то с ростом температуры увеличивается скорость броуновского движения молекул проводника. Направленное движение электронов затрудняется, что означает увеличение сопротивления. Так, гораздо труднее пройти через толпу, в которой люди хаотически передвигаются с места на место, чем через ту же толпу, члены которой неподвижны. Из этого рассуждения ясно, что с ростом температуры сопротивление резистора возрастает. Значения удельного сопротивления для различных металлов указаны в Приложении 1.

Зависимость сопротивления резистора от температуры различна для разных металлов. Для меди это почти линейная зависимость, для платины несколько нелинейная. Учёт нелинейности, конечно, необходим в точных измерениях. Сейчас же мы аппроксимируем эту зависимость линейной функцией:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t), \quad (1.10)$$

где R - электрическое сопротивление резистора; R_0 - его сопротивление при 0°C ; α - температурный коэффициент изменения сопротивления, K^{-1} ; t - температура по шкале Цельсия.

Эта зависимость изображена на рис. 1.6 (кривая 1).

Обратите внимание, при низких температурах, близких к абсолютному нулю, линейность нарушается, и сопротивление становится равным нулю. Это явление, называемое сверхпроводимостью, для нас не играет существенной роли, так как метеорологические измерения проводятся обычно при более высоких температурах. Датчики температуры, изготовленные из тонкой металлической проволоки, носят название *терморезисторы*.

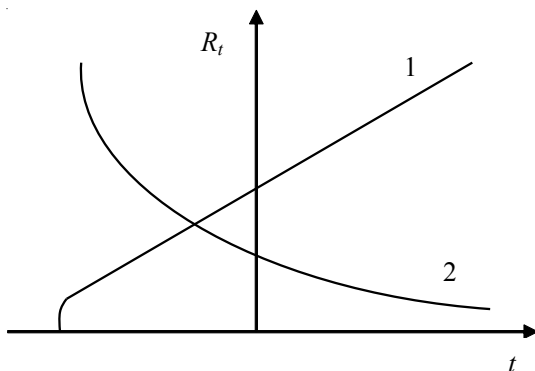


Рис. 1.6. Зависимость сопротивления от температуры:
1 - для терморезисторов, 2 - для термисторов

Значение температурного коэффициента изменения сопротивления терморезистора зависит от материала (Приложение 2), из которого он изготовлен. Так, для проводниковой меди $\alpha = 4,33 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, для никеля $6,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Смысл этого коэффициента можно понять так: это относительное изменение сопротивления проводника при его нагревании на 1 К. Например, если медный проводник при каком-то значении температуры имеет сопротивление $R = 100 \text{ Ом}$, то при нагревании на 1 К он будет иметь сопротивление $R = 100,433 \text{ Ом}$, при нагревании на 2 К — 100,866 Ом и т.д.

Существуют, однако, сплавы (константан, манганин и др.), имеющие коэффициент α на 2-3 порядка меньше, чем большинство металлов. Сопротивление таких сплавов будет практически постоянным, отсюда и название одного из них - *константан*. Такие материалы, конечно, непригодны для изготовления терморезисторов, но они применяются в других случаях, когда изменение сопротивления проводника нежелательно.

Для использования в качестве датчиков температуры можно применить и полупроводники. Как известно, полупроводники изготавливаются из сплава непроводящих материалов с небольшим количеством других при-

месей, придающих им электронную или дырочную проводимость. Для полупроводников характерен переход электронов с нижних уровней (валентная зона) на верхние уровни (зона проводимости). Это возможно только для тех материалов, у которых уровни зоны проводимости достаточно близки к уровням валентной зоны.

Тогда для перехода в валентную зону требуется лишь небольшой толчок, который даёт электрическое поле. Но такой энергетический толчок может дать и повышение температуры. При более высокой температуре большее число электронов оказывается в валентной зоне. Это ведёт к увеличению тока и означает уменьшение электрического сопротивления полупроводника (рис. 1.6, кривая 2).

Датчики температуры, изготовленные на основе полупроводников, называются *термисторами*. Рассмотрим особенности термисторов и связанные с ними ограничения в их применении.

1. Зависимость сопротивления от температуры для термисторов более крутая, чем для терморезисторов. Это означает, что термистор как датчик температуры более чувствителен, чем терморезистор. Безусловно, это их преимущество.

2. Зависимость $R(t)$ для термисторов оказывается противоположной по отношению к терморезисторам. Это практически никак не ограничивает их применение.

3. Зависимость $R(t)$ для термисторов заметно нелинейная. Это нежелательное свойство, так как изготовленный на основе термисторов прибор должен иметь нелинейную шкалу, либо должен быть снабжен блоком линеаризации.

4. Зависимость $R(t)$ для термисторов является нестабильной. Термисторы стареют и их характеристики изменяются. Эта особенность накладывает основные ограничения на применение термисторов. Прибор, изготовленный на их основе, пришлось бы часто градуировать заново. Поэтому термисторы применяют для однократных или непродолжительных измерений температуры, например, в радиозондах. Все стационарные метеорологические приборы для измерения температуры изготавливают с применением терморезисторов.

Теперь нам остается подобрать подходящую схему для измерения сопротивления терморезисторов.

Приборы с использованием таких схем носят название *термометров сопротивления*, или *резистивных термометров*. Как правило в них используются мостовые схемы.

1.3. Мостовые измерительные схемы

Представим себе схему, в которой два реостата соединены параллельно, а между их ползунками включен прибор для измерения тока, например, гальванометр. Соединим схему с источником питания (рис. 1.7).

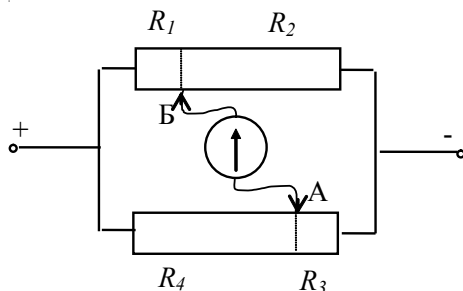


Рис. 1.7. Пояснение действия мостовой схемы

Будем передвигать ползунки реостатов. Если верхний ползунок перевести в крайнее левое положение, а нижний в крайнее правое, то гальванометр покажет довольно большой ток. Если верхний ползунок перевести в крайнее правое положение, а нижний в крайнее левое, то гальванометр покажет такой же по величине ток, но другого знака. Следовательно, существует такое положение ползунков, при котором ток через измерительный прибор будет равен нулю.

Найдем это положение. Из рис. 1.7 видно, что ползунки реостатов делят каждый из них на две части. Их сопротивления обозначим через R_1 и R_2 , R_3 и R_4 . Очевидно, ток через гальванометр будет равен нулю в том случае, если разность потенциалов в точках А и Б равна нулю. Следовательно, токи, протекающие от положительного полюса источника к отрицательному, могут протекать через верхнюю часть схемы (обозначим этот ток через i_1) и через нижнюю часть схемы (i_2). Условием равенства потенциалов точек А и Б является условие равенства падений напряжения на сопротивлениях R_1 и R_4 :

$$i_1 \cdot R_1 = i_2 \cdot R_4,$$

а также на R_2 и R_3 :

$$i_1 \cdot R_2 = i_2 \cdot R_3.$$

Перемножим левую часть первого уравнения на правую часть второго, а правую часть первого уравнения на левую часть второго:

$$i_1 \cdot R_1 \cdot i_2 \cdot R_3 = i_1 \cdot R_2 \cdot i_2 \cdot R_4,$$

откуда получим искомое соотношение:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4. \quad (1.11)$$

Теперь изобразим схему рис. 1.7 так, как её обычно изображают на чертежах (рис. 1.8).

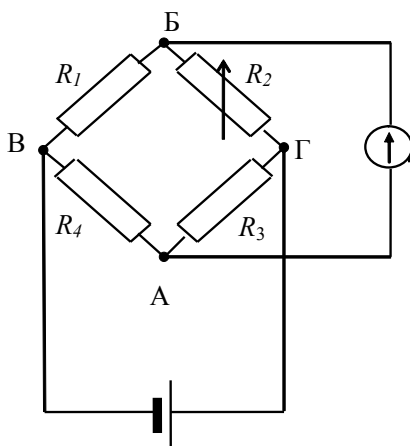


Рис. 1.8. Мостовая измерительная схема

Такая схема носит название *мостовой измерительной схемы*. Говорят, что мостовая схема имеет две диагонали: диагональ питания (ВГ) и измерительную диагональ (АБ). Резисторы, включенные между точками А, Б, В и Г, называются *плечами* мостовой схемы.

Обратите внимание, простейшая мостовая схема содержит четыре резистора. Более сложные мостовые схемы могут содержать большее число резисторов. Но число плеч в мостовой схеме всегда равно четырём! Каждое плечо содержит один или несколько резисторов.

Если ток в измерительной диагонали мостовой схемы отсутствует, то такая схема называется *уравновешенной*. Как мы уже показали, в уравновешенной мостовой схеме произведения противоположных плеч равны (уравнение 1.11).

С помощью мостовой схемы можно измерять величину сопротивлений. В самом деле, допустим, сопротивление одного из плеч, например,

R_1 неизвестно, а другое плечо, например, R_2 , можно регулировать. Тогда наблюдатель уравнивает схему с помощью резистора R_2 , а затем определяет неизвестное сопротивление R_1 :

$$R_1 = R_2 \cdot R_4 / R_3.$$

Если же условие (1.11) не выполняется и в измерительной диагонали течет ток, то такая схема называется *неуравновешенной*. Она тоже может использоваться для измерения сопротивлений. Покажем, что ток в измерительной диагонали зависит от величины неизвестного сопротивления R_1 . Для этого воспользуемся равенством, следующим из теоремы об эквивалентном генераторе:

$$i = \frac{U_{AB}}{R_{кз} + R_g}, \quad (1.12)$$

где U_{AB} - разность потенциалов между точками А и Б при условии отсутствия гальванометра;

R_g - внутреннее сопротивление гальванометра;

$R_{кз}$ - сопротивление “короткого замыкания”, т.е. сопротивление между точками А и Б в случае отсутствия источника питания и замыкания диагонали питания ВГ.

Найдем эти величины. Разность напряжений между точками А и Б выразим в виде:

$$U_{AB} = U_A - U_B, \quad (1.13)$$

где U_A и U_B - напряжение точек А и Б соответственно (будем считать напряжение точки Г равным нулю).

Чтобы найти напряжение точки А построим график падения напряжения вдоль ветви $R_4 - R_3$ (рис 1.9).

Согласно закону Ома, напряжение падает линейно от величины электродвижущей силы (ЭДС) источника питания до нуля в точке Г. Тогда из подобия треугольников - малого, заштрихованного и большого - найдём U_A :

$$U_A = \frac{U \cdot R_3}{R_4 + R_3}. \quad (1.14)$$

Построив аналогичный рисунок для ветви $R_1 - R_2$, найдем U_B :

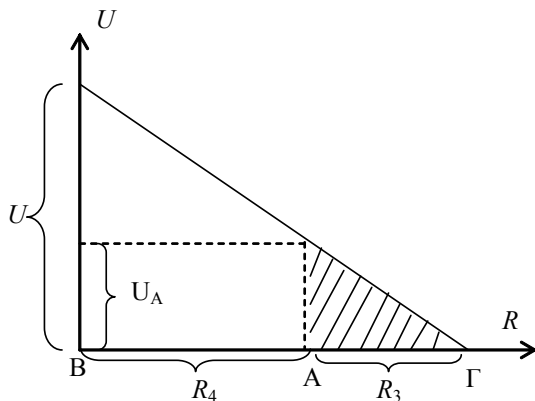


Рис. 1.9. График падения напряжения вдоль ветви $R_4—R_3$

$$U_B = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.15)$$

Откуда:

$$U_{AB} = U \left(\frac{U \cdot R_3}{R_4 + R_3} - \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) = U \left(\frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \right). \quad (1.16)$$

Для нахождения сопротивления “короткого замыкания” $R_{кз}$ перестроим схему с учётом замыкания точек В и Г (рис. 1.10).

Схема состоит из двух участков - верхнего и нижнего, соединенных последовательно. Каждый из них содержит по два резистора, соединенных параллельно. Тогда общее сопротивление схемы:

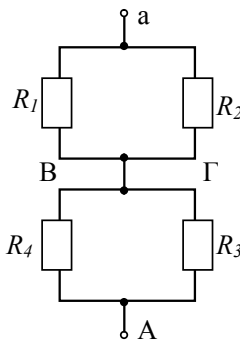


Рис. 1.10. Мостовая схема с учетом замыкания точек В и Г

$$R_{кз} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3 \cdot R_4}{R_4 + R_3} . \quad (1.17)$$

Для удобства расчетов примем условие: $R_2 = R_3 = R_4 = R$. Это, конечно, ограничит применение выведенной формулы, но в большинстве неуравновешенных мостовых схем сопротивления трёх плеч действительно выбираются равными. Кроме того, будем считать $R_1 \approx R$. Это предположение менее строгое, так как сопротивление R_1 неизвестно, его-то мы и хотим определить. Будем применять это приближенное равенство только в выражениях для суммы или произведения, что даст небольшую ошибку. С учётом этого, выражения (1.16) и (1.17) запишутся в виде:

$$U_{AB} = U \frac{R_1 - R}{4 \cdot R} , \quad (1.18)$$

$$R_{кз} = R . \quad (1.19)$$

Подставив (1.18) и (1.19) в выражение для тока (1.12), имеем:

$$i = U \frac{R_1 - R}{4 \cdot R (R + R_g)} . \quad (1.20)$$

Из этой формулы можно определить величину неизвестного сопротивления R_1 , зная значение тока в измерительной диагонали, сопротивление R трёх других плеч моста и внутреннее сопротивление гальванометра R_g .

1.4. Уравновешенный термометр сопротивления

Мостовые измерительные схемы можно применять для измерения сопротивления терморезисторов или термисторов и, соответственно, для измерения температуры. В этом случае датчик, обычно терморезистор, размещается в той точке, где предполагается измерять температуру, а вся остальная схема монтируется в помещении и соединяется с датчиком проводной связью (рис. 1.11).

Включив схему с помощью ключа К, наблюдатель уравнивает мостовую схему резистором R_2 , т.е. добивается нулевого показания гальванометра. Тогда с учетом уравнений (1.10) и (1.11) можно написать:

$$R_0 (1 + \alpha t) \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 , \quad (1.21)$$

откуда следует:

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_2 \cdot R_4}{R_3 \cdot R_0} - 1 \right). \quad (1.22)$$

Уравнение (1.22) обычно используют только при градуировке термометра. Для измерений температуры пользуются шкалой, нанесенной около ручки регулировки R_2 .

Теперь определим чувствительность уравновешенного термометра сопротивления. Выходной величиной для уравновешенного термометра сопротивления является положение ручки резистора R_2 или сама величина R_2 , а входной – температура. Тогда, согласно определению, чувствительность уравновешенного термометра сопротивления:

$$S = \frac{dR_2}{dt}. \quad (1.23)$$

Выразив из (1.21) R_2 и продифференцировав полученное выражение, имеем:

$$S = \alpha \frac{R_0 \cdot R_3}{R_4} \approx \alpha \frac{R_t \cdot R_3}{R_4} = \alpha \cdot R_2. \quad (1.24)$$

Поскольку пользователь обычно заинтересован в повышении чувствительности прибора, сформулируем требования для повышения чувствительности уравновешенного термометра сопротивления.

1. Терморезистор должен быть изготовлен из материала с большим температурным коэффициентом изменения сопротивления α .

2. Значение R_4 должно быть выбрано возможно более малым.

3. Значение R_2 должно быть выбрано возможно большим (с учетом формулы (1.11)).

Обычно значение резистора R_3 выбирают примерно равным R_0 . Значение R_2 выбирают на порядок больше R_0 , а R_4 на порядок меньше.

Погрешности уравновешенного термометра сопротивления

Разумеется, все инерционные погрешности (раздел 1.1) присущи уравновешенному термометру сопротивления. Но сейчас перечислим лишь специфические погрешности, присущие только этому типу термометров и дадим рекомендации для их устранения или уменьшения.

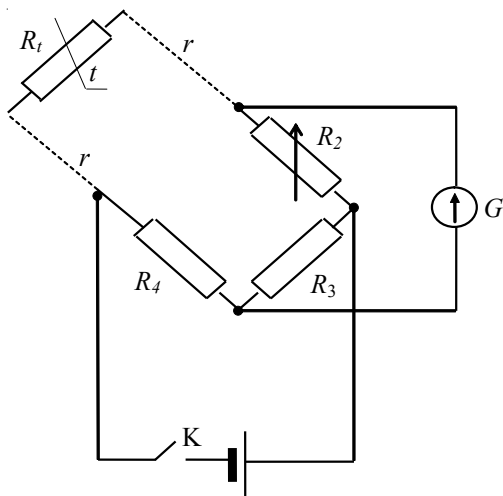


Рис. 1.11. Уравновешенный термометр сопротивления

1. Нагревание датчика электрическим током.

Для уменьшения этой погрешности можно рекомендовать следующие приемы:

- Уменьшение ЭДС питания схемы. Практически для питания таких схем используют напряжение 1 - 5 В.

- Увеличение значения сопротивления терморезистора R_t , что ведет к уменьшению тока, нагревающего терморезистор. Для метеорологических измерений используют терморезисторы, обладающие сопротивлением несколько сотен ом.

- Аспирация датчика потоком воздуха, приводящая к отводу избыточного тепла.

- Применение для измерений импульсного тока с малой длительностью импульсов. При использовании современных быстродействующих измерительных приборов длительность импульсов может быть доведена до нескольких микросекунд. Это практически полностью исключает нагрев датчика.

Важно, чтобы измеряющий прибор успел бы зафиксировать значение тока. Это возможно, если вместо стрелочного гальванометра применить современные быстродействующие цифровые измерительные приборы.

2. Изменение температуры идущих к датчику проводов.

Поскольку датчик R_t находится обычно достаточно далеко от прибора, то длина подводящих проводов (пунктир на рис. 1.11) может достигать

несколько десятков метров, а сопротивление каждого из них (r) - нескольких ом. Сопротивление этих проводов также подвергается температурному изменению. Но так как обычно температура различных участков проводов неодинакова, то учесть изменение их сопротивления практически невозможно. Это приводит к погрешности измерения температуры, так как неучтённое сопротивление проводов складывается с сопротивлением датчика. Для уменьшения этой погрешности применяются следующие приемы:

- Применение высокоомных датчиков $R_t \gg 2r$. Тогда сопротивление проводов и его изменения будут незначительны по сравнению с R_t .

- Изготовление подводящих проводов из константана. Тогда их сопротивление будет практически постоянным и может быть учтено, как постоянное слагаемое. К сожалению, константан является достаточно дорогим материалом.

- Применение специальной схемы (рис. 1.12), которая соединена с датчиком не двумя проводами, как на рисунке 1.11, а тремя. По этой причине схема получила название *трёхпроводной*.

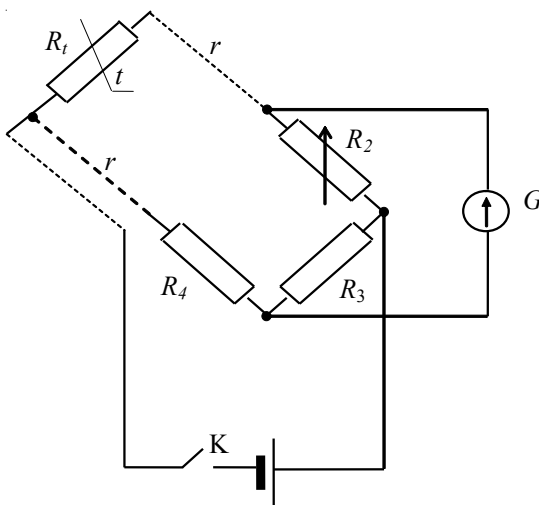


Рис. 1.12. Трёхпроводная схема термометра сопротивления

Сравним её с двухпроводной. В двухпроводной схеме (рис. 1.11) оба провода входят в одно плечо с датчиком, поэтому уравнение баланса для неё имеет вид:

$$(R_t + 2r) \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4. \quad (1.25)$$

В трёхпроводной схеме изменена диагональ питания и поэтому один из проводов переходит в другое плечо. Уравнение баланса для неё имеет вид:

$$(R_i + r) \cdot R_3 = R_2 \cdot (R_4 + r). \quad (1.26)$$

Если сопротивление двух проводов изменяется одновременно, то уравнение (1.25) нарушается существенно, т.к. величина r входит только в левую часть уравнения. В уравнении (1.26) изменяются обе части, поэтому оно нарушается гораздо меньше. Поэтому погрешность измерений трёхпроводной схемы гораздо меньше.

Что касается третьего провода, то он вообще не входит в плечи моста. Следовательно, изменение его сопротивления никак не сказывается на уравнении (1.26), а значит, и на результатах измерения.

1.5. Следящие системы с отрицательной обратной связью. Автоматически уравнивающийся термометр сопротивления

В предыдущем разделе мы рассмотрели уравновешенный термометр сопротивления. Измерять температуру с его помощью неудобно - ведь каждый раз при изменении температуры требуется настройка регулируемого сопротивления. Процесс измерения затрудняется и затягивается. Было бы желательно поручить настройку какому-либо автомату, а наблюдатель в этом случае только отмечал бы положение стрелки на шкале. Можно сделать ещё удобнее: автоматически записывать показания термометра, например на ленте самописца. В этом случае наблюдателю остается только анализировать показания термометра.

Такие автоматы существуют и сейчас мы должны понять принцип их действия. Главное в них - способность к *самонастройке*, это реализуется отрицательной обратной связью. Поэтому рассмотрим, прежде всего, блок-схему следящей системы с отрицательной обратной связью (рис. 1.13).

Прежде всего выделим некий *источник информации*, т.е. интересующий нас объект. Для метеоролога таким источником информации является атмосфера - или, по крайней мере, объём воздуха, в котором проводятся измерения. Измеряемый параметр, например, температура, воздействует на *измерительную систему*. Такой системой может быть мостовая схема с терморезистором. Параметры этой измерительной системы изменяются при изменении измеряемого параметра. Например, параметры

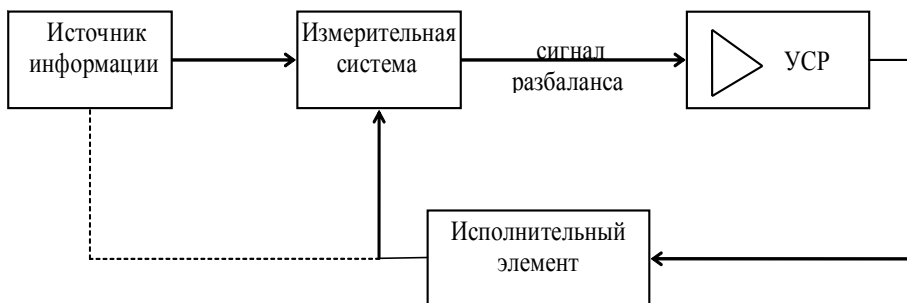


Рис. 1.13. Блок-схема следящей системы

мостовой схемы изменяются при изменении температуры: изменяется сопротивление терморезистора, схема становится неуравновешенной, появляется ток в измерительной диагонали моста. Будем говорить, что параметры измерительной системы должны соответствовать значению измеряемого параметра. Если же такого соответствия нет, то измерительная система генерирует некий сигнал: ток, напряжение или любую другую физическую величину. Поскольку этот сигнал генерируется только в случае несоответствия параметров измерительной системы и измеряемой величины, назовем его *сигналом разбаланса*. Сигнал разбаланса поступает на *усилитель сигнала разбаланса (УСР)* и после усиления - на *исполнительный элемент*. Задача исполнительного элемента - изменить параметры измерительной системы. Пока на исполнительный элемент поступает команда - сигнал разбаланса - он будет изменять параметры измерительной системы. Но в результате этих изменений параметры измерительной системы становятся соответствующими измеряемой величине. Тогда сигнал разбаланса исчезает и исполнительный элемент прекращает свою работу.

Мы видим, что система сама себя настраивает, потому что с помощью сигнала разбаланса изменяются параметры измерительной системы, которая сама и генерирует этот сигнал! Налицо, таким образом, *обратная связь* - сигнал разбаланса в измененном виде возвращается к системе, генерирующей его. Будем говорить, что эта обратная связь *отрицательная*, так как в результате её действия сигнал разбаланса исчезает. Если бы он усиливался, то такая обратная связь была бы положительной. Положительная обратная связь также применяется в измерительной технике.

Возможна и другая цепь обратной связи. Исполнительный элемент воздействует не на измерительную систему, а на источник информации,

например, понижает температуру замкнутого объёма воздуха. Когда температура воздуха в объёме превысит желаемую величину, исполнительный элемент понижает её, а когда она становится равной той, на которую настроены параметры измерительной системы, исполнительный элемент выключается. Так работает, например, домашний холодильник. На рис. 1.13 эта связь показана пунктиром.

Следящие системы с отрицательной обратной связью широко применяются в технике. По этому же принципу работают системы автоматической стыковки космических аппаратов, автопилоты самолетов и т.п. Такие системы будут очень часто встречаться в метеорологических измерительных приборах.

Теперь рассмотрим, как можно реализовать этот принцип для измерения температуры с помощью автоматически уравнивающегося термометра сопротивления. Одна из возможных схем такого термометра показана на рис. 1.14.

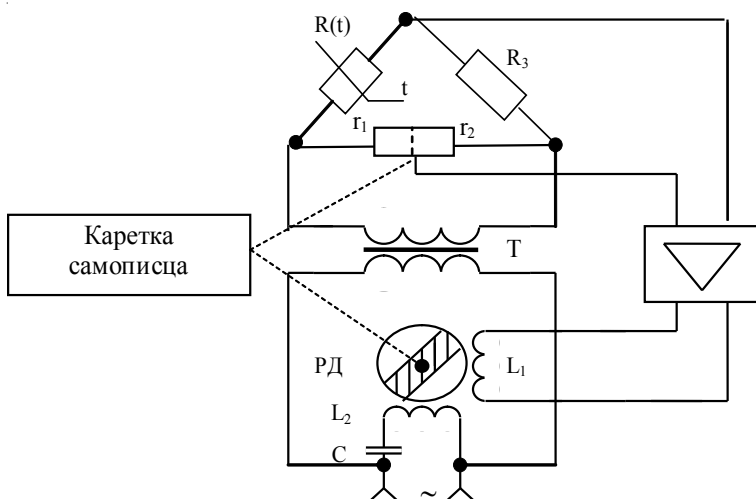


Рис. 1.14. Принципиальная схема автоматически уравнивающегося термометра сопротивления

Наиболее важной частью схемы является мост, образованный резисторами $R(t)$, R_3 , r_1 и r_2 (две части одного переменного резистора). Отличие от классической мостовой схемы состоит в том, что в данном случае при настройке одновременно изменяются два плеча - r_1 и r_2 . Они объединены одним переменным резистором, он называется *реохордом*.

Итак, изменяя плечи реохорда $r_1 - r_2$ (две части одного переменного резистора), можно уравновесить мост. Как же это происходит?

Прежде всего, обратим внимание, что схема питается переменным током от источника, показанного значком “~” в нижней части схемы. Это может быть, например, сетевое питание. Но, как мы знаем, для питания мостовой схемы нужно использовать пониженное напряжение, поэтому в цепь питания включен понижающий трансформатор Т. Пониженное напряжение подаётся на мостовую схему.

Предположим, что схема вышла из положения равновесия, например, в результате изменения температуры. Тогда в измерительной диагонали схемы будет сигнал разбаланса - переменное напряжение. Оно усиливается усилителем и подаётся на *реверсивный двигатель* (РД), являющийся исполнительным элементом схемы. Реверсивный двигатель состоит из ротора и статора (ротор - вращающаяся часть двигателя, статор - неподвижная часть). Ротор представляет собой железный сердечник, а статор состоит из двух обмоток (катушек) L_1 и L_2 . Ротор вращается только в том случае, когда на обе обмотки подано переменное напряжение, причём напряжения на обмотках должны быть сдвинуты по фазе на 90° . Первоначальный сдвиг фазы уже есть - его обеспечивает конденсатор C в цепи питания обмотки L_2 . Значит, когда на обмотку L_1 поступит сигнал разбаланса, двигатель будет вращаться. Он будет передвигать *каретку самописца*, перо которой вычерчивает линию на бумаге. Вместе с ней будет двигаться и реохорд $r_1 - r_2$, уравнивая мостовую схему. Когда равновесие моста будет достигнуто, сигнал разбаланса станет равным нулю, двигатель перестанет вращаться, реохорд прекратит свое движение, а перо каретки самописца остановится на отметке, соответствующей температуре в данный момент. При изменении температуры изменится сопротивление терморезистора $R_{(t)}$, снова возникнет сигнал разбаланса, что приведёт к движению реверсивного двигателя и уравниванию моста в новом положении реохорда и каретки самописца.

Таким образом, автоматически уравнивающийся термометр сопротивления представляет собой пример следящей схемы с отрицательной обратной связью.

Рассмотрим теперь вопрос: почему реверсивный двигатель вращается в разные стороны в зависимости от того, в какую сторону изменяется температура? Ведь очевидно, что если температура увеличивается, то двигатель должен вращаться в одну сторону, а если уменьшается - то в другую. Соответственно изменяется и направление движения каретки самописца.

Вообще говоря, направление движения реверсивного двигателя определяется *знаком разности фаз* напряжений на обмотках L_1 и L_2 .

На рис. 1.15 представлены графики возможных напряжений на обмотках (кривые 1 и 2, сдвинутые по фазе на 90°). (Будем называть такие графики *эпюрами*). Очевидно, что напряжение на обмотке L_2 (рис. 1.15, кривая 2) не может зависеть от изменения температуры, так как поступает прямо с источника питания. Следовательно, для того чтобы обеспечить изменение направления вращения реверсивного двигателя, напряжение на обмотке L_1 должно изменяться по фазе на 180° (кривая 1') в зависимости от того, увеличивается температура или уменьшается.

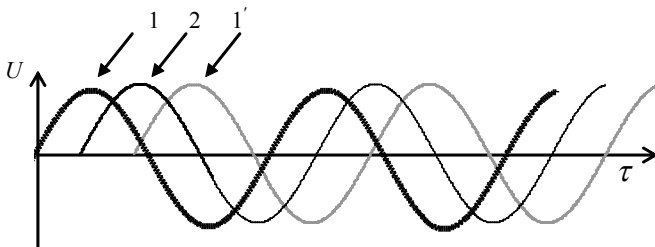


Рис. 1.15. Эпюры напряжения на обмотках реверсивного двигателя

Докажем это. Итак, предположим, что мост вышел из равновесия в результате увеличения температуры. Предположим также, что в данный момент времени напряжение на левой вершине моста положительно. Тогда для тока из левой вершины возможны два пути - через сопротивление $R_{(i)}$ или через часть реохорда r_1 . Сопротивление $R_{(i)}$ возросло в результате увеличения температуры, следовательно, больший ток пойдёт через r_1 и в нижней части измерительной диагонали будет положительное напряжение.

В обратном случае - если температура уменьшилась - сопротивление $R_{(i)}$ тоже уменьшится, больший ток идет через $R_{(i)}$ и в нижней части измерительной диагонали будет отрицательное напряжение. Следовательно, в измерительной диагонали должен меняться знак в зависимости от направления изменения температуры, а в случае переменного напряжения - его фаза - кривые 1 и 1' на рис.1.15.

1.6. Неуравновешенный термометр сопротивления

Как мы уже знаем, мостовая схема может быть и неуравновешенной. В этом случае ток в измерительной диагонали не равен нулю и зависит

от измеряемого сопротивления. Если в качестве измеряемого сопротивления применить терморезистор, то ток будет зависеть от температуры. Принципиальная схема неуравновешенного термометра сопротивления показана на рис. 1.16. Она почти не отличается от схемы уравновешенного термометра сопротивления (рис. 1.11).

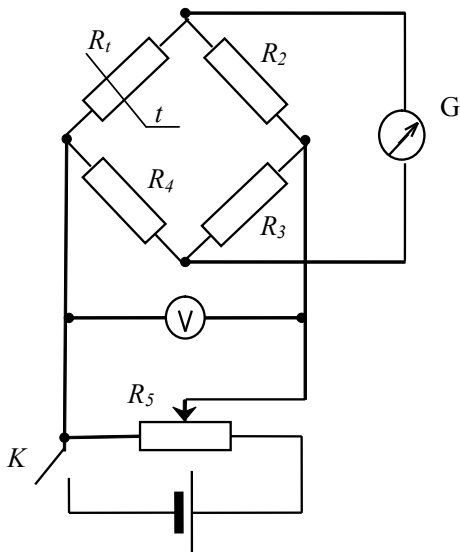


Рис. 1.16. Принципиальная схема неуравновешенного термометра сопротивления

Напишем выражение для тока в измерительной диагонали моста:

$$i = \frac{U \cdot (R_t - R)}{4R \cdot (R_g + R)}, \quad (1.27)$$

где $R = R_2 = R_3 = R_4$;

U - напряжение, подаваемое в диагональ питания моста;

R_g - внутреннее сопротивление измерительного прибора.

С учётом зависимости сопротивления терморезистора R_t от температуры эта формула (1.27) приобретает вид:

$$i = \frac{U \cdot (R_0(1 + \alpha \cdot t) - R)}{4R \cdot (R_g + R)}. \quad (1.28)$$

Теперь введём понятие чувствительности неуравновешенного термометра сопротивления. Выходным параметром в данном случае

является сила тока i , следовательно, согласно общему определению чувствительности прибора:

$$S = \frac{di}{dt} = \frac{UR_0 \cdot \alpha}{4R \cdot (R_g + R)} \approx \frac{U \cdot \alpha}{4(R_g + R)} \quad (1.29)$$

Последнее приближенное равенство можно написать с учетом $R_0 \approx R$. Итак, для увеличения чувствительности термометра следует брать терморезистор, изготовленный из материала с большим коэффициентом α . Анализируя формулу (1.29), можно подумать, что для увеличения чувствительности следует увеличивать напряжение питания U , но мы уже знаем, что этого делать нельзя! При увеличении напряжения питания возрастает нагрев терморезистора электрическим током и термометр будет измерять температуру с большой погрешностью.

Эта дилемма - “чувствительность или погрешность?” - очень часто встает при конструировании измерительных приборов. Она решается всегда одинаково - предпочитают создать прибор с малой погрешностью, пусть даже ценой уменьшения чувствительности. Действительно, кому нужно сверхточное измерение, если известно, что оно сделано с большой погрешностью?

Перечислим теперь *специфические погрешности неуравновешенного термометра сопротивления*. Две из них мы уже знаем: это нагревание датчика электрическим током и изменение сопротивления идущих к датчику проводов. Пути уменьшения этих погрешностей мы также изучили в разделе 1.4.

Третья погрешность – изменение температуры измерительного прибора и, как следствие, изменение его внутреннего сопротивления. Для уменьшения этой погрешности можно рекомендовать те же способы, которые были перечислены выше для ликвидации нагрева датчика.

Четвертая погрешность - возможное изменение ЭДС источника питания. Действительно, формула (1.28) показывает, что значение тока прямо зависит от подаваемого на мост напряжения. Вот это последнее обстоятельство и открывает путь ликвидации погрешности - ведь под буквой U в формуле имеется в виду не ЭДС источника питания, а только напряжение, подаваемое в диагональ питания моста! Его можно регулировать, для этого в схему (рис. 1.16) включен потенциометр R_5 . Перемещая ползунок потенциометра вправо, можно увеличивать напряжение питания моста в случае, если ЭДС источника питания почему-либо уменьшилась.

Разумеется, напряжение питания моста необходимо контролировать.

Для этого в схему включен вольтметр V .

Однако два измерительных прибора (гальванометр и вольтметр) в такой простой схеме - это непозволительная роскошь, стоимость прибора сильно возрастет. Чаще делают по-другому.

С помощью ключа (на рис. 1.16 эта часть не показана) вместо сопротивления R_i включают другое, постоянное сопротивление (контрольное сопротивление R_k). Тогда прибор, включённый в измерительную диагональ моста, покажет ток, значение которого легко определить по формуле (1.27) путём подстановки R_k вместо R_i :

$$i = \frac{U \cdot (R_k - R)}{4R \cdot (R_g + R)} \quad (1.30)$$

Видно, что в формулу (1.30) входят лишь постоянные величины, следовательно, значение тока i определяется напряжением U . Если известно значение напряжения, при котором производилась градуировка термометра, то известно и значение контрольного тока!

Чаще всего это значение отмечают на шкале измерительного прибора специальной риску. Если при включении контрольного сопротивления измерительный прибор показывает отмеченное значение тока, то напряжение U соответствует норме, а если нет - его регулируют потенциометром R_5 , добиваясь того, чтобы стрелка стала на отмеченную риску. Так осуществляется контроль напряжения питания в дистанционной метеорологической станции М-49.

1.7. Дифференциальный термометр сопротивления

Иногда в метеорологии необходимо измерить не само значение температуры, а разность двух её значений, например, разность между сухим и смоченным термометрами. Для этого также можно применить мостовую схему – рис. 1.17.

В двух смежных плечах мостовой схемы включены абсолютно одинаковые терморезисторы $R(t_1)$ и $R(t_2)$. Сопротивления двух других плеч также выбираются равными: $R_3 = R_4$.

Разумеется, при равенстве температур $R(t_1) = R(t_2)$, и мостовая схема находится в равновесии, ток в измерительном приборе равен нулю. Но если $t_1 \neq t_2$, то в измерительной диагонали появляется ток, значение которого легко вывести из формулы (1.28), приняв в числителе значение $R = R_0(1 + \alpha t_2)$:

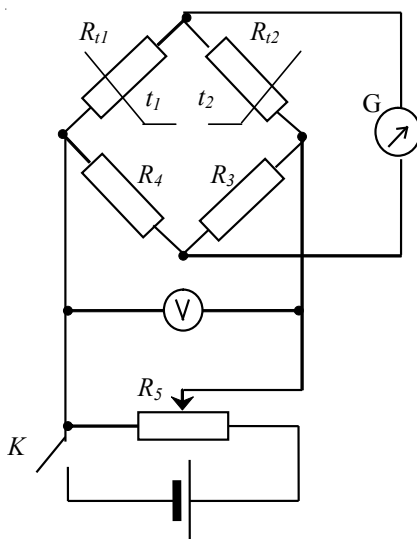


Рис. 1.17. Принципиальная схема дифференциального термометра сопротивления

$$i = \frac{U \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (t_1 - t_2)}{4R(R_g + R)} \quad (1.31)$$

Или, с учетом $R_0 \approx R$:

$$i = \frac{U \cdot \alpha \cdot (t_1 - t_2)}{4(R_g + R)} \quad (1.32)$$

Таким образом, ток в измерительной диагонали связан прямой зависимостью с разностью температур. Шкала измерительного прибора в этом случае градуируется в единицах разности температур.

Разумеется, возможны иные варианты: уравновешенный дифференциальный термометр сопротивления или автоматически уравнивающийся дифференциальный термометр. Учащимся предлагается в качестве самостоятельного упражнения начертить возможные схемы таких приборов.

1.8. Термоэлектрические явления. Термопара и термобатарея

Для измерения разности температур можно воспользоваться устройством, действующим на основе *термоэлектрических явлений*, т. е. явлений, возникающих на границе двух проводников при разной тем-

пературе этой границы. Рассмотрим коротко физическую основу термоэлектрических явлений.

Представим себе, что два металлических проводника соединены вместе (рис. 1.18).

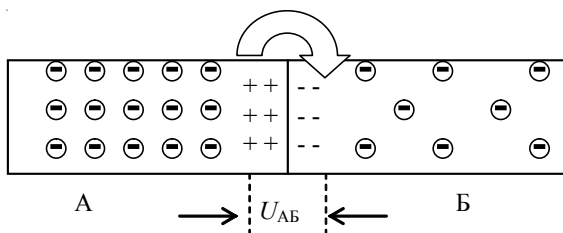


Рис. 1.18. Образование граничной разности потенциалов при соединении двух проводников с разной плотностью электронов

Пусть плотность свободных электронов ($\ominus$) в этих проводниках различна, например, плотность электронов в проводнике А больше электронной плотности в проводнике Б. Тогда на границе свободные электроны из проводника А будут переходить в проводник Б. Разумеется, возникнет и обратный поток электронов - из Б в А, но в силу меньшей электронной плотности он будет слабее. Следовательно, в приграничной области в проводнике А возникнет зона, где плотность электронов будет меньше средней электронной плотности, характерной для этого проводника. Иначе говоря, эта зона будет иметь положительный заряд. По другую сторону границы - в проводнике Б - возникнет зона с отрицательным зарядом. Возникнет пограничная разность потенциалов U_{AB} . Эта разность потенциалов тем больше, чем больше поток электронов из одного металла в другой. Величина потока электронов связана с их подвижностью, а подвижность электронов тем больше, чем больше температура спая. Таким образом, пограничная разность потенциалов оказалась связанной с температурой спая.

Возникает вопрос: нельзя ли измерить величину U_{AB} и на основании этого измерить температуру спая? К сожалению, стандартными приборами этого сделать нельзя. Для измерения напряжения пришлось бы создать замкнутую цепь, для чего к концам проводников А и Б присоединить другие проводники, на границе с которыми также наблюдалась бы пограничная разность потенциалов. Измерительный прибор измерял бы алгебраическую сумму всех пограничных напряжений, которая, как это ни печально, равна нулю, если температура всех спаев одинакова. Это легко понять: в

противном случае, взяв несколько проводников и соединив их друг с другом, мы получили бы ток без затраты энергии, что, как известно, невозможно.

Но если измерение температуры с помощью этого явления невозможно, то возможно измерение *разности температур* между двумя спаями, соединенными так, как показано на рис. 1.19.

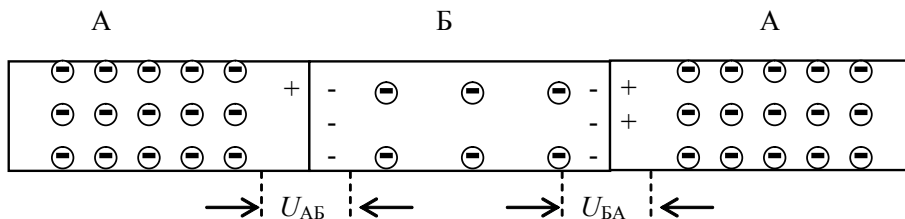


Рис. 1.19. Образование термоэлектрической разницы потенциалов в термопаре

В этом случае проводник Б оказывается посередине между двумя проводниками А. Разность потенциалов, возникающая на границе АБ и БА, должна суммироваться с противоположными знаками, т.е. на концах такой цепи возникает напряжение, равное разности пограничных напряжений. Если температура спаев АБ и БА одинакова, то, разумеется, эта разность равна нулю, но при разной температуре спаев мы получаем отличную от нуля величину. Вот её уже можно измерить! Ведь при создании замкнутой внешней цепи суммарная разность потенциалов в ней равна нулю плюс разность пограничных потенциалов АБ и БА. Естественно, что эта разность потенциалов (назовем ее *термоэлектрической*) связана с разностью температур двух спаев. Соответственно, в замкнутой цепи возникнет электрический ток. Это явление уже не противоречит закону сохранения энергии, так как источником энергии является разность температур двух спаев (подобно тому, как источником энергии в тепловых машинах является разность температур нагревателя и холодильника).

Мы пришли к очень важному выводу. Сформулируем его в виде закона, получившего название *закон Зеебека*.

В замкнутой цепи, содержащей два спая двух разнородных проводников, возникает электрический ток, пропорциональный разности температур этих спаев.

Изобразим эту замкнутую цепь в виде схемы на рис. 1.20, б. Такое устройство получило название *термопара*.



Рис. 1.20. Термопара а) спай термопары; б) схема

Закон Зеебека можно выразить формулой (1.33). Обозначив через e разность потенциалов, возникающую между спаями А и Б при разности температур в один градус, запишем:

$$i = \frac{e \cdot (t_1 - t_2)}{R_{\Sigma}}, \quad (1.33)$$

где i - протекающий по термопаре ток (термоток);

e - разность потенциалов (термоЭДС);

t_1 и t_2 - температура первого и второго спаев;

R_{Σ} - суммарное сопротивление всей цепи.

Другим термоэлектрическим законом является *закон Пельтье*. Сформулируем его.

Если по цепи, содержащей два спая двух разнородных проводников, пропустить электрический ток, то температура одного из проводников повысится, а второго - понизится.

Подчеркнём, что закон Пельтье полностью обратим по отношению к закону Зеебека! Это значит, что в результате термотока, возникающего при разности температур двух спаев (закон Зеебека) температура холодного спая несколько повысится, а теплого - понизится (закон Пельтье). В противном случае это противоречило бы закону сохранения энергии. Но в результате действия закона Пельтье разность температур между двумя спаями оказывается несколько меньше разности температур тех сред, в которые они помещены.

Величина e в формуле (1.33) зависит от электронной плотности как первого, так и второго проводника. Следовательно, эта величина должна быть указана для каждой пары проводников. Так как практически это невозможно, то в соответствующей таблице (Приложение 3) указывают величину e для всех металлов в паре с платиной (табличная термоЭДС).

Чтобы получить величину e для любой пары, нужно вычислить разность табличных термоЭДС соответствующих материалов. Обратим внимание, что табличная термоЭДС может иметь разный знак. Для того чтобы выбрать пару материалов, у которых e максимально велико, нужно выбрать такие материалы, для которых табличные величины термоЭДС имеют разный знак. Обычно значение табличной термоЭДС невелико и имеет порядок 10^{-5} в/град.

Нам уже ясно, что термопару можно использовать для измерения разности температур. Для этого нужно выходной измерительный прибор (гальванометр, например) проградуировать в единицах разности температур - в градусах. Это нетрудно сделать, используя формулу (1.33). Однако величина термотока для одной термопары невелика. Для того чтобы её повысить, применяют *термобатарею* - несколько термопар, соединённых последовательно. Схема такой термобатареи из n термопар приведена на рис. 1.21. Разнородные металлы обозначены линиями разной толщины.

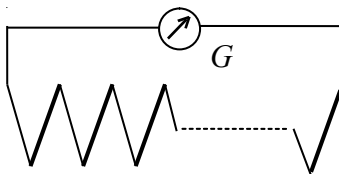


Рис. 1.21. Термобатарея

Температура верхних и нижних спаев различна. Обозначив через R_t сопротивление одной термопары, R_g - внутреннее сопротивление измерительного прибора и r - сопротивление соединительных проводов, напишем формулу для тока в цепи:

$$i = \frac{ne(t_1 - t_2)}{nR_t + R_g + r} \quad (1.34)$$

В знаменателе формулы (1.34) стоит общее сопротивление всей цепи, составленной из n термопар.

Из формулы (1.34) не ясно, как зависит ток i от количества термопар n , поскольку n стоит как в числителе, так и в знаменателе формулы. Для выяснения этого вопроса рассмотрим различные соотношения сопротивления входящих в цепь элементов.

1. Пусть сопротивление термобатареи мало по сравнению с сопротивлением остальных элементов: $nR_t \ll R_g + r$. Тогда малым сопротивле-

нием термобатареи можно пренебречь, и формула (1.34) принимает вид:

$$i = \frac{ne(t_1 - t_2)}{R_g + r} \quad (1.35)$$

2. Пусть сопротивление термобатареи велико по сравнению с другими элементами: $nR_t \gg R_g + r$. Тогда формула (1.34) примет вид:

$$i = \frac{e(t_1 - t_2)}{R_t} \quad (1.36)$$

В первом случае ток пропорционален количеству термопар. Во втором случае ток оказался вообще не зависящим от количества термопар. Очевидно, первый случай предпочтителен, поэтому на практике всегда стараются изготовить термобатарею с малым сопротивлением.

Практически термобатарея (или термопара) изготавливается следующим образом. Берут несколько кусков провода из двух различных металлов и спаивают или сваривают их друг с другом согласно схеме, представленной на рис. 1.21. Длина и диаметр проводов подбираются в соответствии с практически решаемой задачей. В метеорологических измерениях термопара и термобатарея применяются в актинометрических приборах.

Рассмотрим вопрос о чувствительности термопары и термобатареи. В соответствии с общим определением этого понятия, чувствительность термобатареи есть изменение термотока, соответствующее изменению разности температур между спаями на один градус, т.е. производная:

$$S = \frac{di}{d(t_1 - t_2)} = \frac{ne}{nR_t + R_g + r} \quad (1.37)$$

Для увеличения чувствительности необходимо пользоваться термобатареей, изготовленной из материалов с возможно большей термоЭДС (e), а также увеличивать количество термопар, соблюдая требование $nR_t \ll R_g + r$.

Теперь обсудим *специфические погрешности термопары и термобатареи*. Существует три основных погрешности.

1. Эффект Пельтье, из-за чего измеренная разность температур, как уже было сказано, несколько меньше истинной в результате протекания термотока.

2. Изменение внутреннего сопротивления измерительного прибора при изменении температуры окружающего воздуха и, как следствие, изменение измеряемого тока. Эта погрешность особенно существенна в актинометрических измерениях, так как измерительный прибор располагается вне помещения на актинометрической стойке.

3. Изменение сопротивления соединительных проводов при изменении температуры окружающей среды. Эта погрешность не столь велика, как первые две, поскольку провода обычно обладают малым сопротивлением и его изменения происходят в ничтожных пределах. Тем не менее упомянем и об этом.

Для устранения всех трёх погрешностей одновременно применяется *компенсационная схема* (рис. 1.22, а). Её смысл в том, что в цепь термопары подается ток i_2 от внешнего источника. Ток i_2 направлен навстречу термотоку i_1 . Если $i_1 = i_2$, то суммарный ток через гальванометр равен нулю. В этом случае погрешности исчезают - эффект Пельтье не проявляется, так как тока в цепи термопары нет, а изменение сопротивления проводов и гальванометра никак не сказывается на результатах измерения - ток-то равен нулю! Правда, возникает вопрос: а как же измерять величину термотока? В этом случае измеряют не термоток, а внешний ток с помощью микроамперметра. Зная величины сопротивления нагрузки R и сопротивления потенциометра R_1 , легко вывести уравнение, связывающее внешний ток с термотоком, а следовательно, с разностью температур спаев.

Внешний ток можно регулировать с помощью потенциометра R_1 . Вращая ручку потенциометра, наблюдатель добивается нулевого показания гальванометра, что соответствует компенсации токов. Затем измеряют внешний ток и рассчитывают разность температур.

Этот процесс может быть автоматизирован применением следящей системы, аналогичной той, которую мы уже рассмотрели в разделе 1.5.

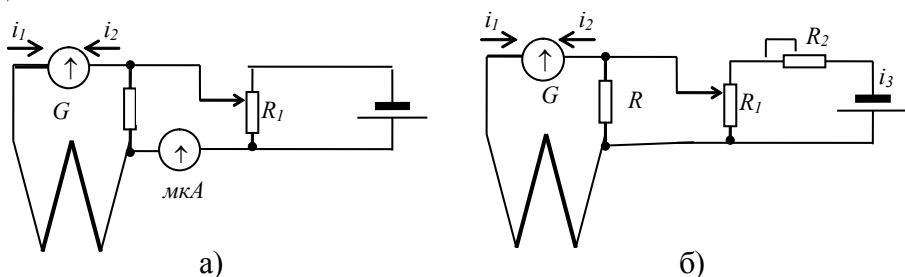


Рис. 1.22. Компенсационная схема

а) с двумя измерительными приборами; б) с одним измерительным прибором

Однако чаще поступают другим образом. Для того чтобы не применять второй измерительный прибор – микроамперметр, внешний ток вообще не измеряют (рис. 1.22, б). Для измерения используют шкалу, связанную с ручкой потенциометра. Ведь понятно, что каждому положению ручки потенциометра соответствует определенная величина термоЭДС и связанная с ней разность температур. Поэтому достаточно проградуировать эту шкалу в желаемых единицах - вольтах или градусах - и необходимость в применении второго измерительного прибора отпадает! Для повышения точности измерения применяют несколько соединенных между собой переменных резисторов, значение которых различаются в десять раз. Тогда наблюдатель сначала регулирует самый грубый резистор, затем последовательно более точные.

Такой метод требует лишь одного условия: необходимо, чтобы падение напряжения на потенциометре R_1 (или на всех соединенных резисторах потенциометра) было бы постоянным. В противном случае каждый раз при изменении падения напряжения на R_1 требуется новая градуировка шкалы. Это эквивалентно требованию постоянства тока в контуре $R_2 - R_1$. Обозначив этот ток через i_3 , легко найти падение напряжения на R_1 :

$$U_{R1} = i_3 \cdot R_1.$$

Следовательно, перед каждым измерением требуется контроль значения тока i_3 . Назовем его *рабочим током*. Для контроля рабочего тока можно применить тот же измерительный прибор, который используется для контроля нулевого значения тока в термопаре (разумеется, в схему понадобится ввести дополнительные изменения: ключ, шунтирующие резисторы и т.п.). Для регулировки рабочего тока в контур вводится дополнительное переменное сопротивление R_2 (рис. 1.21, б), с помощью которого наблюдатель устанавливает рабочий ток перед каждой серией измерений.

1.9. Деформационные термометры

Деформационные термометры основаны на свойстве теплового расширения твердых тел - прежде всего, металлов. Известно, что длина металлической пластинки l изменяется с температурой по закону:

$$l = l_0(1 + \beta \cdot t), \quad (1.38)$$

где l_0 - длина пластинки при 0°C ;

β - температурный коэффициент линейного расширения металла;

t - температура по шкале Цельсия.

Таким образом, измеряя длину пластинки, можно узнать температуру среды, в которой она находится. Однако величина коэффициента β невелика - порядка 10^{-5} K^{-1} (Приложение 4). Поэтому изменение длины при изменении температуры в диапазоне нескольких десятков градусов ничтожно, и практически измерение температуры таким методом невозможно.

Для практического использования деформационного метода соберём конструкцию из двух спаянных по всей длине пластинок из материалов с различными коэффициентами линейного расширения (рис. 1.23). При изменении температуры пластинки изменяют свою длину не одинаково - предположим, верхняя пластинка расширяется при нагревании больше нижней. Так как пластины не могут двигаться друг относительно друга, то вся конструкция изгибается, как показано на рисунке. Угол изгиба зависит от изменения температуры.

Рассмотрим теперь, как связан угол изгиба всей такой конструкции (назовем её *биметаллической пластиной*) от температуры. Нас интересует угол α между касательной и хордой. Предполагая, что пластина изгибается по кривой, близкой к окружности, свяжем угол α с центральным углом γ . Из геометрии известно, что $\alpha = \gamma / 2$.

Длина верхней пластинки l_1 связана с центральным углом уравнением:

$$l_1 = \gamma \cdot R, \quad (1.39)$$

где R - радиус, расстояние от центра (0) до *середины толщины верхней пластины*.

Точно также напишем выражение для длины нижней пластинки, l_2 :

$$l_2 = \gamma \cdot \left(R - \frac{d}{2}\right), \quad (1.40)$$

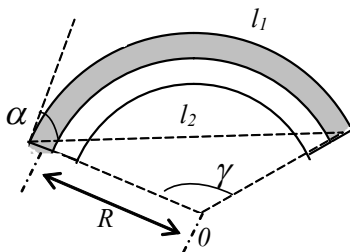


Рис. 1.23. Биметаллическая пластинка

где d (1.40) - толщина пластины (ведь расстояние от центра (0) до середины нижней пластины меньше, чем до верхней на величину $d/2$).

Вычтем уравнение (1.40) из уравнения (1.39) почленно. Получим:

$$l_1 - l_2 = \gamma \cdot \frac{d}{2}. \quad (1.41)$$

С другой стороны, принимая коэффициенты линейного расширения для первой и второй пластин β_1 и β_2 , применим уравнение (1.38) для каждой пластины и вычтем почленно полученные выражения для l_1 и l_2 . Получим:

$$l_1 - l_2 = l_0 \cdot t(\beta_1 - \beta_2). \quad (1.42)$$

Приравняв полученные выражения (1.41) и (1.42), с учётом соотношения $\alpha = \gamma / 2$ получим:

$$\alpha = \frac{l_0 \cdot t \cdot (\beta_1 - \beta_2)}{d}. \quad (1.43)$$

Видно, что угол изгиба пластины α однозначно связан с температурой. Значит, если биметаллическую пластину закрепить с одного конца, а к другому концу прикрепить стрелку, передвигающуюся около шкалы, то такое устройство может быть применено для измерения температуры.

Такой деформационный термометр применяется в *термографах* - приборах для записи температуры. Биметаллическая пластинка соединена системой рычагов с легкой стрелкой, имеющей на конце чернильницу. Чернильница прижимается к барабану, вокруг которого оборачивают бумажную ленту с делениями. Барабан вращается с помощью часового механизма, совершая один оборот в сутки (суточный термограф) или в неделю (недельный термограф). Наблюдателю остается сменить ленту в положенные сроки и анализировать изменение температуры за прошедший период времени.

Теперь выведем формулу для чувствительности деформационного термометра. Взяв в качестве выходной величины угол изгиба пластины α и применив общее определение чувствительности прибора, получим:

$$S = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{l_0(\beta_1 - \beta_2)}{d}. \quad (1.44)$$

Уравнение (1.44) позволяет дать рекомендации для увеличения чувствительности деформационного термометра. Перечислим их.

1. Использовать для изготовления биметаллической пластины материалы с максимально различными коэффициентами линейного расширения.
2. Биметаллическая пластина должна иметь как можно большую длину.
3. Пластина должна быть как можно более тонкой.

Второе условие довольно трудно применить на практике. Для уменьшения размеров датчика биметаллическую пластину иногда делают в виде спирали - так, например, был сделан датчик температуры в одном из первых радиозондов А-22. Что касается материалов для изготовления биметаллической пластины, то чаще всего применяются инвар и сталь.

Основным достоинством деформационных термометров является простота их изготовления и малая стоимость по сравнению с другими приборами. Тепловая инерция датчиков может быть небольшой - несколько секунд. К их недостаткам следует отнести отсутствие электрического сигнала, что затрудняет дистанционное использование деформационных термометров (в радиозонде А-22 для этой цели применялась механическая система с вращающимся кодовым сектором и сложной конфигурацией токопроводящих участков).

1.10. Радиационные термометры

В практике метеорологических измерений иногда встает задача измерения температуры объектов, доступ к которым абсолютно невозможен, например, измерение температуры земной поверхности с искусственного спутника или с самолета. Строго говоря, это задача пассивной (или активной) локации. Напомним, что принцип пассивной локации заключается в регистрации какого-либо сигнала, генерируемого самим объектом и зависящего от измеряемого параметра. Какой же сигнал, зависящий от температуры, может генерироваться материальным телом?

Это тепловое электромагнитное излучение. Известно, что любое тело - твердое, жидкое или газообразное, температура которого отлична от абсолютного нуля, излучает электромагнитные волны. Наиболее хорошо изучены законы излучения *абсолютно чёрных тел*, т.е. тел, которые поглощают все падающее на них электромагнитное излучение без отражения или преломления. На рис. 1.24 показан спектральный состав излучения абсолютно чёрных тел. Здесь E_λ - излучательная способность, т.е. поток излучения с единичной площади на длине волны λ ; T - температура по

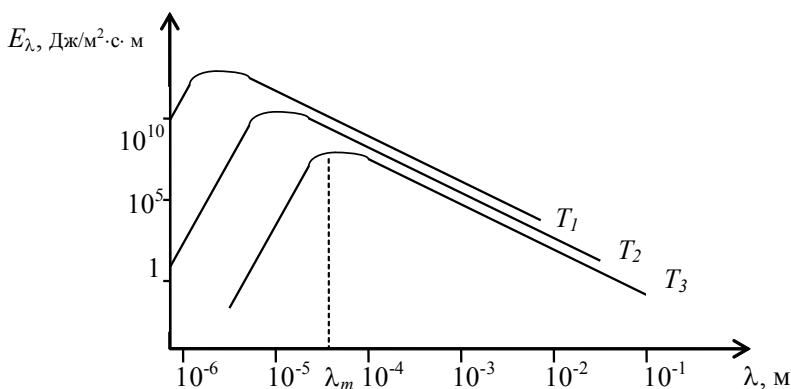


Рис. 1.24. Спектр излучения абсолютно черных тел

шкале Кельвина ($T_1 > T_2 > T_3$); λ_m - длина волны, соответствующая максимуму излучения. Напомним основные законы излучения абсолютно чёрных тел.

1. **Закон Вина.** Длина волны λ_m , (рис. 1.24), смещается при нагревании в *коротковолновую сторону* согласно уравнению:

$$\lambda_m \cdot T = C, \quad (1.45)$$

где T – температура;

C – константа ($C=2897,8$ мкм·К).

Это легко понять из простого опыта: представим себе нагревание металлического предмета в пламени горелки. Нагретый до значительной температуры, он становится видимым и приобретает сначала красный цвет (длинноволновое излучение в видимой области спектра). При дальнейшем нагревании его цвет изменяется - он становится желто-зеленым, а затем голубоватым (коротковолновое излучение). А что же при обычной, комнатной температуре? Анализ закона Вина приводит к заключению, что тело излучает в инфракрасной, т.е. невидимой глазом области спектра. Специальные приемники инфракрасного излучения дают возможность его обнаружить.

2. **Закон Стефана-Больцмана.** Интегральное излучение (E) во всём диапазоне длин волн пропорционально четвертой степени температуры:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} \cdot d\lambda = a\sigma \cdot T^4, \quad (1.46)$$

где E_λ - излучение на данной длине волны;

λ - длина волны;

σ - постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴);

a - коэффициент серости, показывающий близость свойств объекта к абсолютно чёрному телу, для которого $a = 1$.

На рис. 1.24. это отражается в том, что площадь под кривой увеличивается с ростом температуры.

3. Закон Планка. Этот закон описывает изменение потока излучения E_λ в зависимости от длины волны и температуры:

$$E_\lambda = \frac{2\pi \cdot hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1}, \quad (1.47)$$

где h - постоянная Планка ($6,626 \cdot 10^{-6}$ Дж с);

c - скорость света в вакууме;

k - постоянная Больцмана ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Для дальнейших преобразований формулу (1.47) будем представлять в виде:

$$E_\lambda = \frac{A}{\lambda^5} \cdot \frac{B}{e^{\frac{C}{\lambda T}} - 1}, \quad (1.48)$$

где A , B и C - константы, значение которых ясно из сравнения формул (1.47) и (1.48).

Анализируя законы излучения, можно предложить три типа радиационных термометров.

1. *Термометр максимального излучения* основан на законе Вина. Измеряемая характеристика - величина λ_m , т.е. длина волны, соответствующая максимуму излучения. Это может быть интерпретировано, как *цвет* интересующего нас объекта. Напомним, что при температуре, соответствующей диапазону метеорологических измерений, λ_m находится в инфракрасной (ИК) области.

2. *Термометр интегрального излучения* основан на законе Стефана-Больцмана. Измеряемая характеристика - величина интегрального излучения (E) во всем спектральном диапазоне.

3. *Термометр селективного излучения* основан на законе Планка. Измеряемая характеристика - величина E_λ . Строго говоря, измеряется не E_λ , а интегральное излучение в узком *выбранном* спектральном диа-

пазоне (отсюда название термометра, от английского слова *select* - *выбирать*), т.е.:

$$E_{\lambda} \approx \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} \cdot d\lambda, \quad (1.49)$$

где λ_1 и λ_2 различаются очень незначительно.

Сравним все три типа термометров между собой по чувствительности. Но так как выходная характеристика их всех различна, то чувствительность термометров будет обладать разной размерностью. Поэтому сравним их относительную чувствительность. Применив определение относительной чувствительности (основные характеристики измерительных приборов, раздел 3) к предложенным типам термометров, выведем соответствующие формулы.

Относительная чувствительность термометра максимального излучения:

$$S_{R(m)} = \frac{1}{\lambda_m} \frac{d\lambda_m}{dT} = -\frac{1}{T}. \quad (1.50)$$

Относительная чувствительность термометра интегрального излучения:

$$S_{R(int)} = \frac{1}{E} \frac{dE}{dT} = \frac{1}{a\sigma \cdot T^4} \frac{d}{dT} (a\sigma \cdot T^4) = \frac{4}{T}. \quad (1.51)$$

Сравнивая формулы (1.50) и (1.51), можно сделать вывод, что термометры интегрального излучения в четыре раза более чувствительны, чем термометры максимального излучения. (Разумеется, нас интересует величина модуля чувствительности. Знак минус перед производной указывает на направление изменения выходной величины, что в очень малой степени отражается на конструкции прибора и совершенно не влияет на точность измерения).

Относительная чувствительность термометра селективного излучения:

$$S_{R(sel)} = \frac{1}{E_{\lambda}} \frac{dE_{\lambda}}{dT} = \frac{C}{\lambda \cdot T^2} \frac{1}{(1 - e^{-\frac{C}{\lambda T}})}. \quad (1.52)$$

Анализируя формулы (1.50), (1.51) и (1.52), заметим следующее. Относительная чувствительность всех термометров убывает при увеличении температуры. Чувствительность термометров максимального излучения при температуре около 300К равна $1/300$, т.е. порядка 10^{-3} . Для термометров интегрального излучения она, как уже сказано, в четыре раза больше, а для термометров селективного излучения она зависит от избранного узкого спектрального диапазона. Для длины волны $\lambda=10^{-1}$ мкм относительная чувствительность имеет порядок единицы, что почти в тысячу раз больше, чем для термометров максимального излучения. В инфракрасной (ИК) области, т.е. в области $\lambda \sim 1 \dots 10$ мкм чувствительность снижается почти на порядок, однако само излучение на много порядков возрастает.

По этой причине в метеорологических измерениях используются, в основном, селективные термометры ИК диапазона. Их используют для дистанционных измерений температуры почвы (с самолетов), температуры нижней границы облаков (с земной поверхности), температуры верхней границы облачности и подстилающей поверхности (с искусственных спутников). Термометры максимального и интегрального излучения также используются в технике для измерения более высоких температур, например, температуры поверхности звезд.

Обратим внимание, что в радиационных термометрах полностью отсутствует тепловая инерция, так как они не имеют термометрического тела.

Приёмники излучения, используемые в радиационных термометрах. Для измерения температуры используются следующие приёмники излучения.

1. *Зачернённый спай термопары (или термобатареи).* Как мы уже знаем, термопара измеряет разность температур. Поэтому, если один её спай покрыть черной краской (например, сажей) и поместить в фокус потока излучения, а второй спай оставить на воздухе, исключив попадание на него излучения, то разность температур между спаями будет обусловлена радиационным потоком.

2. *Зачернённый терморезистор (болометр).* В этом случае терморезистор помещается в мостовую схему дифференциального термометра. Второй терморезистор, помещённый в смежное плечо, тщательно изолируют от радиационных потоков. Тогда, как и в случае термопары, измеряется разность температур между зачерненным терморезистором и окружающим воздухом.

3. *Фоторезистор.* Известны некоторые материалы, обладающие свой-

ствами *фотосопротивления*, т.е. их сопротивление зависит от потока падающей радиации. Это может быть объяснено на основе квантовой теории света. Кванты света бомбардируют атомы и сообщают энергию электронам, переводя их из валентной зоны в зону проводимости. Чувствительность материала к световому потоку обусловлена малым энергетическим барьером между валентной зоной и зоной проводимости. Тогда количество свободных электронов возрастает при увеличении радиационного потока, а сопротивление, соответственно, уменьшается. В качестве примера такого материала укажем полупроводник на основе кремния со специальными примесями, а также сплав из кадмия, теллура и ртути (HgCdTe). Оба материала чувствительны к ИК излучению.

4. *Вакуумный фотоэлемент*. Это вакуумный баллон (рис.1.25) с двумя электродами: катодом (К) и анодом (А).

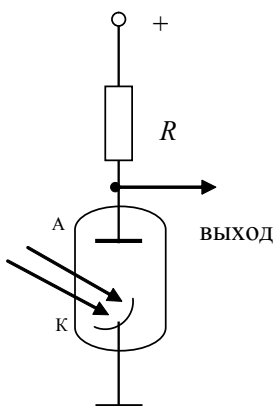


Рис. 1.25. Вакуумный фотоэлемент

Поверхность катода покрывается специальным материалом, работа выхода электронов из которого невелика. Обработанный таким образом, он носит название *фотокатода*. Кванты света бомбардируют фотокатод, энергия электронов превышает работу выхода, и они покидают поверхность фотокатода.

В электрическом поле между катодом и анодом электроны летят к аноду и понижают его потенциал. В результате возрастает падение напряжения на сопротивлении нагрузки R (рис. 1.25) и на выходе возникает отрицательный скачок напряжения, величина которого зависит от количества выбитых с катода электронов, а следовательно, от пришедшего на фотокатод излучения.

Спектральный диапазон применения фотоэлементов зависит от покрытия фотокатода. Фотокатоды, выполненные на основе соединений галлия, индия и мышьяка, обладают почти постоянной чувствительностью до 1 мкм. В более длинноволновой области чувствительность несколько понижается.

5. Вакуумные фотоумножители. По принципу действия они сходны с фотоэлементами. Отличие состоит в том, что фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) содержит один (рис. 1.26) или несколько дополнительных электродов – *динодов* (Д), соединенных с катодом (К) и анодом (А) цепью резисторов (R_1 и R_2). Они выполняют роль делителя напряжения, благодаря чему потенциал динода больше потенциала катода, но меньше анода. Поэтому электроны, вылетевшие с фотокатода, летят не к аноду, а к ближайшему диноду. Это достигается как распределением потенциалов между катодом, динодами и анодом, так и соответствующим расположением динодов внутри баллона ФЭУ.

Разогнавшись в электрическом поле, электроны бомбардируют поверхность динода так, что каждый из них выбивает с поверхности несколько электронов. Общий поток электронов возрастает в несколько раз и летит к следующему диноду, где также происходит умножение количества электронов. На анод приходит во много раз больший поток электронов, чем выходит с катода. Поэтому чувствительность фотоумножителей гораздо выше чувствительности фотоэлементов. ФЭУ используют для измерения очень малых радиационных потоков.

Чувствительность ФЭУ зависит от количества динодов и напряжения питания. Выпускаются ФЭУ, в которых количество динодов больше десятка, а напряжение питания может достигать нескольких тысяч вольт. Перед попаданием на фотоприемник радиационный поток проходит через оптические элементы, важнейшими из которых являются *фильтр* и *модулятор*. Фильтр применяется в селективных термометрах для выделения выбранного узкого спектрального интервала.

Инфракрасный фильтр - очень высокотехнологичный (и дорогостоящий!) элемент, изготавливаемый на основе специальных стекол с посадками. Фильтр должен, во-первых, пропускать максимально узкий диапазон спектра, во-вторых, минимально изменять свои оптические свойства при изменении внешних параметров, прежде всего, температуры. Модулятор применяется для прерывания потока излучения с известной частотой. Это, например, конструкция, изображенная на рис. 1.27. Плоский двухлопастный винт вращается электромотором, прерывая поток излучения,

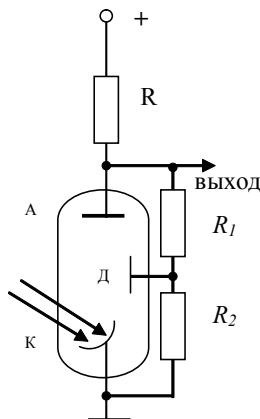


Рис. 1.26. Вакуумный фотоумножитель

проходящий несколько в стороне от центра. Тогда и электрический сигнал, снимаемый с фотоприемника, будет изменяться с той же частотой. Такой приём называется *модуляцией* сигнала. Обратим внимание, что модулируется только излучение, приходящее от исследуемого объекта! Это даёт возможность отличить полезный сигнал (т.е. приходящий от объекта измерения) от *паразитного сигнала*, т.е. излучения, приходящего от других объектов. Полезный сигнал модулирован, паразитный - нет.

Тот же прием используется в навигации, когда ночью требуется отличить сигнал маяка (“мигающий” с определенной частотой, которая известна капитану судна!) от множества других источников света при подходе к порту.

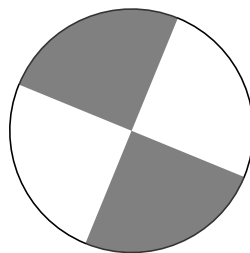


Рис. 1.27. Модулятор

1.11. Акустические термометры

Акустические термометры основаны на зависимости скорости распространения звука в воздухе от температуры. Действительно, звук - распространение упругих продольных колебаний давления в воздухе, что должно происходить по-разному при различной температуре. Выразим эту зависимость формулой:

$$C_{ac} = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} RT}, \quad (1.53)$$

где C_{ac} - скорость распространения акустических волн, т.е. скорость звука;
 C_p и C_v - теплоёмкость воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме соответственно;

R - универсальная газовая постоянная;

T - температура по шкале Кельвина.

(В дальнейшем будем обозначать для упрощения $C_{ac} \equiv C$). Принимая в формуле (1.53) $C_p / C_v = \chi$ - показатель адиабаты, и переходя от шкалы Кельвина к шкале Цельсия, получим:

$$C = \sqrt{\chi \cdot R(273 + t)} . \quad (1.54)$$

Подставив численные значения, найдем, что скорость звука в воздухе при 0°C равна $C_0 = 331,2$ м/с. Тогда формулу (1.54) можно преобразовать в виде:

$$C = C_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \approx 331,6 + 0,6t . \quad (1.55)$$

Эта формула даёт возможность рассчитать с хорошей степенью точности скорость звука при различной температуре.

Определим чувствительность акустических термометров. Как обычно, воспользуемся общим определением чувствительности прибора, приняв за выходную величину скорость звука C . Тогда, применив формулу (1.55), имеем:

$$S = \frac{dC}{dt} \approx 0,6 \text{ м/с} \cdot \text{К} . \quad (1.56)$$

Следовательно, при изменении температуры на 1К скорость звука изменится на 0,6 м/с в ту же сторону.

Обратим внимание на два обстоятельства. Во-первых, скорость звука очень мало зависит от количества водяного пара в воздухе, т.е. от влажности. Влияние влажности становится заметным лишь при достаточно высокой температуре, когда количество водяного пара в воздухе сильно возрастает. Поэтому обычно влиянием влажности пренебрегают. Во-вторых, формула (1.56), а значит, и дальнейшие выведенные из неё формулы справедливы только при значениях плотности воздуха, не слишком сильно отличающихся от приземной. Поэтому на больших высотах акустический

метод должен применяться с учётом изменения плотности воздуха. В этих условиях начинает сказываться зависимость скорости звука от его частоты, чего практически не наблюдается в условиях приземной плотности.

Акустический термометр привлекателен прежде всего полным отсутствием тепловой инерции, поскольку в термометре отсутствует термометрическое тело. Поэтому акустический метод применяют в тех случаях, когда желательно измерить короткопериодические флуктуации температуры.

Практически акустический метод измерения температуры можно применить следующим образом. На некотором расстоянии l друг от друга помещаются источник и приемник звука (обычно применяется ультразвук). Измеряется время прохождения акустическим сигналом расстояния l .

Погрешности акустических термометров. Основной погрешностью является сильная зависимость времени прохождения акустическим сигналом расстояния l от скорости ветра. В самом деле, при распространении звука в движущейся среде скорость его распространения должна векторно складываться с проекцией скорости ветра на отрезок l . Даже при небольшой скорости ветра (около 1 м/с) погрешность измерения может достичь 1 - 2 градусов. (В главе 3 будет рассмотрен акустический анемометр, причём его погрешностью является влияние температуры на скорость распространения звука.) Для устранения этой погрешности можно воспользоваться установкой, изображенной на рис. 1.28. На расстоянии l от излучателя И помещены с двух сторон два приемника Π_1 и Π_2 .

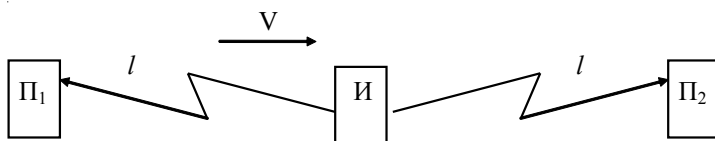


Рис. 1.28. Акустический термометр

Проекцию скорости ветра на направление распространения звука обозначим через V . Определяется время прохождения акустическим сигналом расстояния до первого и второго приемников (τ_1 и τ_2). Затем определяется сумма времен $\tau_1 + \tau_2$. Поскольку скорость ветра должна учитываться с разными знаками, можно написать:

$$\tau_1 + \tau_2 = \frac{l}{C - V} + \frac{l}{C + V}. \quad (1.57)$$

Выполнив сложение и приняв во внимание $C^2 \gg V^2$, имеем:

$$\tau_1 + \tau_2 = \frac{2lC}{C^2 - V^2} \approx \frac{2l}{C}. \quad (1.58)$$

Последнее выражение не зависит от V . Поэтому и погрешность, связанная со скоростью ветра, становится при таком способе измерения пренебрежимо малой.

Практически суммирование времен τ_1 и τ_2 может быть осуществлено методом обработки электрического сигнала с выдачей результата прямо на шкалу или на цифровой индикатор. Таким образом, наблюдатель не должен производить измерения τ_1 и τ_2 отдельно.

Иногда для ликвидации ветровой погрешности применяют компенсационный способ - измерение скорости ветра каким-либо другим методом и вычитание полученных сигналов. Это, однако, более сложный метод.

Глава 2. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

2.1. Влажность. Основные понятия.

Психрометрический метод измерения влажности

Под влажностью воздуха понимают содержание в нём водяного пара. Влажность может быть охарактеризована несколькими параметрами, большинство из которых связаны между собой уравнениями, известными из курса метеорологии. Напомним основные характеристики влажности воздуха.

1. *Абсолютная влажность a* - масса водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха (г/м^3 или кг/м^3).

2. *Парциальное давление водяного пара e* . Измеряется в гектопаскалях (гПа).

3. *Давление насыщения E* - максимально возможное парциальное давление водяного пара при данной температуре воздуха. Давление насыщения связано с температурой воздуха формулой Магнуса:

$$E = E_0 \cdot 10^{\frac{at}{b+t}}, \quad (2.1)$$

где E_0 - давление насыщения при температуре 0°C ;

t - температура по шкале Цельсия;

a и b - константы (для жидкой воды $a = 7,63$; $b = 241,9$).

4. *Относительная влажность f* - отношение парциального давления к давлению насыщения:

$$f = \frac{e}{E}. \quad (2.2)$$

Обычно относительная влажность измеряется в процентах. Для вычислений используется формула (2.2).

5. *Температура точки росы t_d* (или T_d) - температура, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным, и относительная влажность достигает 100 %. При дальнейшем понижении температуры начинается конденсация водяного пара в виде росы или тумана.

6. *Массовая доля водяного пара c* - количество водяного пара (в кг) в одном килограмме влажного воздуха (кг/кг).

Приведенный перечень не является полным. Исчерпывающую ин-

формацию читатель может найти в учебниках по общей метеорологии (например “Курс общей метеорологии” Л.Т. Матвеева).

Из сказанного ясно, что для измерения влажности воздуха можно было бы, например, собрать водяной пар, содержащийся в известном объеме воздуха, определить его массу и, вычислив отношение массы водяного пара к объему воздуха, определить абсолютную влажность. Это *прямой метод измерения*, т.е. метод, при котором искомое значение измеряемой величины находят непосредственно из эксперимента. В применении к измерению влажности такой метод получил название *весового метода*. Его можно осуществить, пропуская влажный воздух через *U*-образные трубки, наполненные гигроскопическим веществом, т.е. веществом, поглощающим водяной пар. Тогда, определив изменение массы вещества за время опыта, можно определить массу поглощенного водяного пара. Для определения объема пропущенного воздуха необходим газовый счетчик.

Однако весовой метод, как и все прямые методы, крайне неудобен для метеорологических измерений. Поэтому для измерения влажности обычно пользуются *косвенными методами*. Рассмотрим один из наиболее часто применяемых косвенных методов - *психометрический метод измерения влажности*.

Суть метода заключается в измерении разности температур между сухим и смоченным термометрами - *психометрической разности*. Представим себе термометр, у которого термометрическое тело (например, резервуар со ртутью) обернуто тонкой тканью - батистом и смочено дис-

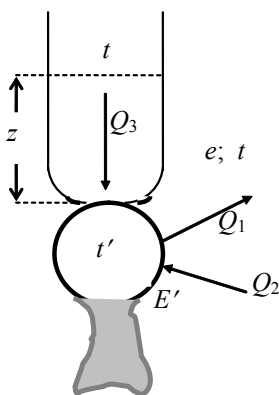


Рис. 2.1.
Смоченный термометр

тиллированной водой (рис. 2.1). Тогда, если влажность воздуха менее 100 %, вода будет испаряться с поверхности термометра. Следовательно, температура смоченного термометра t' понизится - ведь процесс испарения идет с поглощением тепла. Обозначим поток тепла с единичной площади поверхности смоченного термометра через Q_1 (рис. 2.1). Ясно, что чем меньше влажность воздуха, тем больший поток водяного пара идет с его поверхности, тем больше психометрическая разность $(t - t')$, где t - температура окружающего воздуха. Следовательно, психометрическая разность может быть мерой влажности воздуха.

Свяжем относительную влажность воздуха f с психрометрической разностью $(t - t')$. Для этого рассмотрим процессы, происходящие вблизи поверхности смоченного термометра. Предположим, что в некий момент времени, который мы примем за нулевой, термометр был смочен водой, имевшей температуру окружающего воздуха. Немедленно возник поток тепла Q_1 , и температура смоченного термометра стала понижаться (рис. 2.1). Сразу же возник обратный поток тепла Q_2 - от теплого воздуха к охлажденному термометру и поток Q_3 - от сухой части термометра (имеющей температуру окружающего воздуха!) к его смоченному термометрическому телу. По мере понижения температуры смоченного термометра потоки Q_2 и Q_3 возрастают, т.к. увеличивается разность температур между термометром и окружающей средой. Падение температуры термометра замедляется и через некоторое время наступает тепловое равновесие - сумма нагревающих потоков $Q_2 + Q_3$ становится равной охлаждающему потоку Q_1 (рис. 2.2). Температура смоченного термометра стабилизируется. Равновесие будет сохраняться до тех пор, пока не испарится вода, содержащаяся в батисте. Когда это произойдет, поток Q_1 станет равным нулю, охлаждение термометра прекратится, и нагревающие потоки скоро выровняют его температуру с температурой окружающего воздуха.

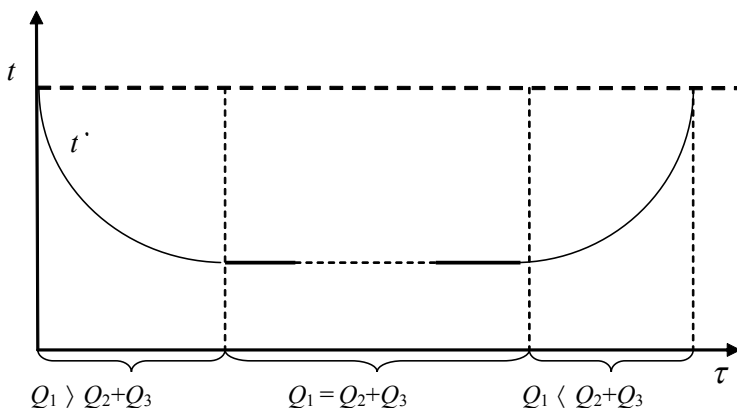


Рис. 2.2. Изменение температуры смоченного термометра

Мы видим, что температура смоченного термометра стабилизируется на участке графика, когда достигается равновесие: $Q_1 = Q_2 + Q_3$. Именно в этот промежуток времени должно производиться снятие показаний термометров. Поэтому примем написанное уравнение баланса тепловых потоков в качестве основного для вывода искомого соотношения.

Выведем уравнение психрометра для парциального давления (e) предположив, что резервуар имеет шарообразную форму. Тогда воспользуемся уравнением Максвелла для скорости испарения с поверхности капли (представим резервуар в виде большой капли):

$$J = -4\pi \cdot R^2 \rho \cdot D \frac{dc}{dr}, \quad (2.3)$$

где J - поток пара;

R - радиус резервуара;

ρ - плотность воздуха;

D - коэффициент диффузии водяного пара;

c - массовая доля водяного пара;

r - расстояние от центра резервуара.

Знак минус перед правой частью означает, что поток направлен от резервуара. Заметив, что площадь поверхности резервуара $S = 4\pi \cdot R^2$ и переходя от массовой доли к парциальному давлению, запишем:

$$J = -\frac{0,622 \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot \frac{de}{dr}, \quad (2.4)$$

где p - атмосферное давление.

Поток тепла получим умножением потока водяного пара на удельную теплоту парообразования L :

$$Q_1 = -\frac{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot \frac{de}{dr}. \quad (2.5)$$

Поток тепла Q_2 напишем в виде:

$$Q_2 = \alpha \cdot S \cdot \frac{dt}{dr}, \quad (2.6)$$

где α - коэффициент теплопроводности воздуха.

Поскольку теплообмен с окружающим воздухом идет через ту же поверхность, что и поток пара, величина S имеет тот же смысл.

Поток тепла Q_3 запишем аналогично предыдущему:

$$Q_3 = \lambda \cdot s \cdot \frac{dt}{dr}, \quad (2.7)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен стержень термометра;

s - площадь сечения шейки термометра, через которую происходит теплообмен резервуара со стержнем.

Теперь напомним уравнение теплового баланса:

$$-\frac{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot \frac{de}{dr} = \alpha \cdot S \cdot \frac{dt}{dr} + \lambda \cdot s \cdot \frac{dt}{dr} . \quad (2.8)$$

Сократив dr , проинтегрируем левую часть уравнения от E' (давление насыщения при температуре смоченного термометра) до e , а правую соответственно от t' до t . Имеем:

$$\frac{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot (E' - e) = (\alpha \cdot S + \lambda s) \cdot (t - t') . \quad (2.9)$$

Выразим из этого уравнения парциальное давление e :

$$e = E' - Ap(t - t') , \quad (2.10)$$

где

$$A = \frac{\alpha \cdot S + \lambda \cdot s}{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D} . \quad (2.11)$$

Величина A называется *психрометрическим коэффициентом*, а формула (2.10) - психрометрической формулой. Она дает возможность рассчитать парциальное давление пара по психрометрической разности $(t - t')$. Анализируя её, мы видим, что для этого необходимо ещё измерить атмосферное давление и знать величину психрометрического коэффициента A .

Учтём зависимость коэффициента диффузии D от давления:

$$D_0 \cdot p_0 = D \cdot p ,$$

где D_0 - коэффициент диффузии при нормальном давлении p_0 . Тогда:

$$A = \frac{\alpha + \lambda \cdot \frac{s}{S}}{0,622 \cdot L \cdot \frac{\rho}{p} \cdot D_0 \cdot p_0} . \quad (2.12)$$

В формуле (2.12) почти все величины постоянны и зависят только от конструкции термометра (с учётом $\rho / p = \text{const.}$). Только коэффициент теплопроводности воздуха α и коэффициент диффузии водяного пара D_0 зависят от скорости ветра V . Эта зависимость выражается схожими формулами, поскольку процессы переноса влаги и тепла подчиняются одним и тем же законам:

$$\alpha \propto \sqrt{V}; \quad D_0 \propto \sqrt{V}.$$

Следовательно, по мере возрастания скорости ветра первое слагаемое в числителе формулы (2.12) будет увеличиваться. Когда второе слагаемое станет гораздо меньше первого ($\alpha \gg \lambda \cdot s/S$), то зависимость от скорости ветра в числителе и знаменателе (2.12) сократится, и психрометрический коэффициент не будет зависеть от скорости ветра. Это чрезвычайно желательно, так как если зависимость сохраняется, то для измерения влажности нужно будет дополнительно измерять ещё и скорость ветра (помимо атмосферного давления!) и вводить соответствующие поправки к психрометру. Поэтому психрометр, у которого психрометрический коэффициент не зависит от скорости ветра, получил название *идеального психрометра*.

В реальном психрометре коэффициент A зависит от скорости ветра (рис. 2.3). Эту зависимость можно аппроксимировать формулой:

$$A = A_{\infty} \left(1 + \frac{a}{V^b} \right), \quad (2.13)$$

где a и b – константы;

A_{∞} – значение психрометрического коэффициента при $V \rightarrow \infty$.

Практически $b \approx 0,5$, величина a определяется конструкцией термометра.

Как же сделать термометр для идеального психрометра? Формула (2.12) позволяет дать рекомендацию: нужно сделать термометр с тонкой шейкой, так, чтобы $S \gg s$. Тогда второе слагаемое в числителе (2.12) станет гораздо меньше первого, и основное условие для идеального термометра будет выполнено. Вот почему в термометрах для измерения психрометрической разности шейка всегда делается возможно более тонкой.

Скорость движения воздуха внутри будки принимается равной 0,8 м/с. Тогда для стационарных термометров ТМ-4, применяемых для измерения влажности, психрометрический коэффициент оказывается равным:

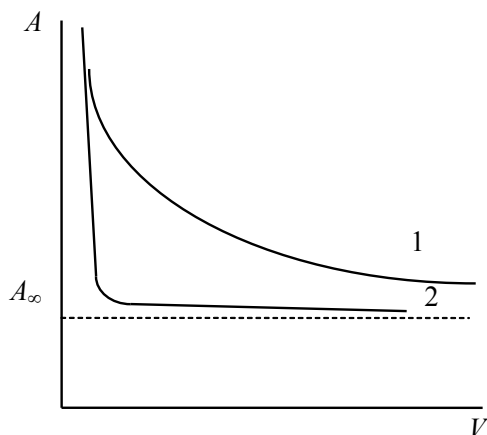


Рис. 2.3. Зависимость психрометрического коэффициента от скорости ветра: 1 - для реального психрометра, 2 - для психрометра, близкого к идеальному

$$A = 7,947 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

В метеорологии часто применяют термин “температура смоченного термометра”, имея в виду температуру жидкой капли, находящейся в тепловом равновесии с окружающим воздухом. Из рассмотренного выше ясно, что этот термин относится лишь к идеальному психрометру, моделью которого и является жидкая капля. Вообще говоря, температура смоченного термометра зависит от его конструкции, поскольку конструкция определяет психрометрический коэффициент. Психрометрические таблицы, применяемые для определения влажности, составлены для *конкретного типа термометров*. Замена их термометрами другого типа приведет к ошибке при определении влажности с помощью таблиц!

Продолжим вывод формулы для связи психрометрической разности с относительной влажностью. Применив определение относительной влажности (2.2) и формулу (2.10), имеем:

$$f = \frac{E'}{E} - \frac{Ap}{E} (t - t'). \quad (2.14)$$

Для того чтобы выразить отношение E'/E через разность $(t - t')$, воспользуемся уравнением Клаузеуса-Клапейрона:

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{R_v} \cdot \frac{dT}{T^2}, \quad (2.15)$$

где R_v - газовая постоянная для водяного пара.

Интегрирование этого уравнение от E' до E и соответственно от T' до T дает:

$$\ln \frac{E}{E'} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right), \quad (2.16)$$

или

$$\ln \frac{E'}{E} = -\frac{L}{R_v} \frac{(T - T')}{T' \cdot T}. \quad (2.17)$$

Поскольку в числителе стоит разность температур, можно заменить шкалу Кельвина на шкалу Цельсия. Тогда, приняв в знаменателе $T \approx T'$, получаем:

$$\ln \frac{E'}{E} = -\frac{L}{R_v T^2} (t - t'). \quad (2.18)$$

Откуда

$$\frac{E'}{E} = e^{-\frac{L}{R_v T^2} (t - t')} \approx 1 - \frac{L}{R_v T^2} (t - t'). \quad (2.19)$$

Последнее выражение получено разложением экспоненты в ряд с ограничением первыми двумя членами ряда. Подставим его в формулу (2.14):

$$f = 1 - \left(\frac{L}{R_v T^2} + \frac{Ap}{E} \right) \cdot (t - t'). \quad (2.20)$$

Формула (2.20) дает возможность вывести выражение для чувствительности психрометра. Взяв в качестве выходной величины психрометрическую разность и применив общее определение чувствительности, получаем:

$$S = \frac{d(t - t')}{dt} = -\frac{1}{\frac{L}{R_v T^2} + \frac{Ap}{E}}. \quad (2.21)$$

Проанализируем полученное выражение.

Во-первых, чувствительность психрометра оказалась отрицательной. Этого и следовало ожидать, так как с ростом относительной влажности психрометрическая разность уменьшается.

Во-вторых, чувствительность оказалась сильно зависящей от температуры в силу зависимости $E(t)$ (формула (2.1)) и T^2 в первом слагаемом знаменателя. Представим эту зависимость графически (рис. 2.4). С ростом температуры чувствительность (будем говорить, конечно, о модуле чувствительности) возрастает. При отрицательных температурах чувствительность метода становится столь низкой, что применение его может дать значительные ошибки.

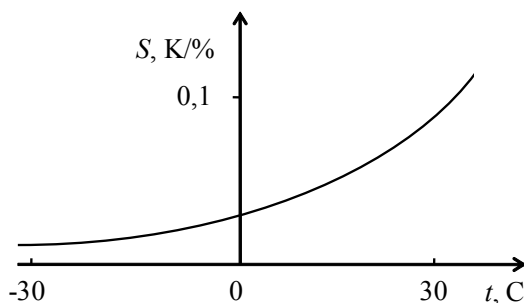


Рис. 2.4 Зависимость чувствительности психрометра от температуры

Обратим внимание на величину чувствительности - она имеет порядок 0,1 K/%. Это означает, что точное измерение влажности психрометрическим методом, по крайней мере, затруднительно.

В современных дистанционных приборах для измерения влажности применяются терморезисторы с мостовыми схемами, рассмотренные в главе 1. Конечно, психрометрические коэффициенты для терморезисторов не могут быть определены по выведенным формулам. Они определяются, как правило, опытным путем. Но психрометрическая формула (2.10) с небольшими поправками может быть применена для любых датчиков температуры.

Её вводят в программу цифрового устройства для обработки сигнала и получают значение относительной влажности прямо на цифровом индикаторе или в другой желаемой форме. Так работает, например, блок измерения влажности станций типа КРАМС.

2.2. Деформационные гигрометры

Деформационные гигрометры основаны на свойстве некоторых органических материалов (волос, пленок) изменять свои размеры при изменении влажности. Уже давно было замечено, что перед дождем при повышении влажности изменяется звук барабанов вследствие изменения натяжения кожи, а женщины испытывают затруднения с сохранением прически. Это происходит потому, что волосы и другие органические материалы имеют пористую структуру. В порах происходит конденсация водяного пара. Как известно, давление насыщения E_r связано с кривизной поверхности воды r формулой Томсона:

$$\frac{E_r}{E} = e^{\frac{2\sigma}{R_v \cdot \rho \cdot T \cdot r}}, \quad (2.22)$$

где E - давление насыщения над плоской поверхностью;

σ - поверхностное натяжение воды;

R_v - газовая постоянная для водяного пара;

ρ - плотность воды;

T - температура по шкале Кельвина.

Если парциальное давление водяного пара будет равно давлению насыщения ($e = E_r$), то начинается конденсация водяного пара в порах. Как следует из формул (2.2) и (2.22), это происходит при влажности, значение которой равно правой части (2.22). Поскольку в волосе (или плёнке) размер пор весьма разный, то каждому значению относительной влажности соответствует определенное количество пор, в которых сконденсировалась вода. Это приводит к изменению размера волоса, а именно к растяжению при повышении влажности.

Аналитическое выражение, связывающее размер волоса с относительной влажностью, написать затруднительно, поскольку размер пор и их количество сильно зависит от выбора материала. Тем не менее, установлено, что эта зависимость нелинейная и близка к логарифмической. Соответственно, шкала волосных и пленочных гигрометров нелинейная - их чувствительность уменьшается при возрастании влажности. Точность измерения с помощью деформационных гигрометров обычно невелика и составляет около $\pm 10\%$.

Для изготовления волосных гигрометров применяется обезжиренный человеческий волос. Процесс обработки волос очень важен для

получения более-менее стандартных результатов измерения. Волосные гигрометры применяются на метеорологической сети. Особое значение они приобретают при измерении влажности в зимнее время, когда чувствительность психометрического метода невелика. Пленочные гигрометры применяют в радиозондах. В этом случае особую значимость приобретает то обстоятельство, что деформационные гигрометры имеют малую инерцию.

2.3. Конденсационные гигрометры

Конденсационные гигрометры иногда называют гигрометрами точки росы. В начале этой главы мы перечисляли основные характеристики влажности. Представим себе, что температура точки росы T_d нам известна. Известна и температура воздуха T . Тогда, определив давление насыщения при температуре точки росы (E_d), и зная, что при этой температуре относительная влажность равна

$$f_d = \frac{e}{E_d} = 1,$$

напишем значение относительной влажности при температуре воздуха T :

$$f = \frac{e}{E} = \frac{E_d}{E}. \quad (2.23)$$

Таким образом, определив T_d , мы определим E_d , а по температуре T найдем E , а затем f . Способы определения температуры нам известны, задача заключается в том, чтобы определить температуру точки росы.

Для этого воспользуемся блестящей металлической поверхностью, которую будем охлаждать, например, с помощью полупроводникового микрохолодильника. В момент достижения температуры точки росы на зеркале появляются мелкие капли - конденсат. Их легко заметить на зеркальной поверхности. Измерим температуру зеркала в этот момент - это и есть температура точки росы. Осуществление этой идеи должно быть автоматизировано.

Рассмотрим *автоматический конденсационный гигрометр* (рис. 2.5). Основным элементом гигрометра является металлическое зеркало (З), охлаждаемое микрохолодильниками (Х). Прежде всего включается источник света (Л) - например, обыкновенная лампочка. Свет от неё соби-

рается объективом (О), и параллельный узкий пучок света падает на зеркало. Отражаясь от него, свет идет на фотодиод VD. *Фотодиод* - полупроводящий элемент, который проводит ток только при освещении его светом. Будем говорить, что фотодиод *открывается* световым потоком.

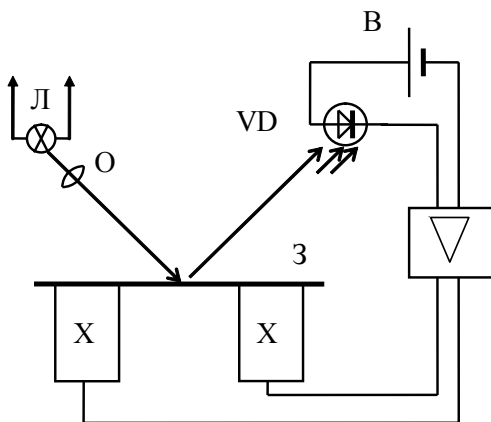


Рис. 2.5. Конденсационный гигрометр

Итак, при попадании на него отраженного от зеркала светового потока, фотодиод открывается, и ток от источника (В) идет через него на усилитель. После усиления ток подается на микрохолодильники (Х), они начинают работать и охлаждают металлическое зеркало (З). Его температура падает. При достижении точки росы поверхность зеркала покрывается конденсатом, и отражение становится диффузным. Теперь на фотодиод попадает лишь небольшая часть светового потока, и он *закрывается*.

Ток не проходит на усилитель. Соответственно, не попадает ток и на микрохолодильники, охлаждение прекращается и зеркало нагревается окружающим воздухом. Температура его становится выше точки росы, конденсат исчезает, пучок света снова освещает фотодиод. Этот процесс повторяется непрерывно, в результате температура поверхности зеркала чуть колеблется около температуры точки росы. Измерив её, например, с помощью терморезистора, подклеенного к внутренней стороне зеркала, можно определить температуру точки росы, а следовательно, относительную влажность.

Мы видим - автоматический конденсационный гигрометр представляет собой не что иное, как уже знакомую нам следящую систему! Обратная связь осуществляется через световой (оптический) сигнал, который прео-

бразуется в электрический с помощью фотодиода, а затем поступает на исполнительный элемент - микрохолодильники. Они-то и охлаждают зеркало до температуры точки росы.

Рассмотрим теперь вопрос о чувствительности конденсационного гигрометра. Выведем формулу, связывающую температуру точки росы с относительной влажностью. Для этого воспользуемся уравнением Клаузеуса-Клапейрона:

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{R_v} \cdot \frac{dT}{T^2} . \quad (2.24)$$

Проинтегрируем левую часть уравнения в пределах от E_d до E , а правую соответственно от T_d до T . Получим:

$$\ln \frac{E}{E_d} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d} \right) . \quad (2.25)$$

С учётом (2.23) имеем:

$$\ln f = \frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d} \right) . \quad (2.26)$$

Решая (2.26) относительно T_d , получим искомую формулу:

$$T_d = \frac{1}{\frac{1}{T} - \frac{R_v}{L} \ln f} . \quad (2.27)$$

Применяя определение чувствительности как изменение температуры точки росы, вызванное изменением относительной влажности на единицу, напишем:

$$S = \frac{dT_d}{df} = \frac{R_v}{L \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{R_v}{L} \ln f \right)^2 \cdot f} . \quad (2.28)$$

Проанализируем полученное выражение. Прежде всего, видим, что чувствительность конденсационного гигрометра оказалась зависящей как

от температуры, так и от влажности. При возрастании температуры знаменатель уменьшается и чувствительность растёт. При увеличении влажности чувствительность уменьшается. Это можно проиллюстрировать графически (рис. 2.6).

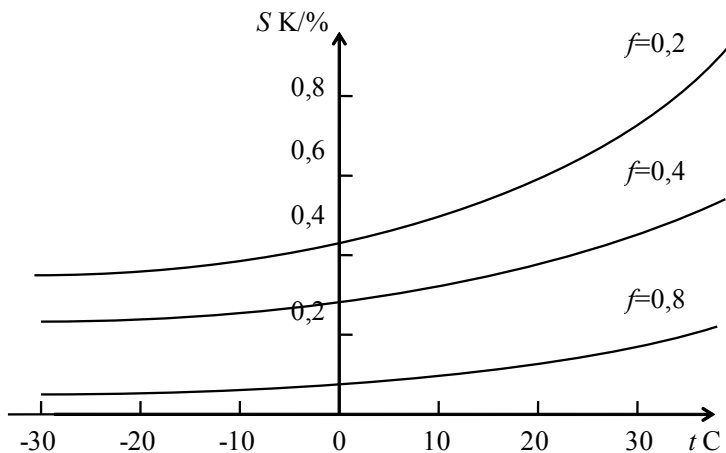


Рис. 2.6. Чувствительность конденсационного гигрометра в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха

Обратим особое внимание на абсолютную величину чувствительности конденсационного гигрометра. Её размерность совпадает с размерностью чувствительности психрометра. Сравним графики на рис. 2.4 и 2.6. Видно, что чувствительность конденсационного гигрометра в несколько раз выше чувствительности психрометра! Правда, конструкция конденсационного гигрометра гораздо сложнее и время измерения соответственно гораздо больше.

За точность измерения необходимо платить временем, затраченным на измерение! Этот вывод справедлив для всей измерительной техники. Даже для взвешивания на точных весах необходимо затратить гораздо больше времени, чем для грубой оценки массы предмета. То же справедливо и для гигрометров. Правда, современная техника даёт возможность сократить время измерения, но все равно, при одинаковом техническом обеспечении, грубые измерения занимают меньше времени, чем точные.

Возвратимся к конденсационному гигрометру. Он является одним из наиболее точных приборов для измерения влажности. Но для метеорологических целей такая высокая точность не обязательна. Поэтому ос-

новным методом измерения влажности в метеорологии принят психрометрический метод.

2.4. Электролитические гигрометры

Как ясно из названия, в этом разделе речь пойдет об *электролитах* - растворах гигроскопических веществ, прежде всего, солей. Поэтому вспомним химию, а именно, процессы, происходящие в растворах электролитах. Некоторые вещества, например, поваренная соль NaCl , хлористый литий и многие другие обладают свойством диссоциировать на ионы. Таким образом, в водном растворе присутствуют довольно крупные, тяжелые ионы (например, ионы Na^+ и Cl^-). Их окружают молекулы воды. Но, как известно, молекулы воды представляют собой диполи. Поэтому, находясь в электрическом поле иона, дипольные молекулы воды будут ориентироваться примерно так, как показано на рис. 2.7. Вокруг иона (положительного или отрицательного) группируются дипольные молекулы воды. Эта связь довольно жесткая. Однако внешняя сторона такого конгломерата заряжена, поэтому формируется второй ряд ориентированных молекул, далее третий и т.д. Но связь постепенно ослабевает, внешние молекулы связаны гораздо менее жестко, и наконец, происходит плавный переход к хаотическому расположению свободных молекул.

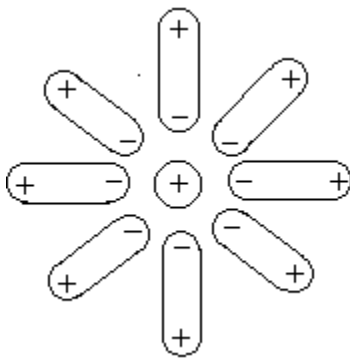


Рис. 2.7. Гидратные оболочки иона

Мы видим, что каждый ион окружен большим количеством связанных с ним молекул воды. Такие оболочки получили название *сольватные* (для всех растворителей) или *гидратные* (это название применяется только для водных растворов).

Поскольку молекулы в гидратных оболочках связаны электрическими силами с центральным ионом, испарение такого раствора затруднено. Поэтому давление насыщенных паров над раствором будет меньше, чем над водой. С другой стороны, чем больше концентрация растворённого вещества, тем больше ионов в растворе, больше молекул воды связано в гидратных оболочках. Поэтому давление насыщения над раствором зависит от концентрации раствора и от особенностей иона - прежде всего, от его заряда. Эта зависимость носит название закона Рауля. Её можно выразить формулой:

$$E^* = E \left(1 - i \cdot c \frac{\mu}{\mu^*} \right), \quad (2.29)$$

где E^* - давление насыщения над раствором электролита;

E - давление насыщения над водой при той же температуре;

i - коэффициент Вант Гоффа, учитывающий особенности данного электролита;

c - концентрация электролита;

μ и μ^* - относительная молекулярная масса воды и гигроскопического вещества.

Из формулы (2.29) мы видим, что с ростом концентрации электролита давление насыщения над раствором уменьшается. Теперь предположим, что раствор находится во влажном воздухе. Пусть парциальное давление водяного пара в воздухе равно e . Предположим, что концентрация раствора такова, что $E^* < e$. Тогда поток водяного пара будет направлен из окружающего воздуха (оттуда, где парциальное давление велико) к поверхности раствора (туда, где парциальное давление меньше). Произойдет конденсация водяного пара на поверхность раствора, и раствор будет разбавляться. Его концентрация уменьшится. Но значит E^* возрастает (формула (2.29)). Это будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнуто равенство $E^* = e$. Тогда будет наблюдаться *динамическое равновесие*: поток водяного пара на поверхности раствора равен потоку водяного пара с его поверхности. Предположим, что это динамическое равновесие нарушится, раствор разбавится ещё больше и будет наблюдаться состояние, противоположное начальному: $E^* > e$. Тогда поток водяного пара пойдет в обратную сторону - с поверхности раствора в окружающий воздух. Раствор будет испаряться, и концентрация растворенного вещества возрастёт.

Значит, (формула 2.29), E^* будет расти и скоро будет опять достигнуто состояние динамического равновесия, когда $E^* = e$.

Нам понятно, что состояние динамического равновесия является единственно устойчивым. Если оно нарушается, то система сама приходит к этому состоянию. Значит, если раствор оставить на воздухе, то *всегда будет наблюдаться состояние, в котором $E^* = e$.*

Но давление насыщения над раствором E^* однозначно связано с концентрацией растворенного вещества формулой (2.29). Значит, если удастся каким-либо образом измерить концентрацию раствора c , то можно рассчитать парциальное давление e , а затем и относительную влажность.

Как же можно определить концентрацию раствора, не прибегая к трудоёмкому химическому анализу? Вспомним, что раствор электролита пропускает электрический ток, причем *электропроводность раствора однозначно связана с его концентрацией!* Определить электропроводность легко - для этого нужно определить электрическое сопротивление раствора (напомним, что электропроводность есть величина, обратная сопротивлению). Что касается сопротивления, то для этого можно применить уже изученные нами мостовые схемы.

Представим себе датчик в виде следующей конструкции. На твёрдую подложку, например пластиковую, нанесем пористую пленку, пропитанную раствором электролита. Пусть длина пленки l , толщина b и ширина d . Тогда сопротивление такой пленки:

$$R = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{l}{bd}, \quad (2.30)$$

где χ - удельная электропроводность раствора.

Теперь выразим удельную электропроводность раствора электролита через его концентрацию. Соответствующую формулу найдем в курсе физической химии:

$$\chi = Ac(U_+ + U_-), \quad (2.31)$$

где A - размерный коэффициент, зависящий от химического состава электролита;

U_+ и U_- - подвижности положительных и отрицательных ионов в растворе.

Обозначив $U_+ + U_- = U_\Sigma$ и выразив концентрацию c из уравнения (2.29), получим:

$$\chi = A \frac{1 - \frac{E^*}{E}}{i \frac{\mu}{\mu^*}} \cdot U_{\Sigma} . \quad (2.32)$$

Теперь заметим - поскольку давление насыщения над раствором всегда равно парциальному давлению водяного пара ($E^* = e$), то отношение E^* / E в числителе (2.32) есть не что иное, как влажность! Тогда:

$$\chi = AU_{\Sigma} \frac{1 - f}{i \frac{\mu}{\mu^*}} . \quad (2.33)$$

Тогда сопротивление пленки получим из формулы (2.30):

$$R = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{l}{bd} = \frac{i \cdot l \frac{\mu}{\mu^*}}{AU_{\Sigma} (1 - f) \cdot bd} . \quad (2.34)$$

Эта формула даёт нам возможность написать выражение для чувствительности электролитического гигрометра. Воспользовавшись общим определением чувствительности прибора и приняв за выходной параметр сопротивление пленки, имеем:

$$S = \frac{dR}{df} = \frac{i \cdot \frac{\mu}{\mu^*}}{AU_{\Sigma}} \cdot \frac{l}{bd} \cdot \frac{1}{(1 - f)^2} . \quad (2.35)$$

Проанализируем эту формулу. Во-первых, заметим, что чувствительность электрохимического гигрометра зависит от выбора электролита. Одним из лучших электролитов для изготовления гигрометров является раствор хлористого лития LiCl. Во-вторых, чувствительность увеличивается с увеличением длины плёнки, а также с уменьшением её толщины и ширины. В-третьих, чувствительность увеличивается при возрастании влажности (при приближении относительной влажности к единице). Это видно из рис. 2.8, где изображена зависимость сопротивления плёнки от влажности.

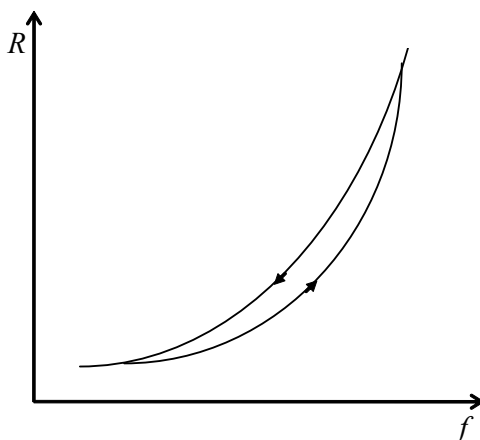


Рис. 2.8. Зависимость сопротивления гигристора от влажности

Для изготовления электрохимического датчика влажности (*гигристора*) плёнку наносят на пластиковый каркас и на него же наматывают два платиновых провода, служащих электродами для измерения сопротивления. Таким образом достигается максимальная длина пленки при сравнительно небольших размерах датчика. Гигристор подключается к мостовой схеме для измерения сопротивления. Схема имеет ряд особенностей, связанных с необходимостью устранить погрешности, возникающие при измерении. Рассмотрим их:

1. *Гистерезис плёнки.* Поскольку плёнка имеет определенную толщину, то распределение влаги внутри плёнки неоднородно - происходит диффузия с поверхности (или из внутренних слоев по направлению к поверхности). Из-за этого внутренние слои плёнки *сохраняют память* о том, какая влажность была некоторое время назад. Поэтому зависимость сопротивления плёнки от влажности, изображенная на рис. 2.8, неоднозначна: при увеличении влажности сопротивление плёнки чуть ниже, чем при уменьшении. Это может привести к ошибкам в измерении влажности. Для уменьшения гистерезиса применяют как можно более тонкие плёнки. Имеет значение и выбор материала для пленки: материал должен быть пористым, чтобы влага возможно быстрее диффундировала внутри плёнки.

2. *Разложение электролита электрическим током - электролиз раствора.* Мы знаем, что соль разлагается при пропускании тока через раствор. Отрицательные ионы двигаются к аноду, положительные - к катоду (отсюда название - анионы и катионы!).

Электролиз приведёт к потере электролита через некоторое время. Чтобы избежать этого нежелательного явления, применяют переменный электрический ток. Тогда направленное движение ионов заменяется колебательным и потери электролита не происходит. Правда, для измерения ток приходится потом выпрямлять. Для этого в дальнейшие каскады схемы вводят выпрямляющие элементы.

3. *Температурная погрешность*. Сопротивление раствора электролита зависит не только от влажности, но и от температуры (здесь мы вправе сказать - к сожалению!). Действительно, подвижность ионов увеличивается с ростом температуры, поэтому сопротивление электролита *уменьшается* (формула (2.34)). Для нас, впрочем, важен сам факт зависимости сопротивления от температуры и связанной с этим погрешности измерения. Существуют разные способы уменьшения этой погрешности. Наиболее часто применяется способ *термокомпенсации*. Суть его в следующем. Вместе с мостовой схемой для измерения сопротивления гигростора (схема f на рис. 2.9) собирают вторую мостовую схему, в которую включен терморезистор (схема t).

Сигнал, напряжение в измерительной диагонали, зависит от влажности и температуры в первой схеме и только от температуры во второй. Теперь отрегулируем вторую схему так, чтобы в случае изменения температуры сигнал в ней изменялся бы *на ту же самую величину*, что и в первой, но в противоположном направлении! Сложим оба сигнала с помощью суммирующей схемы. Ясно, что при таком условии суммарный сигнал вообще не будет зависеть от температуры. Зависимость от влажности, конечно, сохранится.

2.5. Электролитические гигрометры с подогревом

Мы уже знаем, что сопротивление раствора электролита зависит от влажности. Это свойство можно использовать для измерения влажности иным методом.

Соберём датчик электролитического гигрометра точно таким же образом, как описано в предыдущем параграфе. На электроды датчика подадим переменное напряжение так, чтобы через плёнку проходил бы электрический ток, достаточный для подогрева датчика. В этом случае возникает интересный эффект, в результате которого *температура датчика будет зависеть от влажности*. Рассмотрим его.

Возьмём сухой электролит, например, хлористый литий. Это гигро-

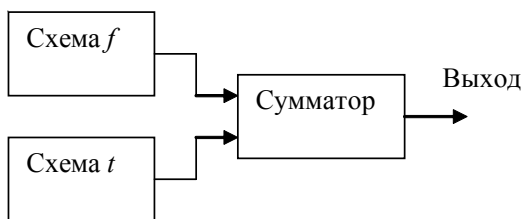


Рис. 2.9. Схема термокомпенсации

скопическое вещество покрывается влагой, и при некоторой влажности появляется плёнка насыщенного раствора. Назовём эту влажность *равновесной* влажностью. Для хлористого лития значение равновесной влажности примерно равно 13%.

Будем пропускать через датчик электрический ток. Температура датчика повысится - это соответствует передвижению на графике (рис. 2.10) от температуры t (жирная точка на графике) к температуре t' по пунктирной прямой. При повышении температуры выше точки t' наступит состояние, когда давление насыщения над раствором станет больше парциального давления ($E^* > e$) и раствор начнет испаряться (его количество будет уменьшаться). Тогда сопротивление начнет расти, а ток, проходящий через раствор уменьшаться. Станет меньше и нагрев датчика, понизится и его температура. При понижении температуры ниже точки t' неравенство изменит знак - теперь $E^* < e$ и будет происходить конденсация пара на поверхность раствора. Количество раствора возрастает, его сопротивление падает, а ток - увеличивается. Возрастает и температура раствора.

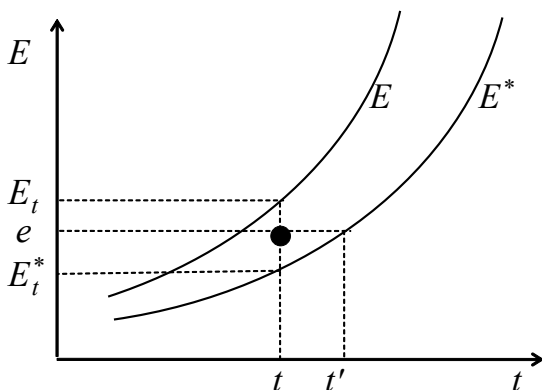


Рис. 2.10. Зависимость давления насыщения над водой (E) и над раствором электролита (E^*) от температуры

Рассуждая подобным образом, мы видим, что *единственно устойчивым* является состояние равновесия, когда $E^* = e$, а температура раствора равна t' .

Обратите внимание, отличие процесса от рассмотренного в предыдущем разделе состоит в том, что теперь мы имеем *насыщенный раствор электролита*. Концентрация его не меняется! Изменяется лишь только количество раствора и его температура. Конечно, необходимо позаботиться о том, чтобы раствор всегда был бы насыщенным. Для этого пленка должна содержать достаточно много сухой соли.

Теперь видим, что каждому значению парциального давления соответствует определенная величина температуры датчика t' . Её можно измерить, например, с помощью терморезистора, помещённого в корпус датчика.

Свяжем температуру t' с относительной влажностью воздуха. Мы показали, что давление насыщенного водяного пара над раствором при температуре t' (обозначим его E') равно парциальному давлению водяного пара. Следовательно

$$f = \frac{E'}{E_t^*} = \frac{E'}{E_t^*} \cdot f', \quad (2.36)$$

где E_t^* - давление насыщения над поверхностью раствора при температуре t ;

f' - равновесная влажность.

Теперь воспользуемся уравнением Клаузеуса-Клапейрона для E^* :

$$\frac{dE^*}{E^*} = \frac{L \cdot dT}{R_v T^2}. \quad (2.37)$$

Проинтегрируем левую часть уравнения в пределах от E_t^* до E' , а правую, соответственно от T до T' . Получим:

$$\ln \frac{E'}{E_t^*} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right). \quad (2.38)$$

А теперь, воспользовавшись формулой (2.36), выразим влажность:

$$f = f^* \cdot \exp\left(-\frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\right). \quad (2.39)$$

Как и раньше, примем $T \cdot T' \approx T^2$. Тогда, выполнив вычитание в показателе экспоненты, получим:

$$f = f^* \cdot \exp\left(\frac{L}{R_v T^2} (T' - T)\right). \quad (2.40)$$

Поскольку в скобках стоит разность температур, можно перейти к шкале Цельсия. Выразим из формулы (2.40) температуру t' :

$$t' = t + \frac{R_v T^2}{L} \cdot \ln \frac{f}{f^*}. \quad (2.41)$$

Приняв в качестве выходной величины прибора температуру t' , напомним выражение для чувствительности метода:

$$S = \frac{dt'}{df} = \frac{R_v \cdot T^2}{L} \cdot \frac{1}{f}. \quad (2.42)$$

Из выведенной нами формулы (2.42) следует, что чувствительность подогревных гигрометров зависит от температуры - с ростом температуры чувствительность увеличивается. При отрицательных температурах метод становится малочувствительным, а при температуре ниже -36^0 вообще не работает, поскольку кривые на рис. 2.10 пересекаются.

Чувствительность также зависит и от влажности. При уменьшении влажности чувствительность возрастает. Но при этом необходимо, чтобы влажность была бы выше равновесной, т.е. для хлористого лития выше 13%. Измерение влажности невозможно при её значении ниже равновесной.

Перечислим *основные погрешности метода*. Их две:

1. *Электролиз раствора*. Для устранения этой погрешности будем применять переменный ток, в этом случае даже не требуется выпрямляющих элементов, так как измерение тока не требуется.

2. *Ветровая погрешность*. Происходит испарение раствора, уменьшение его температуры. С увеличением скорости ветра охлаждение

датчика усиливается. Для уменьшения этой погрешности датчик защищают кожухом. Этот кожух не должен препятствовать влагообмену датчика с окружающим воздухом, поэтому в нем делают отверстия или применяют кожух в виде частой сетки.

Метод привлекателен тем, что даёт возможность преобразования влажности в электрический сигнал - ведь измерение температуры можно осуществить с помощью термометра сопротивления. Это даёт возможность дистанционного определения влажности. Метод можно применить в автоматических измерительных приборах.

2.6. Сорбционные гигрометры

Сорбционные гигрометры очень сходны с электролитическими. Отличие состоит в том, что чувствительный элемент сорбционного гигрометра (плёнка *сорбента*) содержит соль в *твёрдом виде*. Обычно применяется смесь различных солей, обладающих различной равновесной влажностью (раздел 2.5). Тогда при повышении влажности происходит последовательное растворение сначала одной соли, затем другой и т.д. При этом количество соли таково, что раствор все время остается насыщенным. Изменяется только количество раствора - чем выше влажность, тем больше количество раствора. Следовательно, мерой влажности может служить именно масса раствора. Для этого применяются различные способы. Рассмотрим их.

1. *Измерение электрического сопротивления датчика.* Собственно, это тот же самый способ, который описан в разделе 2.4.

Однако зависимость сопротивления от влажности теперь будет иной. Действительно, при очень малой влажности соль будет абсолютно сухой, сопротивление пленки будет стремиться к бесконечности. При повышении влажности количество раствора (проводника) будет возрастать, и его сопротивление будет уменьшаться (рис. 2.11). Сравнивая эту зависимость с аналогичной для электролитического гигрометра, видим, что они противоположны. Это, впрочем, не имеет существенного значения для измерений. Конструкция прибора может быть совершенно аналогичной.

Поэтому, говоря о *погрешностях сорбционного гигрометра*, можно повторить сказанное в разделе 2.4. Соответственно, способы устранения их могут быть теми же.

2. *Измерение массы раствора с помощью кварцевого генератора.* Это более сложный, но и более точный способ. Чтобы понять его, рас-

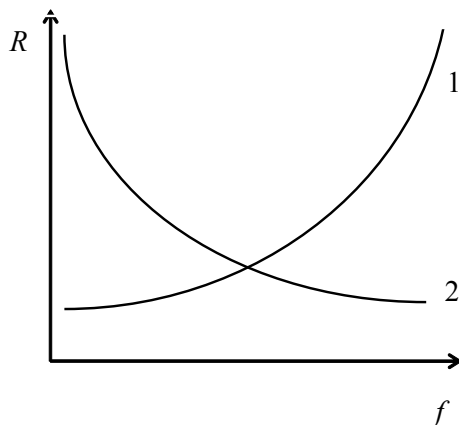


Рис. 2.11. Зависимость сопротивления от влажности:
1 - для электролитического гигрометра; 2 - для сорбционного

смотрим устройство кварцевого генератора.

Кварц, обыкновенный минерал белого цвета, интересен тем, что обладает пьезоэлектрическим эффектом. Это значит, что при деформации кварца на его поверхностях появляется напряжение, иногда настолько сильное, что возникает искра. Это - *прямой пьезоэлектрический эффект*, с ним знаком каждый, кто пользовался пьезоэлектрическими зажигалками. Существует и *обратный пьезоэффект*: при подаче напряжения на поверхности кварца он деформируется.

А теперь соберём устройство, показанное на рис. 2.12. Кварцевую пластинку (1) зажмём между металлическими электродами и присоединим их к усилителю. С выхода усилителя подадим часть сигнала через разделительный конденсатор (C) обратно на кварц. Включим усилитель. Теперь, если при малейшей деформации кварца возникнет небольшое напряжение на его поверхностях, то оно будет усилено усилителем. Усилен-

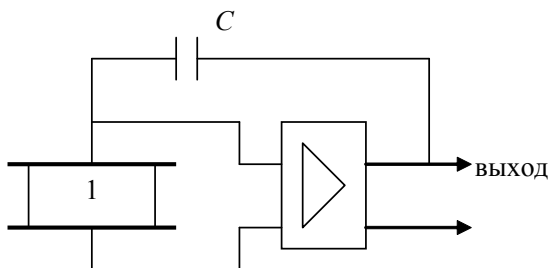


Рис. 2.12. Кварцевый генератор

ное напряжение по цепи обратной связи подается на кварц и вызывает обратный пьезоэффект – кварц деформируется. Эта новая деформация вызывает прямой пьезоэффект и возникает более сильное напряжение, которое опять-таки усиливается и идет обратно на кварц и т.д. Далее в силу упругих свойств кварца деформация меняет знак, например, растяжение сменяется сжатием. Изменяет знак и напряжение, которое также усиливается. Таким образом реализуется положительная обратная связь, в результате которой возникают упругие колебания кварца, а на выходе – переменное синусоидальное напряжение. Его частота зависит от массы кварца. Совершенно ясно, что если масса кварца велика, то частота будет малой, и наоборот.

А теперь покроем поверхность кварца пленкой сорбента. Масса сорбента, а значит, и масса всего кварца вместе с сорбентом зависит от влажности. Следовательно, частота колебаний, генерируемых кварцевым генератором, также зависит от влажности! Эту частоту можно измерить с помощью *частотомера* – прибора для измерения частоты. Мы в дальнейшем рассмотрим некоторые схемы частотомеров. Но в данном случае измерение имеет одну принципиально важную особенность. Дело в том, что частота колебаний кварца имеет порядок 10^6 Гц, а чувствительность метода – около 10 Гц на процент. Следовательно, *относительная чувствительность*, т.е. изменение частоты колебаний при единичном измерении влажности по отношению к величине самой частоты очень мала. Измерить такое малое изменение частоты – это по трудности примерно то же самое, что измерить расстояние в 10 км с точностью до одного миллиметра! Разумеется, это практически невозможно.

Как же все-таки измерить влажность таким способом? Для этого используют дифференциальный метод измерения. Применяют не один генератор, а два, причём частоты этих двух генераторов (рабочего и опорного) выбирают равными по порядку (рис. 2.13). Рабочий генератор (f) содержит кварц, покрытый плёнкой сорбента, опорный генератор наоборот, тщательно изолируется от влияния внешней среды. Его частота постоянна. Обозначим ее ν_r . Частоту, генерируемую рабочим кварцевым генератором, обозначим ν_f . Оба эти сигнала подаются на схему выделения разности частоты, которая выделяет частоту $\nu_d = |\nu_f - \nu_r|$. Эта разность невелика по порядку величины, так как опорная и рабочая частоты имеют одинаковый порядок. Однако изменение этой разности при изменении влажности такое же, как и ν_f . Измерить эту разность гораздо проще. Докажем, что относительная чувствительность дифференциального метода гораздо выше, чем прямого.

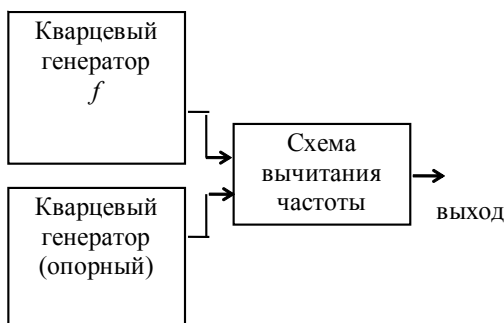


Рис. 2.13. Дифференциальный метод измерения частоты

Для прямого метода относительная чувствительность:

$$S_{r(1)} = \frac{1}{\nu_f} \frac{d\nu_f}{df} . \quad (2.43)$$

Для дифференциального метода:

$$S_{r(2)} = \frac{1}{\nu_d} \frac{d(\nu_f - \nu_r)}{df} = \frac{1}{\nu_d} \frac{d\nu_f}{df} . \quad (2.44)$$

Сравнивая (2.43) с (2.44) и учитывая, что $\nu_d \ll \nu_f$, видим, что:

$$S_{r(2)} \gg S_{r(1)} .$$

Таким образом, дифференциальный метод дает сильный выигрыш в относительной чувствительности прибора.

Российская промышленность выпускала сорбционный гигрометр АГС-210, основанный на измерении сопротивления раствора и пьезоэлектрические сорбционные гигрометры “Волна” и “Волна-2”. Широкого распространения в практике метеорологических измерений они не получили.

2.7. Радиационные гигрометры

Если в атмосфере распространяется электромагнитное излучение, то различные газы ослабляют его по-разному. Известно, что некоторые

спектральные участки особенно сильно поглощаются определенными газами. Эти участки получили название *полосы поглощения*. Диапазон длин волн, в котором происходит поглощение, определяется особенностями молекул газа, поэтому каждый газ имеет свои полосы поглощения. Их имеет и водяной пар. Наиболее существенная для метеоизмерений полоса поглощения H_2O лежит в ближней инфракрасной области и имеет максимум на длине волны $\lambda = 694,383$ нм.

Введём количественную характеристику поглощения - *массовый показатель поглощения* k_λ (индекс λ подчеркивает то обстоятельство, что массовый показатель поглощения зависит от длины волны). Предположим, есть некий источник монохроматического излучения, а на расстоянии l от него находится приёмник излучения. Тогда излучение J , принятое приемником, можно определить, воспользовавшись *законом Бугера-Ламберта-Беера*:

$$J = J_0 \cdot e^{-k_\lambda l \cdot a}, \quad (2.45)$$

где a - абсолютная влажность; J_0 - интенсивность потока излучения передатчика.

Отсюда ясна размерность величины k_λ - $\text{м}^2/\text{кг}$.

Закон Бугера-Ламберта-Беера даёт нам возможность определить абсолютную влажность, измерив интенсивность излучения J . Конечно, расстояние между приёмником и передатчиком, показатель ослабления k_λ , а также величина J_0 должны быть известны. Что касается показателя ослабления, то для длины волны 694,383 нм $k_\lambda = 4,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{кг}$. Что касается расстояния l , определим его из условия максимума чувствительности.

Чувствительность радиационного гигрометра (S) определим, как всегда, из общего определения чувствительности, приняв в качестве выходного параметра интенсивность излучения J . Тогда:

$$S = \frac{d\left(\frac{J}{J_0}\right)}{da} = -k_\lambda \cdot l \cdot e^{-k_\lambda l \cdot a}. \quad (2.46)$$

Видно, что чувствительность зависит от расстояния l сложным образом: если расстояние мало ($l \rightarrow 0$), то и чувствительность стремится к нулю. С другой стороны, при $l \rightarrow \infty$ чувствительность также стремится к нулю за счет экспоненты. Следовательно, существует такое расстояние, на котором значение чувствительности имеет максимум. Найдем его.

Ищем максимум S из условия:

$$\frac{dS}{dl} = 0.$$

Тогда

$$\frac{dS}{dl} = -k_{\lambda} \cdot e^{-k_{\lambda} \cdot l \cdot a} (1 - k_{\lambda} \cdot l \cdot a). \quad (2.47)$$

Отсюда возможны два решения - либо $e^{-k_{\lambda} \cdot l \cdot a} = 0$, и тогда $l \rightarrow \infty$, либо разность в скобках (2.47) равна нулю. Тогда

$$l = \frac{1}{k_{\lambda} \cdot a}. \quad (2.48)$$

Подставив в (2.48) характерное значение абсолютной влажности (например, $a = 10^{-2}$ кг/м³), получим искомое расстояние $l \approx 2,5$ км. Конечно, для практических измерений выбирают гораздо меньшие расстояния.

Отсюда становится ясным один из существенных недостатков метода: определяется только *осредненное значение влажности* того участка атмосферы, который находится между источником и приемником радиации. Но в то же время метод обладает и достоинством: он является абсолютно безынерционным.

Как же осуществить измерение влажности радиационным гигрометром? В качестве источника радиации лучше всего применить *лазер*. Лазер привлекателен, прежде всего, по причине монохроматичности излучения, его высокой интенсивности и малой расходимости пучка. Но и лазер не спасет нас от возможных погрешностей измерения. Рассмотрим их.

1. *Влияние селективно поглощающих газов* с полосой поглощения, близкой к полосе поглощения воды. Прежде всего это углекислый газ СО₂. Для ликвидации этой погрешности применяют следующий приём, который можно в шутку назвать *принципом мухи и слона*. Сравним нашу проблему со следующей: как избавиться от надоедливой мухи, если её нельзя ни прогнать, ни убить? Ответ: нужно ввести в комнату слона, и тогда уже на какую-то муху можно не обращать внимания.

Однако это должен быть «свой» ручной слон, чтобы он вел себя хорошо. В применении к нашей задаче это означает следующее. Нам мешает углекислый газ, содержащийся в атмосфере («муха»). На пути радиационного пучка помещают камеру с углекислым газом - *углекислотный фильтр* («слон»). Тогда основное поглощение углекислым газом происхо-

дит именно в камере, а малое количество углекислого газа в атмосфере (и ещё более малые его вариации!) уже не оказывает влияния на принятый сигнал.

2. *Влияние не селективно поглощающих примесей* (т.е. примесей, поглощающих весь спектр излучения, независимо от длины волны). Это, в основном, аэрозоль. Изменение содержания аэрозоля вызывает изменение принятого излучения. Поэтому принятое приёмником излучение будет зависеть от двух параметров: количества водяного пара и количества аэрозоля.

Эта погрешность может быть ликвидирована, учитывая именно неселективность поглощающих свойств аэрозоля. Поставим рядом с первым источником излучения второй, излучающий *вблизи, но все-таки вне полосы поглощения воды*. Это второе излучение будет ослабляться только аэрозолем, но не водяным паром. Далее вычислим отношение принятых сигналов J_1 / J_2 . Если будет изменяться количество аэрозоля, то отношение J_1 / J_2 не будет изменяться, так как J_1 и J_2 будут изменяться в одинаковой степени. Если же будет изменяться влажность, то будет меняться только J_1 , но не J_2 .

3. *Влияние паразитного сигнала* - излучения других источников, которые могут быть приняты приёмником. Прежде всего, это солнечная радиация, прямая или рассеянная, излучение местных предметов и т.п.

Эту погрешность устраним так же, как мы поступали, устраняя погрешность радиационных термометров. Применяется модулированный источник света - в случае применения лазеров это осуществить легче, применив *импульсный лазер* с известной частотой следования импульсов.

Приёмником инфракрасного излучения может быть любой из рассмотренных нами в разделе 1.10: фотоэлемент, фотоумножитель и т.д. В дальнейшем сигнал усиливается, причём характеристики усилителя подбираются так, чтобы происходило резонансное усиление на частоте следования импульсов лазера. Тогда паразитные сигналы не будут усиливаться и не пройдут в дальнейшие каскады прибора.

2.8. Конденсаторные гигрометры

В конденсаторных гигрометрах используется конденсатор с воздушным диэлектриком. Напомним, что электрический конденсатор - это две проводящие пластины (обкладки), между которыми находится диэлектрик. Если расстояние между обкладками конденсатора d , площадь пластин

конденсатора s , диэлектрическая проницаемость диэлектрика ε , то ёмкость конденсатора C определяется по известной формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot s}{d}, \quad (2.49)$$

где ε_0 - универсальная диэлектрическая постоянная.

Теперь представим, что в качестве диэлектрика применен влажный воздух. Его диэлектрическая проницаемость зависит от влажности:

$$\varepsilon = 1 + \frac{a}{T} \left(p + b \frac{E}{T} \cdot f \right), \quad (2.50)$$

где a и b - размерные константы; E - давление насыщения над водой; p - атмосферное давление.

Следовательно, ёмкость конденсатора с воздушным диэлектриком также зависит от влажности. Измерив её, можно определить влажность.

Теперь напомним формулу для чувствительности конденсаторного гигрометра, взяв в качестве выходной величину емкости конденсатора (C). Тогда чувствительность:

$$S = \frac{dC}{dT} = \frac{\varepsilon_0 \cdot s}{4\pi \cdot d} \cdot ab \frac{E}{T^2}. \quad (2.51)$$

Чувствительность конденсаторного гигрометра зависит от температуры. Внимательное рассмотрение формулы (2.51) приводит нас к выводу, что чувствительность *возрастает с ростом температуры*, так как величина E возрастает с ростом T гораздо сильнее T^2 . Кроме того, чувствительность зависит ещё и от относительной влажности. Покажем это на графике (рис. 2.14).

Рассматривая рис. 2.14, отметим два обстоятельства. Во-первых, сама чувствительность по абсолютной величине оказалась очень малой - порядка 10^{-4} на процент. Это в значительной степени снижает привлекательность метода. К счастью, современная измерительная техника позволяет регистрировать столь малые изменения емкости. Во-вторых, чувствительность конденсаторных гигрометров сильно снижается при малой влажности и низкой температуре. Это также накладывает ограничения на применимость метода. Тем не менее, главной привлекательной стороной метода является его полная безынерционность и малые размеры

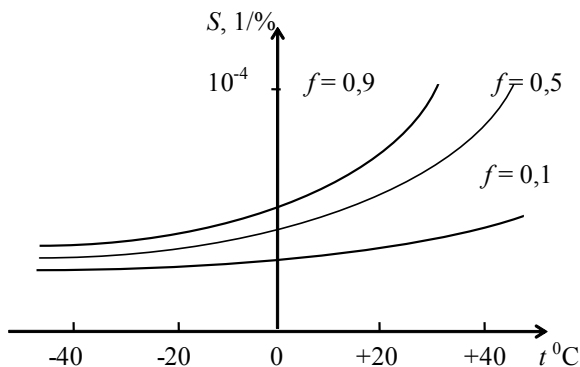


Рис.2.14. Зависимость чувствительности конденсаторных гигрометров от влажности

датчика. Измерение ёмкости конденсатора является решённой задачей для электроизмерений. Конденсаторные гигрометры выпускаются, например, финской фирмой “Vaisala”, признанным европейским лидером в области метеорологического приборостроения.

Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА

Параметры ветра (скорость и направление) являются важнейшими метеорологическими величинами, измеряемыми как на метеорологических станциях, так и на постах. Приборы, измеряющие скорость ветра, называются *анемометрами*.

Как известно, скорость ветра определяется как производная от пути по времени. Однако в метеорологии никогда не пользуются прямым измерением скорости ветра. Используют первичные преобразователи скорости ветра в другую величину, измерение которой менее затруднительно. Чаще всего скорость ветра преобразуется в угловую скорость вращения чашечной вертушки или винта, напоминающего по форме пропеллер. Такие преобразователи получили название *ротоанемометров*. Рассмотрим особенности их работы.

3.1. Теория ротоанемометров

Работу ротоанемометров рассмотрим на примере *чашечной вертушки*. Это вращающиеся лопасти с чашками, имеющими форму полушфер (иногда форма чашек выбирается близкой к параболоиду). Применяются как трехчашечные так и четырехчашечные вертушки, схематичный чертеж которой показан на рис. 3.1.

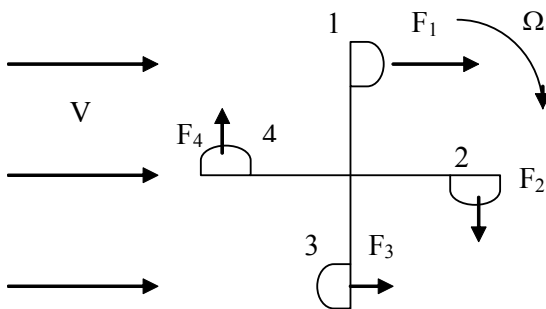


Рис. 3.1 Силы, действующие на чашечную вертушку в воздушном потоке

Рассмотрим силы, действующие на каждую чашку в ветровом потоке. Представим себе такое положение чашек вертушки, какое показано на рис.3.1. Тогда на первую чашку действует сила F_1 , направленная по потоку ветра. Вторая и четвертая чашки находятся в таком положении, что сила действия ветра направлена вдоль лопастей вертушки и не оказывает дей-

ствия на её вращение. Однако и на эти чашки действуют аэродинамические силы F_2 и F_4 , их происхождение такое же, как силы, действующей на крыло самолета. Наконец, на третью чашку действует сила F_3 , также направленная по потоку. Но значение этой силы меньше, чем F_1 , поскольку третья чашка обдувается потоком ветра, оказывая гораздо меньшее сопротивление, чем первая. В результате действия этих сил вертушка начнет поворачиваться в направлении, показанном круглой стрелкой. Чашка (1) будет двигаться по потоку ветра, чашка (3) - против потока. В результате силы будут изменяться. Когда вертушка займет другое положение, появятся проекции сил F_2 и F_4 , но проекции сил F_1 и F_3 будут уменьшаться.

Будем предполагать, что *общая сумма сил, действующих на вертушку в любом положении, постоянна и равна сумме сил, действующих на неё в положении, показанном на рисунке*. Под действием этих сил вертушка будет двигаться с угловым ускорением. Тогда сила F_1 будет уменьшаться (чашка движется по потоку!), а сила F_3 - наоборот, возрастать (чашка движется против потока). Ускоряющий момент сил уменьшается и через некоторое время скорость вращения вертушки станет постоянной. Назовем такое состояние *установившимся*, и обозначим угловую скорость вращения вертушки Ω . Покажем, что в установившемся состоянии угловая скорость вращения вертушки связана со скоростью ветра и выразим эту связь формулой.

Сохранив предположение о постоянстве суммы сил, действующих на вертушку, примем следующие дополнительные предположения.

1. Силы F_2 и F_4 малы по сравнению с силами F_1 и F_3 . Это достаточно хорошее приближение.

2. Сила трения на оси вертушки пренебрежимо мала. Это приближение достаточно хорошее при большой скорости ветра, но при малой скорости силу трения нельзя не учитывать. Предположение об отсутствии силы трения приведёт нас к некорректным результатам при малой скорости ветра, о чём нам придется вспомнить в дальнейшем.

3. Угловое ускорение равно нулю, скорость вращения вертушки принимаем постоянной.

С учётом этих предположений напомним уравнение вращения вертушки:

$$\sum_i M_i = K \cdot \frac{d\omega}{d\tau}, \quad (3.1)$$

где M - момент силы, действующей на чашку;

K - момент инерции всей вертушки;
 ω - угловая скорость вращения вертушки;
 τ - время.

Мы предположили, что угловое ускорение $d\omega / d\tau = 0$, следовательно, и левая часть уравнения (3.1) тоже равна нулю. Но момент сил, по нашему предположению, складывается только из моментов двух сил, F_1 и F_3 . Напишем сумму этих моментов:

$$M_1 - M_3 = 0.$$

Знак минус появляется с учётом того, что момент M_3 оказывает не ускоряющее, а тормозящее действие на вертушку. Тогда:

$$R \cdot p_1 - R \cdot p_3 = 0, \quad (3.2)$$

где R - радиус плеча вертушки;
 p - аэродинамическое давление на чашку.

Из аэродинамики известно, что:

$$p = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot S \cdot (V')^2, \quad (3.3)$$

где C - коэффициент аэродинамического сопротивления чашки;
 ρ - плотность воздуха;
 S - площадь проекции чашки на направление, перпендикулярное ветровому потоку;
 V' - скорость движения воздуха относительно чашки.

Поскольку первая чашка движется по потоку с линейной скоростью U , то для неё $V_1' = V - U$. Третья чашка движется против потока с той же линейной скоростью U ; для неё $V_3' = V + U$. Тогда уравнение (3.2) можно преобразовать к виду:

$$\frac{1}{2} C_1 \cdot \rho \cdot S \cdot (V - U)^2 = \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot \rho \cdot S \cdot (V + U)^2, \quad (3.4)$$

где C_1 и C_3 - коэффициенты аэродинамического сопротивления первой и третьей чашки.

Разделим обе части уравнения на произведение $C_3 \cdot U^2$. Тогда после очевидных сокращений получим:

$$\frac{C_1}{C_3} \left(\frac{V}{U} - 1 \right)^2 = \left(\frac{V}{U} + 1 \right)^2. \quad (3.5)$$

Отношение C_1/C_3 мало зависит от формы чашек. Опытным путём установлено, что $C_1/C_3 \approx 4$. Обозначив отношение $V/U \equiv \sigma$, перепишем уравнение (3.5) в виде:

$$4 \cdot (\sigma - 1)^2 = (\sigma + 1)^2. \quad (3.6)$$

Это квадратное уравнение относительно σ имеет два корня:

$$\sigma_1 = 3; \sigma_2 = 1/3.$$

Второе решение отбросим, так как очевидно что $V > U$, а следовательно, $\sigma > 1$. Следовательно, окончательное решение:

$$\sigma = 3. \quad (3.7)$$

Учтём соотношение между линейной и угловой скоростью вращения вертушки:

$$U = \Omega \cdot R.$$

Тогда получим:

$$\Omega = \frac{V}{\sigma \cdot R}. \quad (3.8)$$

Проанализируем полученное соотношение. Прежде всего, заметим, что Ω связана с V прямой зависимостью (рис. 3.2). Эта зависимость на-

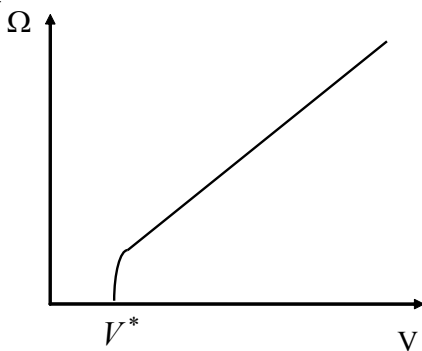


Рис. 3.2 Зависимость угловой скорости вращения вертушки Ω от скорости ветра V . V^* - пороговая скорость

рушается только при малой скорости ветра, где уравнение (3.8) не выполняется из-за влияния силы трения на оси вертушки. В том случае, когда сумма моментов сил, раскручивающих вертушку, становится равной моменту силы трения, угловая скорость вращения становится равной нулю. Соответствующая скорость ветра V^* называется *пороговой скоростью вертушки* (или порогом скорости ветра). При скорости ветра ниже пороговой вертушка не вращается, следовательно, измерить скорость ветра ниже значения V^* невозможно. По этой причине вертушку стараются сконструировать так, чтобы пороговая скорость была как можно меньшей. Для этого можно дать две рекомендации.

1. Трение на оси вертушки должно быть малым. В анемометрах, предназначенных для измерения очень малых скоростей ветра, ось вертушки оканчивается острым иглообразным наконечником, вращающимся в твёрдосплавном гнезде. Трение в такой конструкции очень мало.

2. Момент сил, раскручивающих вертушку, должен быть как можно большим. В чашечных анемометрах это труднодостижимо, так как существуют силы, тормозящие вертушку (F_3 на рис. 3.1). Поэтому для измерения малой скорости ветра применяют анемометры с винтом (крыльчаткой). Лопasti крыльчатки изготавливают из тонких металлических пластин. Такая конструкция чрезвычайно чувствительна к очень малой скорости воздушного потока.

Анемометр АСО-3, выпускаемый в России, имеет пороговую скорость 0,1...0,2 м/с. Это самая малая пороговая скорость, достигаемая ротоанемометрами. Другие ротоанемометры имеют пороговую скорость порядка 0,2 – 0,5 м/с.

Формула (3.8) дает возможность написать выражение для *чувствительности чашечной вертушки*. Согласно определению чувствительности прибора:

$$S = \frac{d\Omega}{dV} = \frac{1}{\sigma \cdot R} \quad (3.9)$$

Можно рекомендовать только один способ увеличения чувствительности вертушки. Для этого её радиус следует делать небольшим. К сожалению, это сопряжено с другой неприятностью: уменьшается момент сил, раскручивающих вертушку. Это приводит, во-первых, к увеличению пороговой скорости, а во-вторых, уменьшается момент сил, вращающих элементы преобразования скорости вращения в электрический сигнал.

Мы рассмотрели случай установившейся угловой скорости. Предпо-

лагалось, что угловое ускорение равно нулю. Это справедливо только в том случае, когда ветер имеет постоянную скорость и вертушка вращается в потоке достаточно продолжительное время. Но скорость ветра может изменяться. Более того, обычно ветер бывает порывистый, т.е. его скорость изменяется все время. Тогда наше предположение о постоянстве угловой скорости вращения вертушки неверно. Мы должны рассмотреть случай *неустановившейся угловой скорости*. Сделаем это.

Предположим, что скорость ветра изменилась. Соответственно будет изменяться угловая скорость вращения вертушки. Сколь скоро скорость вращения вертушки снова стабилизируется? Для ответа на этот вопрос снова обратимся к математике.

Обозначим изменяющуюся угловую скорость вращения вертушки через ω . Пусть в начальном состоянии (т.е. в нулевой момент времени) угловая скорость вращения вертушки была равна ω_0 . Снова обратимся к уравнению (3.1), но в этом случае мы уже не можем принять его левую часть равной нулю. Из аэродинамики известно, что сумма моментов сил, раскручивающих вертушку, может быть записана в виде:

$$\sum_i M_i = kV^2 \cdot \frac{\Omega - \omega}{\Omega}, \quad (3.10)$$

где Ω - новая установившаяся угловая скорость;

V - скорость ветра;

k - коэффициент, зависящий от устройства вертушки.

Тогда уравнение (3.1) перепишем в виде:

$$K \cdot \frac{d\omega}{d\tau} = kV^2 \frac{\Omega - \omega}{\Omega}. \quad (3.11)$$

Избавимся от знака “минус” перед переменной ω в правой части:

$$K \cdot \frac{d\omega}{d\tau} = -kV^2 \frac{\omega - \Omega}{\Omega}. \quad (3.12)$$

Теперь разделим переменные:

$$\frac{d\omega}{\omega - \Omega} = -\frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} d\tau$$

и проинтегрируем левую часть в пределах от ω_0 до ω , а правую - от 0 до τ :

$$\int_{\omega_0}^{\omega} \frac{d\omega}{\omega - \Omega} = - \int_0^{\tau} \frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} d\tau.$$

Получим:

$$\ln \frac{\omega - \Omega}{\omega_0 - \Omega} = - \frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} \cdot \tau.$$

Или:

$$\omega - \Omega = (\omega_0 - \Omega) \cdot e^{-\frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} \tau}. \quad (3.13)$$

Выделим в показателе экспоненты выражение $\frac{K \cdot \Omega}{k \cdot V} \equiv L$. Тогда:

$$\omega - \Omega = (\omega_0 - \Omega) \cdot e^{-\frac{V \cdot \tau}{L}}. \quad (3.14)$$

Мы получили соотношение, показывающее изменение разности угловой скорости вращения вертушки и установившейся угловой скорости. Видно, что с течением времени эта разность уменьшается, т.е. $\omega \rightarrow \Omega$. Но сколь быстро? Это зависит от скорости ветра V и от величины, которую мы обозначили через L . Уравнение (3.14) показывает, что эта величина L имеет размерность *длины*. Назовем эту величину *путём синхронизации вертушки*. Смысл этой величины становится понятным, если в уравнении (3.14) принять $V \cdot \tau = L$. Тогда:

$$\omega - \Omega = \frac{\omega_0 - \Omega}{e}. \quad (3.15)$$

Значит, *путь синхронизации - это путь, проходимый воздушным потоком за время, в течение которого разность между угловой скоростью вращения вертушки и установившейся угловой скоростью уменьшается в e раз.*

Обратимся к формуле для пути синхронизации. С учётом выражения (3.8) имеем:

$$L = \frac{K \cdot \Omega}{k \cdot V} = \frac{K}{k \cdot R \cdot \sigma}. \quad (3.16)$$

В правую часть (3.16) входят величины, зависящие только от конструкции вертушки - момент инерции, радиус плеча. Следовательно, путь синхронизации является постоянной для данной вертушки величиной. Если вертушка содержит n чашек, каждая из которых имеет массу m , то суммарный момент инерции вертушки:

$$K = n \cdot mR^2.$$

Тогда:

$$L = \frac{n \cdot m \cdot R}{k \cdot \sigma}. \quad (3.17)$$

Для того чтобы вертушка быстрее воспринимала изменение скорости ветра, необходимо, чтобы путь синхронизации был бы малым. Формула (3.17) показывает, что для этого вертушка должна быть легкой (малое m), небольшой (малое R), а число чашек - минимальным.

Можно, конечно, (по аналогии с инерцией термометров) ввести время *синхронизации* τ^* - время, в течение которого разность угловых скоростей $(\omega - \Omega)$ уменьшается в e раз по сравнению с первоначальной разностью. Но если путь синхронизации является постоянной величиной для данной вертушки, то время синхронизации *зависит от скорости ветра!* Действительно, $L = V \cdot \tau^*$, следовательно, с увеличением скорости ветра время синхронизации τ^* уменьшается.

Мы пришли к удивительному выводу. Чем больше скорость ветра, *тем быстрее её воспринимает вертушка!* Это действительно неожиданно, поскольку первоначальная разность угловых скоростей может быть больше, а время реакции вертушки - меньшим.

Рассмотрим рис.3.3. Пусть начальная угловая скорость вращения вертушки ω_0 . В первом случае скорость ветра, а значит, и установившаяся угловая скорость вертушки Ω - невелика, соответствующее время синхронизации τ_1^* достаточно велико. Анемометр медленно воспринимает новую угловую скорость. Во втором случае скорость ветра, соответственно и новая установившаяся угловая скорость - велика, время синхронизации τ_2^* - мало. Анемометр быстро раскручивается до новой угловой скорости.

Мы видим, что инерционные свойства анемометров отличаются от инерции термометров, которую мы рассматривали ранее. Коэффициент инерции термометров, имеющий размерность времени, не зависит от температуры, а время синхронизации ротоанемометров, имеющее тот же смысл, зависит от скорости ветра. Соответственно по-разному реагируют

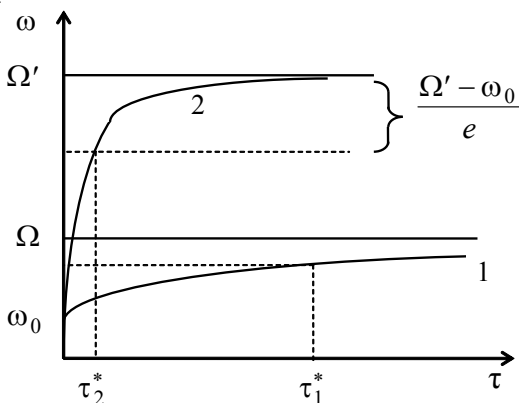


Рис. 3.3 Изменение угловой скорости вращения вертушки при малой (1) и при большой (2) скорости ветра

термометры и анемометры на флуктуации измеряемой величины. Рассмотрим реакцию вертушки на прямоугольные флуктуации скорости ветра, так же как мы это делали для термометров.

На рис. 3.4 показаны прямоугольные флуктуации скорости ветра. Легко понять, что средняя скорость ветра может быть показана линией, проведённой посередине прямоугольных флуктуаций (мелкий пунктир на рис. 3.4). А теперь посмотрим, как будет реагировать на такие флуктуации ротоанемометр. Высокую скорость ветра он воспринимает быстро, малую - медленно (кривая на рис. 3.4). Осреднение такой кривой даст результат, показанный крупным пунктиром - несколько выше истинной средней скорости ветра.

Следовательно, ротоанемометр *завышает среднюю скорость ветра!* Эта ошибка будет проявляться тем сильнее, чем больше путь синхронизации ротоанемометра и чем меньше период флуктуаций. Легко понять,

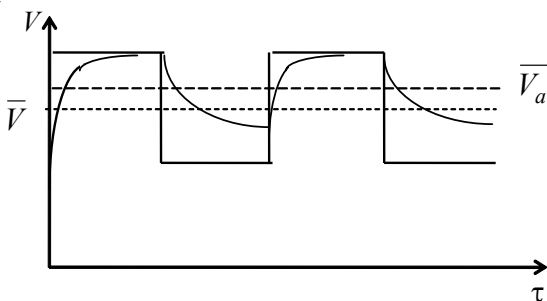


Рис. 3.4 Восприятие вертушкой прямоугольных флуктуации скорости ветра

что если период флуктуаций гораздо больше времени синхронизации, то искажения истинной скорости ветра будут не столь уж сильно сказываться. Ошибка будет тем меньше, чем меньше амплитуда флуктуаций.

Ротоанемометры, применяемые для метеорологических измерений, имеют путь синхронизации от нескольких метров до нескольких десятков метров. Эта величина приводится в паспорте прибора.

Существующие ротоанемометры дают возможность измерять скорость ветра в широких пределах - от 0,2 м/с (анемометры с легкой крыльчаткой) до 50–60 м/с (анемометры с жестким винтом).

3.2. Индукционные анемометры

Рассмотрим теперь конкретные виды ротоанемометров. Собственно, различие будет заключаться только в устройстве преобразователей угловой скорости в другие величины, которые сравнительно легко измерить существующими приборами. Что касается самого датчика - чашечной вертушки или винта, то его устройство будет принципиально тем же самым для разных типов анемометров. Поэтому все закономерности, рассмотренные нами в предыдущем параграфе, можно смело применять для всех типов ротоанемометров.

Итак, рассматриваем *индукционные ротоанемометры*. В свою очередь, этот тип анемометров подразделяется на *дистанционные анемометры с генератором тока* и *анемометр АРИ-49*. Рассмотрим их по очереди.

Индукционный анемометр с генератором тока состоит из датчика - чашечной вертушки или винта (1), ось которого (2) соединена с постоянным магнитом (3) (рис. 3.5).

Мы уже понимаем, что ось вертушки вращается с угловой скоростью Ω , которая связана со скоростью ветра уравнением (3.8). Вместе с ней вращается и магнит (3) с той же угловой скоростью. Около магнита расположены две неподвижные катушки L_1 и L_2 . В катушках возникает переменная ЭДС, амплитуда которой зависит от угловой скорости вращения магнита. Это и есть генератор переменного тока, устройство которого известно из школьного курса физики. В данном случае он используется не для получения электроэнергии (хотя это самый настоящий ветро-электрогенератор!), а для измерения скорости ветра. Ведь амплитуда переменной ЭДС зависит от угловой скорости вращения магнита. Но непосредственно измерять амплитуду неудобно. Поэтому соберем схему,

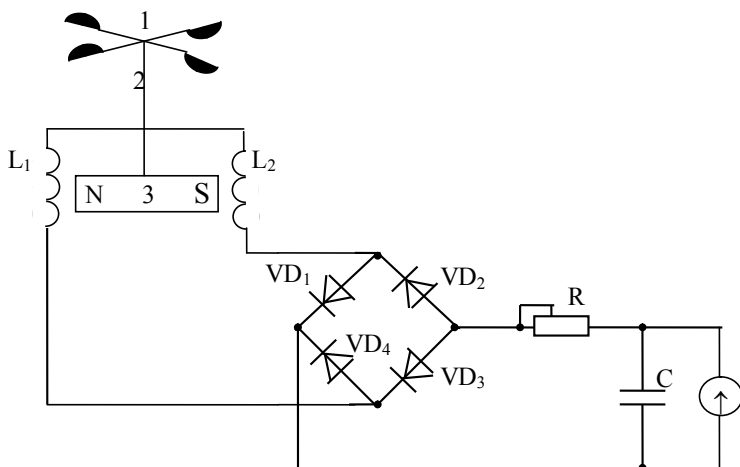


Рис. 3.5. Индукционный анемометр с генератором тока

изображенную на рис. 3.5. В неё включен выпрямитель на диодах $VD_1 \dots VD_4$. Он работает следующим образом. На вертикальную диагональ мостовой диодной схемы подается переменный ток. Когда в верхней точке диагонали положительный полупериод, ток проходит через диод VD_1 влево и не проходит вправо через VD_2 . Когда положительный полупериод подается на нижнюю точку мостовой схемы, ток проходит влево через диод VD_4 и не проходит вправо через VD_3 . Поэтому в горизонтальной диагонали моста будет ток одного знака (рис. 3.6).

Однако этот ток пульсирующий, поэтому его непосредственное измерение опять-таки затруднительно. Для его измерения стрелочным прибором необходим сглаживающий RC-фильтр, состоящий из конденсатора C и сопротивления R (рис. 3.5). Конденсатор заряжается через сопротивление, но только тогда, когда амплитуда высока. Зарядка происходит сравнительно медленно, ведь постоянная времени заряда определяется про-

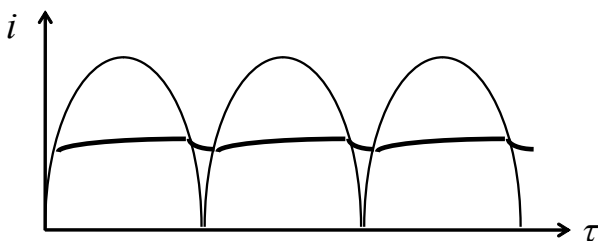


Рис. 3.6. Пульсации выпрямленного тока и их сглаживание

изведением RC . В промежутках между полупериодами происходит разрядка конденсатора, тоже довольно медленно (жирная кривая на рис. 3.6). В результате, напряжение на конденсаторе меняется очень незначительно, практически оно постоянно. Возникающий постоянный ток измеряют стрелочным или цифровым прибором.

Свяжем значение возникшего постоянного тока со скоростью ветра. Для этого напишем выражение для переменной ЭДС, возникающей в катушках при вращении магнита с угловой скоростью Ω :

$$E = -K \cdot N \cdot s \cdot \frac{dB}{d\tau}, \quad (3.18)$$

где E – возникающее в катушке ЭДС;

K – количество катушек;

N – количество витков в катушке;

s – площадь одного витка;

B – магнитная индукция.

С учётом известных соотношений:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H,$$

где H – напряженность магнитного поля, создаваемая постоянным магнитом в катушке, и

$$H = H_{\max} \cdot \cos(\Omega \cdot \tau)$$

формула (3.18) примет вид:

$$E = K \cdot N \cdot s \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot H_{\max} \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega \cdot \tau). \quad (3.19)$$

здесь μ – магнитная проницаемость материала, из которого изготовлен сердечник катушки;

μ_0 – магнитная постоянная;

$H_{\max}$ – максимальная напряженность магнитного поля в катушке (в момент прохождения полюса магнита около катушки).

Теперь выразим значение переменного тока, протекающего через катушки:

$$i = \frac{E}{r_{\Sigma}}, \quad \text{где } r_{\Sigma} - \text{суммарное сопротивление всей цепи.}$$

Далее найдем значение выпрямленного и сглаженного тока $\bar{I}$. Мысленно заменим жирную линию на рис. 3.6 прямой. Тогда величина тока, осредненная за один полупериод, может быть найдена:

$$\bar{I} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i d(\Omega \cdot \tau) \quad (3.20)$$

или

$$\bar{I} = KN \cdot s \cdot \mu \cdot \mu_0 H_{\max} \cdot \Omega \frac{1}{\pi \cdot r_{\Sigma}} \cdot \int_0^{\pi} \sin(\Omega \cdot \tau) d(\Omega \cdot \tau). \quad (3.21)$$

Значение последнего интеграла в формуле (3.21) равно 2. Подставив это значение и заменив Ω по формуле (3.8), имеем:

$$\bar{I} = \frac{2}{\pi \cdot r_{\Sigma}} \cdot KN \cdot s \cdot \mu \cdot \mu_o H_{\max} \cdot \frac{V}{\sigma \cdot R}. \quad (3.22)$$

Эта формула дает нам возможность написать выражение для чувствительности индукционного анемометра (S):

$$S = \frac{d\bar{I}}{dV} = \frac{2}{\pi \cdot r_{\Sigma}} \cdot KN \cdot s \cdot \mu \cdot \mu_o H_{\max} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot R}. \quad (3.23)$$

Полученное выражение позволяет предложить достаточно много способов увеличения чувствительности. Перечислим их и оценим целесообразность применения.

1. Увеличение количества катушек K . Это неизбежно приведёт к увеличению размеров анемометра, что не всегда желательно.

2. Увеличение числа витков N . Нежелательно по тем же причинам. Можно, впрочем, применить более тонкий провод для обмоток, но в этом случае возрастет сопротивление катушки, что повлечёт увеличение общего сопротивления r_{Σ} , а значит, уменьшение чувствительности.

3. Увеличение площади витка s . Это также приведёт к увеличению размера прибора.

4. Увеличение магнитной проницаемости μ сердечника катушки. Это наиболее многообещающий путь. Известны материалы (феррит, пермаллой) с очень высокими значениями магнитной проницаемости. Например, некоторые сорта ферритов имеют $\mu = 700$, а магнитная проницае-

мость такого материала, как пермаллой может иметь порядок 10^3 . Соответственно, во столько же раз по сравнению с воздушным сердечником возрастает чувствительность анемометра.

5. Увеличение намагниченности постоянного магнита $H_{\max}$. Этот путь также применяется, хотя сильный магнит имеет недостаток: он быстрее размагничивается, что требует частой поверки и корректировки показаний прибора.

6. Уменьшение сопротивления всей цепи r_{Σ} . Теоретически этот путь возможен, практически он не применяется, так как это приводит к появлению погрешности (см. ниже).

7. Уменьшение радиуса плеча вертушки R . Этот вариант уже обсуждался (раздел 3.1).

Погрешности индукционного анемометра. Перечислим основные погрешности:

1. *Температурная погрешность.* Разумеется, датчик анемометра вместе с генератором тока должен быть расположен вне помещения, например, на мачте. Соответственно, катушки генератора будут иметь температуру окружающего воздуха, а она может колебаться в широких пределах. Соответственно, будет колебаться и сопротивление катушек R_k , что может отразиться на сопротивлении всей цепи r_{Σ} . Это вызовет (формула (3.22)) изменение тока $\bar{I}$, а значит, приведёт к погрешности измерений.

Для ликвидации этой погрешности воспользуемся уже известным принципом «мухи и слона». Значение сопротивления R (рис. 3.5) выберем большим, так чтобы соблюдалось неравенство: $R \gg R_k$. Тогда общее сопротивление r_{Σ} будет:

$$r_{\Sigma} = R_k + R_{kb} + R + R_i \approx R + R_i, \quad (3.24)$$

где R_{kb} - сопротивление кабеля; R_i - внутреннее сопротивление измерительного прибора. Как правило, $R_{kb} \ll R_i$.

Мы видим, что последнее выражение в формуле (3.24) уже не зависит от сопротивления катушек, следовательно, его изменения теперь не сказываются на общем сопротивлении цепи, а значит, температурная погрешность исчезает.

Из формулы (3.23) видно, что при увеличении сопротивления цепи неизбежно уменьшается чувствительность прибора. Но мы уж знаем, что дилемма «чувствительность или погрешность?» решается всегда в пользу уменьшения погрешности.

Уменьшение чувствительности следует воспринимать как цену уменьшения погрешности.

2. *Размагничивание постоянного магнита* (уменьшение $H_{\max}$). В условиях неизбежной тряски при работе анемометра, а также из-за колебания температуры постоянный магнит со временем уменьшает свою намагниченность. Соответственно, уменьшается значение тока $\bar{I}$. Для коррекции этой погрешности анемометр периодически сравнивают с образцовым прибором (эту операцию рекомендуется проводить в лабораторных условиях в аэродинамической трубе). В случае обнаружения ошибки в показаниях анемометра достаточно несколько изменить значение сопротивления R , для этого оно сделано переменным. Значение тока изменится согласно закону Ома, и показания анемометра приводятся в полное соответствие с образцовым прибором.

Анемометр АРИ-49 также носит название индукционного (анемометр ручной индукционный). Однако он не является дистанционным прибором. При измерениях его необходимо держать в руке. Это довольно грубый прибор, его возможная погрешность составляет $\pm (0,5 + 0,05 \cdot V)$, где V - скорость ветра. Пороговая скорость анемометра АРИ-49 составляет 1 – 1,5 м/с. Устройство прибора показано на рис. 3.7. Магнит (3) вращается внутри металлической чашки (4) чашечной вертушкой (1). Чашка может поворачиваться вокруг своей оси, но она удерживается пружиной (5) в нейтральном положении.

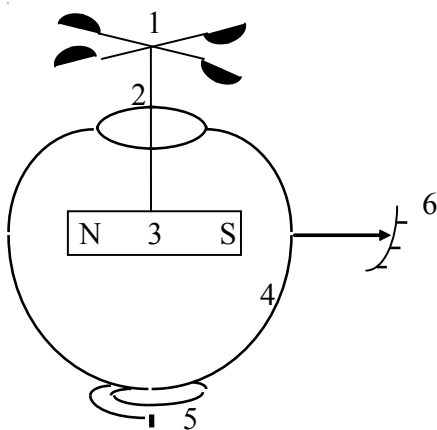
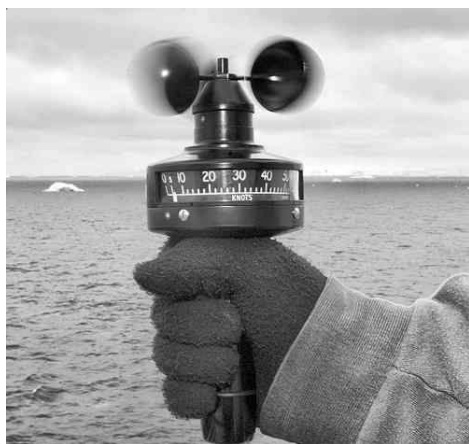


Рис. 3.7. Индукционный анемометр АРИ-49

Анемометр работает следующим образом. Магнитное поле постоянного магнита возбуждает индукционные токи в корпусе чашки. Эти токи возрастают, если возрастает скорость ветра (а значит, и угловая скорость вращения магнита!). В свою очередь, индукционные токи возбуждают вторичное магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита. Это взаимодействие таково, что вторичное поле тормозит вращение магнита. Иначе и быть не может. Если бы оно ускорило вращение магнита, то магнит вращался бы быстрее, а вместе с этим увеличивались бы наведенные токи. Следовательно, увеличивалось бы вторичное поле, которое опять-таки ускоряет магнит... (Мы бы получили вечный двигатель!). Но магнит связан с вертушкой, поэтому он не тормозится, а наоборот - чашка увлекается вслед за магнитом, подобно неразумному пешеходу, который попытался бы затормозить движущийся автомобиль.

Таким образом, чашка поворачивается на некоторый угол, тем больший, чем быстрее вращается магнит, т.е. чем больше скорость ветра. Этот угол показывается стрелкой на шкале (6), проградуированной в метрах в секунду.

Анемометр АРИ-49 привлекателен своей простотой и отсутствием каких-либо электронных схем. Это, однако, является и его недостатком, так как скорость ветра не преобразуется в электрический сигнал, и значит, анемометр не может быть использован для дистанционных измерений, например, в составе автоматических метеорологических станций.

3.3. Импульсные (контактные) анемометры

Если в индукционных анемометрах мерой скорости ветра является амплитуда генерируемого тока, то в импульсных анемометрах мерой скорости ветра является частота импульсов, генерируемых с помощью какого-либо устройства. Можно привести множество примеров таких устройств. Мы рассмотрим всего два: *геркон с магнитом* и *фотоэлектрический модулятор*.

Слово “геркон” означает “герметичный контакт”. Этот элемент широко применяется в электронике. Он представляет собой небольшую стеклянную трубочку, запаянную с двух сторон, из которой полностью откачен воздух (рис. 3.8).

Внутри трубочки находятся два железных лепестка, покрытых тонким слоем золота или серебра для улучшения их проводимости. Лепестки не

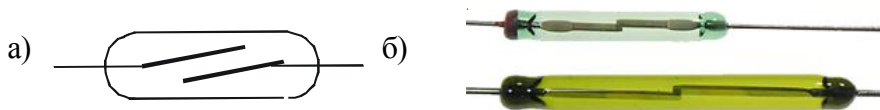


Рис. 3.8. Геркон.

а) схематичное изображение; б) внешний вид

соприкасаются между собой, таким образом, в обычном состоянии контакты разомкнуты, геркон не проводит электрический ток. Но если рядом с герконом оказывается постоянный магнит, то лепестки к нему притягиваются, замыкаются друг с другом и геркон становится проводником тока. При удалении магнита упругие лепестки снова размыкаются. Можно сказать, что геркон - это ключ, управляемый магнитом.

Устройство импульсного анемометра с герконом показано на рис. 3.9. Датчиком скорости ветра является чашечная вертушка (1). На её оси (2) укреплен постоянный магнит (3), вращающийся вместе с вертушкой. Рядом с магнитом помещен геркон (4), соединенный с источником тока (5). Когда один из полюсов магнита оказывается рядом с герконом, его лепестки замыкаются и на выходе появляется импульс тока. Легко видеть, что частота импульсов зависит от угловой скорости вращения магнита, т.е. от скорости ветра. Эпюра выходного тока показана на рис. 3.9.

Для измерения частоты импульсов применяются частотомеры, преобразующие частоту в напряжение, которое потом измеряется стрелочным или цифровым прибором. В более современных цифровых приборах при-

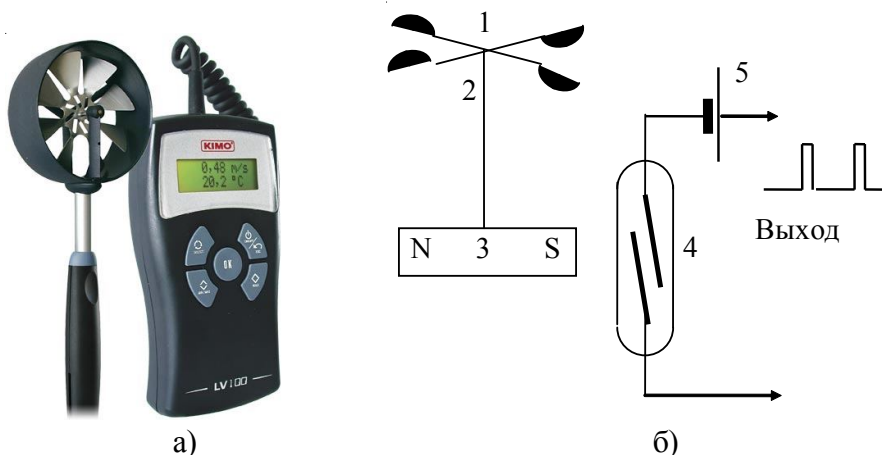


Рис. 3.9. Импульсный анемометр.

а) внешний вид; б) устройство анемометра с герконом

меняются цифровые счетчики, осуществляющие подсчёт электрических импульсов за определенное время, задаваемое *таймером*. Это более удобно тем, что таймер вводит осреднение скорости ветра за время подсчёта импульсов. Ведь в метеорологии чаще всего представляет интерес именно осредненная скорость ветра - за 2 минуты или за другой промежуток времени.

Преимущество импульсных анемометров состоит в том, что измеряемым параметром является *частота импульсов*, а не амплитуда. Дело в том, что при передаче сигнала (например, по длинному электрическому кабелю) амплитуда сигнала может исказиться. Частота импульсов подвержена искажению гораздо меньше. Действительно, трудно представить себе, что импульс может “потеряться” при передаче или, наоборот, возникнет лишний импульс. Способ, при котором измеряемым параметром является частота, называют *частотной модуляцией сигнала*, а если измеряется амплитуда - *амплитудной модуляцией*. Приборы с частотной модуляцией гораздо устойчивее к помехам, чем приборы с амплитудной модуляцией.

Широко применяемый в метеорологических измерениях анеморумбометр М-63М1 является прибором с частотно-модулированным сигналом. В датчике скорости ветра М-27 применён импульсный анемометр с герконом.

Рассмотрим теперь другую конструкцию - фотоэлектрический модулятор. Главным элементом преобразователя сигнала здесь является диск, снабженный перфорацией, т.е. зубцами (рис. 3.10).

Диск вращается с помощью чашечной вертушки, скорость его вращения зависит от скорости ветра. Над одним из краев диска находится источник света - это может быть электрическая лампочка или светодиод (VD1 рис. 3.11). Под диском, на одной прямой с источником света находится приёмник света - обычно это фотодиод (VD2, рис. 3.11). Световой поток от светодиода к фотодиоду может проходить только через перфорацию диска-фото модулятора. Таким образом, на фотодиод поступают импульсы света, частота которых зависит от скорости ветра. Фотодиод открывается при поступлении на него импульса света, и на выход поступают импульсы тока. Частота этих импульсов зависит от скорости ветра и измеряется частотомерами или цифровыми счетчиками.

Частота модуляции в анемометре с фотомодулятором гораздо выше, чем частота в анемометре с герконом. Это объясняется тем, что число зубцов по периметру диска-фото модулятора может быть большим (до

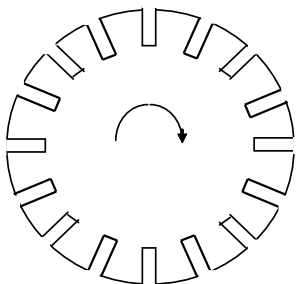


Рис. 3.10. Диск-фотомодулятор

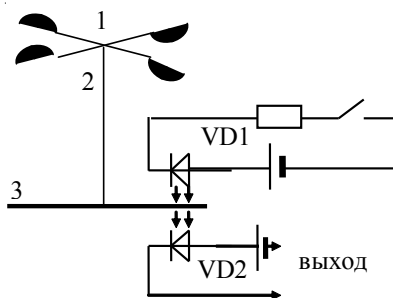


Рис. 3.11. Импульсный анемометр с фотомодулятором

нескольких десятков) и, следовательно, один оборот диска соответствует большому количеству импульсов. В анемометрах с герконом во время одного оборота генерируется лишь два импульса. Большая частота модуляции позволяет уменьшить время подсчёта импульсов, необходимое для измерения частоты. Следовательно, уменьшается общее время измерения. Поэтому анемометры с фотомодулятором применяют в тех случаях, когда необходима малая инерция. Конечно, это должно сопровождаться мерами по уменьшению инерции самой вертушки (или винта), что уже обсуждалось в разделе 3.1.

3.4. Акустические анемометры

Акустические анемометры (рис. 3.12) основаны на измерении времени прохождения акустического (звукового) сигнала от передатчика к приёмнику.

Если расположить передатчик и приёмник акустического сигнала на расстоянии L выбранном вдоль направления ветра, то время прохождения сигналом этого расстояния можно определить по очевидной формуле:

$$\tau = \frac{L}{(C \pm V)}, \quad (3.24)$$

где C – скорость звука в воздухе (около 333 м/с);
 V – скорость ветра.



Рис. 3.12. Акустический анемометр

Знак в знаменателе формулы выбирается в зависимости от направления ветра. Если ветровой поток направлен от передатчика к приёмнику, то выбирается знак минус, если от приёмника к передатчику – плюс. Если же скорость ветра направлена под углом к направлению от передатчика к приёмнику, то в формулу (3.24) следует подставить проекцию скорости ветра на это направление с соответствующим знаком.

Однако скорость звука (C) в воздухе зависит также и от его температуры (раздел 1.11), следовательно, время τ в формуле (3.24) зависит от двух параметров. Для исключения его зависимости от температуры соберём установку, изображённую на рис. 3.12.

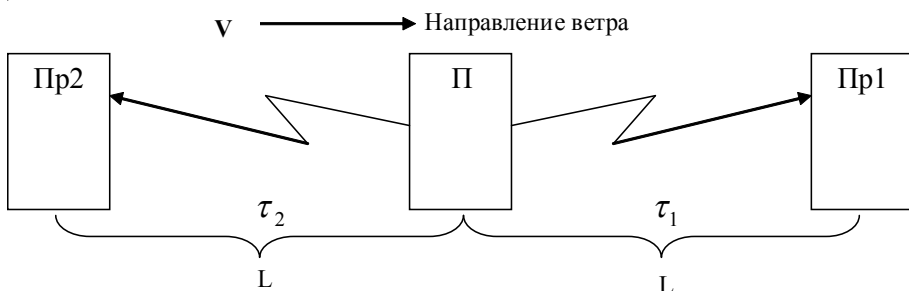


Рис. 3.12. Пояснение действия акустического анемометра

Здесь П – передатчик акустического сигнала, Пр1 и Пр2 – приёмники (микрофоны). Вся установка располагается вдоль направления ветра, на рисунке оно указано стрелкой. Тогда время (τ_1) прохождения сигнала до приёмника Пр1 можно определить по формуле (3.24), поставив в знаменателе знак «+», а время (τ_2) прохождения сигнала до приёмника Пр2 – по той же формуле, но со знаком «-». Разность $\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1$ выразится формулой:

$$\Delta \tau = \frac{L}{(C - V)} - \frac{L}{(C + V)} = \frac{2LV}{C^2 - V^2} \quad (3.25)$$

С учётом того, что скорость звука значительно больше скорости ветра, и, следовательно, $C^2 \gg V^2$, формула (3.25) может быть с достаточной точностью переписана в виде:

$$\Delta \tau = \frac{2LV}{C^2} \quad (3.26)$$

Следовательно, для определения скорости ветра необходимо определить разность времен $\Delta \tau$. Это может быть сделано с помощью современ-

ных приборов – таймеров (см. ниже). Акустический сигнал передается короткими импульсами. Так работают *импульсные акустические анемометры*.

Чувствительность акустических анемометров найдём, пользуясь общим определением чувствительности прибора, с учётом того, что входной величиной является скорость ветра V , а выходной – разность $\Delta \tau$.

$$S = \frac{d\Delta\tau}{dV} = \frac{2L}{C^2} \quad (3.27)$$

Как видно из формулы, для увеличения чувствительности есть только один путь – увеличение расстояния L между передатчиком и приемниками. Однако это ведёт к увеличению размеров прибора. Практически это расстояние выбирают порядка нескольких десятков сантиметров, тогда и приёмник и передатчики можно располагать на флюгарке, которая занимает положение вдоль направления ветра.

Рассмотрим несколько иную конструкцию – *фазовые акустические анемометры*. В анемометрах этого типа акустический сигнал определённой частоты генерируется передатчиком непрерывно. Как известно, это синусоидальный сигнал, который преобразуется приёмником в электрический синусоидальный сигнал той же частоты. Тогда сигнал, пришедший на второй приёмник, опаздывает на время $\Delta \tau$ по отношению к сигналу, пришедшему на первый приёмник (рис. 3.13).

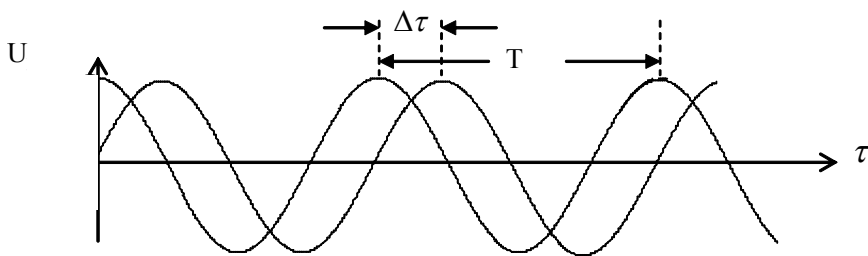


Рис. 3.13. Разность фаз сигналов в фазовом акустическом анемометре

Следовательно, появляется разность фаз $\Delta \varphi$ между двумя сигналами, которая может быть выражена известной формулой:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta \tau}{T} \cdot 2\pi = \frac{2LV}{C^2} \cdot \frac{2\pi}{T} = \frac{2LV \cdot f}{C^2} \cdot 2\pi \quad (3.28)$$

Последнее равенство написано с учётом соотношения между периодом сигнала T и частотой f .

Чувствительность фазового акустического анемометра найдём, продифференцировав формулу (3.28):

$$\frac{d\Delta\varphi}{dV} = \frac{2L \cdot f}{C^2} \cdot 2\pi. \quad (3.29)$$

Как видно из формулы, для увеличения чувствительности фазового акустического анемометра можно рекомендовать увеличение частоты акустического сигнала f . В этом случае разность фаз возрастает, однако разность времен Δt остается неизменной, определяемой по формуле (3.26). По этой причине в акустических анемометрах используют ультразвук, имеющий частоту более 20000 Гц. Это даёт возможность получить достаточно высокую чувствительность даже при малой базе L между излучателем и приёмниками. Применение ультразвука имеет и то преимущество, что человеческое ухо не воспринимает ультразвуковой сигнал, и прибор становится «тихим».

Увеличение частоты имеет свой предел. Он связан с тем, что сдвиг фаз не должен превышать 2π . В противном случае прибор воспримет его как $\varphi - 2\pi$, что, конечно, внесёт сильную погрешность в измерения.

Главными достоинствами акустических анемометров следует считать следующие:

1. Практически полное отсутствие инерции. Скорость ветра измеряется в момент её изменения от прежнего значения. Это требование весьма важно, если требуется измерять порывы ветра с малым периодом.

2. Отсутствие каких-либо движущихся частей в приборе – чашечной вертушки или винта, необходимых для ротоанемометров. Это обстоятельство следует учитывать при выборе анемометра для работы в условиях низких температур и большой влажности, когда вращению винта препятствуют силы трения, создаваемые при застывании смазки или возникновении изморози.

3.5. Лазерный доплеровский измеритель скорости ветра

Лазерный доплеровский анемометр основан на явлении Доплера. Это явление, как известно из физики, проявляется при движении приёмника периодического сигнала (акустического или оптического) относительно

передатчика. Предположим, световой сигнал с длиной волны λ излучается лазером в атмосфере. В данном случае лазер в качестве излучателя необходим, так как он гарантирует постоянство длины волны светового сигнала. Свет воспринимается частицей аэрозоля, движущейся со скоростью ветра. Явление Доплера состоит в том, что частота светового сигнала, воспринятого частицей, будет отличаться от частоты излученного сигнала! Это легко понять. Предположим, частица движется по световому лучу от излучателя. Тогда в течение периода светового сигнала частица успевает переместиться от наблюдателя, следовательно, период принятого сигнала несколько возрастет, а частота, соответственно, уменьшится. При движении частицы по направлению к приёмнику период уменьшается, а частота, наоборот, увеличивается.

Это изменение частоты можно выразить известной из физики формулой:

$$\nu' = \frac{C \pm V}{\lambda}, \quad (3.30)$$

где ν' – частота светового сигнала, воспринятого частицей;

C – скорость света ($C = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$);

V – скорость ветра;

λ – длина волны излученного сигнала.

Знак «+» соответствует движению частицы к источнику света, знак «–» – от источника.

Далее происходит переизлучение светового сигнала частицей (отражение света от частицы). При этом частица выступает в качестве излучателя, а приёмник света располагается в непосредственной близости от лазера. Следовательно, эффект Доплера проявляется вторично, и частота светового сигнала ν , воспринятого приёмником, выражается формулой:

$$\nu = \frac{C \pm 2 \cdot V}{\lambda}. \quad (3.31)$$

Возникает вопрос: можно ли измерить частоту принятого сигнала ν и далее рассчитать скорость ветра по формуле (3.31)? Теоретически это можно сделать, практически это – неосуществимо, так как скорость света на много порядков больше скорости ветра и изменение частоты будет ничтожно малым. Чтобы показать это, напомним формулу для относительной чувствительности такого предполагаемого метода. Пользуясь определе-

нием относительной чувствительности (формула (2) вводной части), имеем:

$$S_{rel} = \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dV} = \frac{2}{C \pm 2 \cdot V}. \quad (3.32)$$

Видно, что относительная чувствительность имеет порядок 10^{-8} , поскольку в знаменателе стоит скорость света. Таким образом, прямой метод измерения здесь невозможен.

Применим для измерения скорости ветра дифференциальный метод. Для этого соберём установку, оптическая схема которой представлена на рис. 3.14.

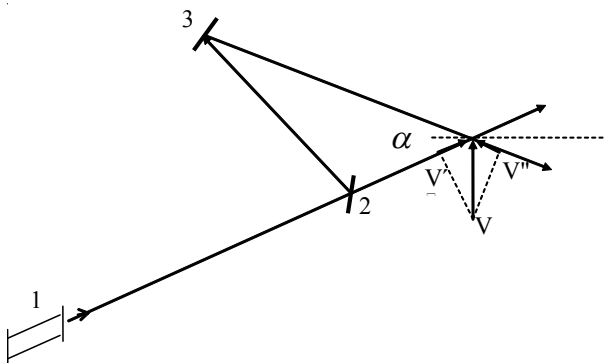


Рис. 3.14. Оптическая схема лазерного анемометра

Световой пучок, излученный лазером (1) проходит через полупрозрачную пластину (2). Примерно половина света отражается пластиной и направляется к зеркалу (3). Отраженный от зеркала световой пучок пересекается под углом α с основным пучком в точке, которая может быть удалена от установки на расстояние до нескольких десятков метров. Предположим, что направление ветра (V) перпендикулярно биссектрисе угла α , следовательно, в том же направлении движется отражающая свет частица аэрозоля.

Тогда от частицы отражаются оба световых пучка. При этом явление Доплера проявляется относительно проекции скорости ветра на направление лучей V' и V'' . Но изменение частоты происходит с разными знаками, поскольку проекция скорости ветра на проходящий луч направлена по лучу, а соответствующая проекция на отраженный луч – против луча! Следовательно, наблюдатель воспринимает два отражённых луча с разной частотой:

$$\nu_1 = \frac{C - 2V \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \quad (3.33)$$

$$\nu_2 = \frac{C + 2V \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \quad (3.34)$$

Однако эти два луча приходят на один светоприёмник, следовательно, их яркость суммируется. Фактически суммируются амплитуды периодических сигналов, имеющих несколько разную частоту. Это явление носит название *биения*. Частота изменения яркости сигнала равна, согласно теории биений, разности частот обоих воспринятых сигналов:

$$\Delta \nu = \frac{4V \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda}. \quad (3.35)$$

Если измерять частоту изменения яркости сигнала $\Delta \nu$, которая также является функцией скорости ветра, то относительная чувствительность не будет зависеть от скорости света C и становится достаточно значительной величиной:

$$S_{rel} = \frac{1}{\Delta \nu} \cdot \frac{d\Delta \nu}{dV} = \frac{1}{V}. \quad (3.36)$$

Поскольку скорость ветра V стоит в знаменателе формулы (3.36), то относительная чувствительность такого метода тем больше, чем меньше скорость ветра! Это обстоятельство особенно привлекательно для измерения малых скоростей ветра.

Однако на пути практической реализации такого метода имеется несколько трудностей. Перечислим их.

1. Аэрозольные частицы двигаются сплошным потоком. Таким образом, на светоприёмник попадают лучи света, отраженные от разных частиц одновременно. Это сильно затрудняет определение частоты изменения яркости сигнала.

2. Абсолютная чувствительность метода, как легко видеть из формулы (3.35), пропорциональна синусу половины угла α . При удалении точки пересечения лучей от установки на несколько метров эта величина стано-

вится очень малой, следовательно, абсолютная чувствительность резко уменьшается.

3. Для уверенной регистрации отраженных от аэрозолей пучков света нужна очень чувствительная светоприёмная аппаратура.

4. Для того чтобы на светоприёмный элемент (фотоумножитель) поступали бы только световые пучки из точки пересечения лучей, необходим длиннофокусный объектив, точно направленный в точку пересечения.

Все эти трудности, в принципе, преодолимы. Но установка становится весьма сложной и дорогостоящей. Однако метод обладает весьма существенными преимуществами, которые делают его незаменимым в определенных случаях. Перечислим эти преимущества:

1. Возможность измерения скорости ветра в достаточно удаленных точках (например, на высоте до нескольких десятков метров).

2. Полное отсутствие инерции. Это даёт возможность, например, разместив установку в носовой части самолета, измерять проекцию скорости ветра на направление, перпендикулярное полету самолета.

Разумеется, для определения приземной скорости ветра на метеостанции применять такой метод нецелесообразно. В этом случае можно использовать обычный ротоанемометр.

3.6. Измерение направления ветра. Дистанционные измерители

Для измерения направления ветра обычно применяется *флюгарка*. Общий вид флюгарки показан на рис. 3.15. Это лопасть (1) укрепленная на вращающейся горизонтальной штанге, с противоположной стороны которой находится противовес (2). Вся флюгарка свободно поворачивается на вертикальной опоре, которая обычно укреплена на мачте. Воздушный поток разворачивает флюгарку так, что её противовес показывает направление, откуда дует ветер.

Иногда лопасть флюгарки делают сложной формы, например, в виде двух пластин, повернутых под некоторым углом друг к другу. Такая форма обеспечивает более устойчивую работу флюгарки, уменьшая её колебания вокруг положения равновесия.

В обычном флюгере ниже флюгарки располагается лимб с делениями, ориентированный по сторонам света. Наблюдатель, посмотрев снизу, определяет положение флюгарки и записывает направление ветра по делениям лимба.

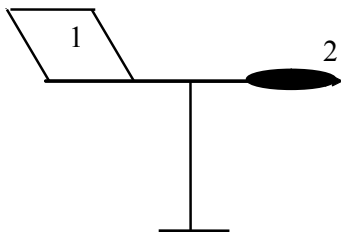


Рис. 3.15. Флюгарка

Однако для современных автоматических приборов необходима дистанционная передача информации о направлении флюгарки, например, в виде электрического сигнала, передаваемого по кабелю в пульт управления. Рассмотрим один из способов такой дистанционной передачи с помощью устройств, называемых *сельсинами* (рис. 3.16).

Поясним подробнее устройство и работу сельсинов. *Сельсины* – это элементы, позволяющие передать по проводной связи информацию об угле поворота (например, угле поворота флюгарки). Сельсины применяются в паре: *сельсин-датчик* и *сельсин-приёмник*. Они абсолютно одинаковы и взаимозаменяемы. Ось флюгарки приводит в движение ротор сельсина-датчика СД. Сельсин-датчик соединён с сельсином-приемником СП. Каждый сельсин, в свою очередь, содержит ротор и статор. Ротором называется вращающаяся часть сельсина, статором – его неподвижная часть. На рис. 3.17 показано устройство так называемых *контактных сельсинов*. Ротор контактного сельсина представляет собой обмотку (L_0) с железным сердечником. Ротор сельсина вращается внутри статора. Статор содержит три обмотки (L_1 , L_2 и L_3), ориентированные под углом 120° друг к другу.



Рис. 3.16. Сельсины

Обмотки L_1 , L_2 и L_3 абсолютно одинаковы. Как уже было сказано, конструкция сельсина-приёмника и конструкция сельсина датчика абсолютно идентичны. Сельсин-датчик помещен на мачте, сельсин-приёмник помещается в пульт управления, его ось соединена с легкой стрелкой. Когда ротор сельсина-датчика поворачивается на некоторый угол, ротор сельсина-приёмника также поворачивается на тот же угол! Как это происходит?

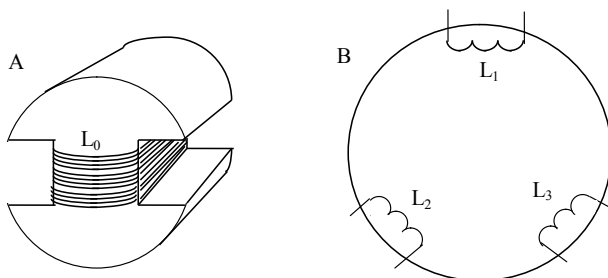


Рис. 3.17. Ротор сельсина (А) с катушкой L_0 , и статор (В) с катушками L_1 , L_2 и L_3

Для ответа на этот вопрос рассмотрим электрическую схему, изображённую на рис. 3.18.

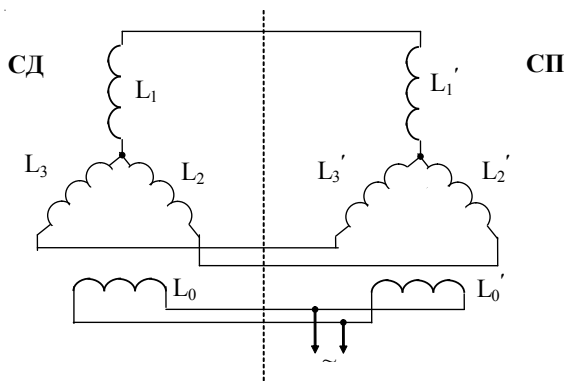


Рис. 3.18. Электрическая схема соединения сельсина-датчика (СД) с сельсином-приёмником (СП)

Обмотки L_1 , L_2 и L_3 сельсина-датчика соединены с точно такими же обмотками L_1' , L_2' и L_3' сельсина-приёмника. Обмотка L_0 соединена с обмоткой L_0' . На обмотки L_0 и L_0' подаётся переменный ток (поэтому они называются *обмотками возбуждения*). Следовательно, вокруг обмоток L_0 и L_0' возникает переменное магнитное поле. По закону электромагнитной индукции в обмотках L_1 , L_2 и L_3 (а также в обмотках L_1' , L_2' и L_3') возникает переменное напряжение, причём амплитуда этого напряжения зависит от угла между обмотками L_0 и L_1 ; L_0 и L_2 ; L_0 и L_3 и соответственно, L_0' и L_1' ; L_0' и L_2' ; L_0' и L_3' . Обозначим величину переменного напряжения, возникающего в обмотках как $U_{\sim 1}$, $U_{\sim 2}$, $U_{\sim 3}$ и $U'_{\sim 1}$, $U'_{\sim 2}$ и $U'_{\sim 3}$. Предположим, что ротор сельсина-датчика ориентирован относительно обмоток L_1 , L_2 и L_3 точно так же, как ротор сельсина-приёмника относительно обмоток L_1' , L_2' и L_3' . Тогда напряжения $U_{\sim 1} = U'_{\sim 1}$; $U_{\sim 2} = U'_{\sim 2}$; $U_{\sim 3} = U'_{\sim 3}$.

Назовём такое положение сельсинов *согласованным*. В согласованном состоянии ток, текущий по проводам, соединяющим статоры сельсина-датчика и сельсина-приёмника, равен нулю, поскольку напряжения попарно равны. Но это значит, что и в катушках статоров сельсина-датчика и сельсина-приёмника ток также равен нулю.

Теперь предположим, что ротор сельсина-датчика повернулся на некоторый угол, например, при изменении направления ветра. Тогда согласованное положение нарушается, теперь напряжения в обмотках не равны попарно: $U_{\sim 1} \neq U'_{\sim 1}$; $U_{\sim 2} \neq U'_{\sim 2}$; $U_{\sim 3} \neq U'_{\sim 3}$. Теперь по проводам, соединяющим статоры сельсина-датчика и сельсина-приёмника, идет ток. Следовательно, появляются токи и в обмотках статоров. Эти токи вызывают появление магнитных полей вокруг обмоток статоров. Возникает сложная картина наложения магнитных полей статора и ротора, в результате чего ротор сельсина-приёмника поворачивается. Точно так же поворачивается намагниченная стрелка компаса в магнитном поле Земли. Поворот происходит до тех пор, пока не будет достигнуто новое согласованное положение. Значит, всегда при повороте ротора сельсина-датчика ротор сельсина-приёмника вместе со стрелкой поворачивается на тот же угол. Около стрелки имеется круглая шкала с угловыми делениями, показывающими направление ветра.

Однако такая конструкция сельсинов имеет один существенный недостаток – подача напряжения на вращающуюся обмотку ротора происходит с помощью трущихся контактов, поэтому такие сельсины и называют *контактными сельсинами*. Трущиеся контакты быстро изнашиваются. Поэтому в метеорологических приборах часто применяются *бесконтактные сельсины*.

В бесконтактных сельсинах обмотка возбуждения L_0 находится на статоре. Схема соединения обмоток такая же, как и в контактных сельсинах (рис.3.18). Ротор бесконтактного сельсина представляет собой кусок железа, имеющий форму, показанную на рис. 3.19.

Этот ротор является своеобразным сердечником трансформаторной связи обмоток L_0 и L_1 ; L_0 и L_2 ; L_0 и L_3 . Следовательно, напряжения, возникающие в обмотках L_1 , L_2 и L_3 зависят от угла поворота ротора. В согласованном положении наблюдается попарное равенство напряжений $U_{\sim 1} = U'_{\sim 1}$; $U_{\sim 2} = U'_{\sim 2}$; $U_{\sim 3} = U'_{\sim 3}$. Ток в обмотках L_1 , L_2 и L_3 равен нулю. Далее всё происходит точно так же, как и в контактных сельсинах: при выходе из согласованного положения попарное равенство напряжений нарушается, возникают токи в обмотках статора, они вызывают появление

магнитных полей, взаимодействующих с полем ротора, и в результате ротор поворачивается до нового согласованного положения.

Бесконтактные сельсины предпочтительнее. Они работают более устойчиво, срок их службы дольше. Кроме измерителей направления ветра с сельсинной передачей существует ещё *фазоимпульсный способ* передачи информации о направлении флюгарки. Этот способ применяется в анеморумбометре М-63 и будет рассмотрен в главе 7.

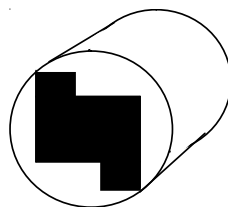


Рис. 3.19. Ротор бесконтактного сельсина

3.7. Использование проволочных потенциометров и угловых кодеров при передаче информации об угле поворота флюгарки

Недостаток использования сельсинной передачи состоит в том, что его трудно преобразовать для автоматической обработки.

Проволочный потенциометр со скользящим контактом – один из наиболее простых и эффективных преобразователей перемещения. Для его использования нужно лишь соединить скользящий контакт с движущимся объектом (в данном случае, с осью флюгарки), а остальную часть потенциометра закрепить неподвижно. На рис. 3.20 показан потенциометрический преобразователь, предназначенный для измерения угла поворота флюгарки. В идеальном случае между выходным сигналом преобразователя и перемещением существует линейная связь. Применение тщательно изготовленных проволочных потенциометров гарантирует малую нелинейность преобразования. Разрешение этого преобразователя зависит от диаметра намоточного провода и может быть улучшено путём использования более тонкого провода. Для потенциометра с плотностью намотки 50 витков на миллиметр, что близко к практическому пределу, предельное разрешение составляет 20 мкм.

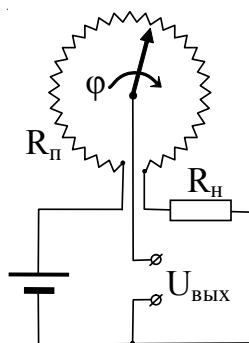


Рис. 3.20. Проволочный потенциометр

Недостатком такого способа является неопределенность величины выходного напряжения при северном (нулевом) положении флюгарки. Северное положение соответствует, с одной стороны, нулевому, с другой стороны – максимальному напряжению. При колебаниях флюгарки около

северного направления будет происходить осреднение малых и больших значений напряжения, что приведет к ошибке в 180° в определении направления ветра.

Также для передачи информации об угле поворота используются кодеры (шифраторы) углового положения. В них используется электромеханический способ аналого-цифрового преобразования, в котором угол поворота вала непосредственно преобразуется в соответствующий цифровой выходной сигнал, благодаря чему отпадает необходимость использования каких-либо потенциометров для измерения углового смещения.

Кодирование осуществляется с помощью оптических датчиков, а кодирующий круг непосредственно насажен на вал. На рис. 3.21 представлена схема кодирующего устройства с четырёх разрядным двоичным выходом. С одной стороны кодирующего круга находятся источники света, например, светодиоды. Напротив светодиодов с другой стороны круга находятся фотоприёмники, например, фотодиоды. Свет может пройти от фотодиода к светодиоду только в том случае, если соответствующий сектор дорожки круга прозрачен. Прозрачные и непрозрачные сектора чередуются в определенном порядке, показанном на рис. 3.22 и 3.23. Соответственно фотодиоды будут открыты (условимся считать, что соот-

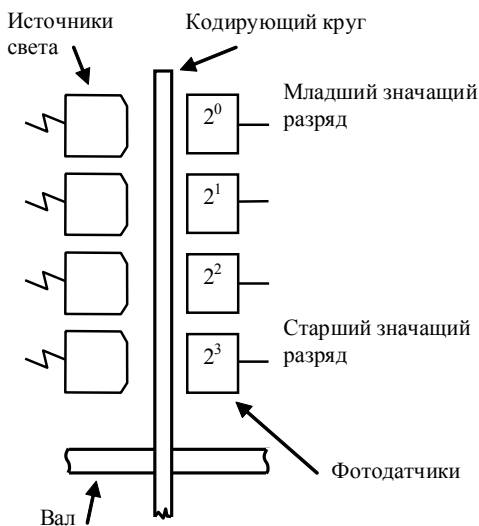


Рис. 3.21. Кодирующее устройство (кодер)

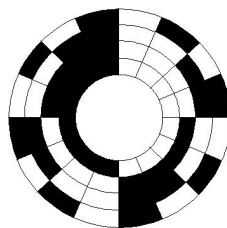


Рис. 3.22. Кодирующий круг двоичного кода

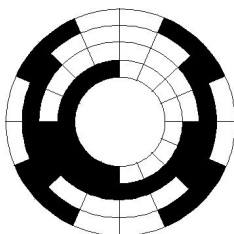


Рис. 3.23. Кодирующий круг кода Грея

ветствующий разряд в этом случае равен 1 или закрыты (разряд равен нулю). Тогда на фотодиодах возникают сигналы, представленные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сигналы на фотодиодах

Десятичное число	Двоичный код	Код Грея
0	0 0 0 0	0 0 0 0
1	0 0 0 1	0 0 0 1
2	0 0 1 0	0 0 1 1
3	0 0 1 1	0 0 1 0
4	0 1 0 0	0 1 1 0
5	0 1 0 1	0 1 1 1
6	0 1 1 0	0 1 0 1
7	0 1 1 1	0 1 0 0
8	1 0 0 0	1 1 0 0
9	1 0 0 1	1 1 0 1
10	1 0 1 0	1 1 1 1
11	1 0 1 1	1 1 1 0
12	1 1 0 0	1 0 1 0
13	1 1 0 1	1 0 1 1
14	1 1 1 0	1 0 0 1
15	1 1 1 1	1 0 0 0

Недостаток обычного двоичного кодирования заключается в том, что даже слабая разбюстировка механизма может привести к большой ошибке в выходном сигнале. Нет гарантии, что разряды изменяют свои значения точно в один и тот же момент времени. Например, кодовая комбинация 0111 может перейти в комбинацию 1111 при разбюстировке в старшем значащем разряде, что соответствует ошибке в 180° . Эта проблема решается путём использования кода Грея (рефлексного или циклического кода). Преимущество этого кода по сравнению с обычным двоичным кодом заключается в том, что при уменьшении или увеличении числа на единицу в соответствующей кодовой комбинации кода Грея изменяется значение только одного разряда. Это уменьшает неопределённость при измерении последовательных угловых положений в отличие от обычного кода. Аналогичная разбюстировка приводит тогда к ошибке не превышающей одного значения младшего значащего разряда.

Название рефлексный (отражённый) двоичный код происходит от факта, что вторая половина значений в коде Грея эквивалентна первой половине, только в обратном порядке, за исключением старшего бита, который просто инвертируется. Если же разделить каждую половину ещё

раз пополам, свойство будет сохраняться для каждой из половин половины и т. д.

Кодеры углового положения – компактные и надёжные устройства. Они обеспечивают измерение относительных и абсолютных значений углов и угловых скоростей с высокой точностью. Разрешение угловых кодеров зависит от количества дорожек на круге и, соответственно, от количества пар «светодиод - фотодиод» на каждой дорожке.

Глава 4. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Приборы для измерения атмосферного давления получили название *барометров*. В метеорологических измерениях применяются барометры двух типов: жидкостные и деформационные. Деформационные барометры иногда называют барометрами-анероидами. Далее мы рассмотрим основные принципы их действия, но прежде чем это сделать, приведём основные единицы для измерения атмосферного давления.

1. *Паскаль* (Па). Как известно, один паскаль равен одному ньютону на квадратный метр. В метеорологии обычно используется *гектопаскаль* (гПа) – величина, равная 100 паскалей.

2. *Миллиметр ртутного столба* – эта мера давления появилась после изобретения ртутных барометров. Нормальное атмосферное давление на уровне моря принято равным 1013 гПа или 760 мм рт.ст. Нетрудно рассчитать, что

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1,33 \text{ гПа.} \quad (4.1)$$

3. *Миллибар* – устаревшая единица измерения давления, равная одной тысячной части *бара*. Один бар равен 1000 гПа, следовательно, 1 мбар численно равен 1 гПа.

4. *Тор* – единица, названная в честь Торичелли, изобретателя ртутного барометра. Один тор численно равен 1 мм ртутного столба. Эта единица употребляется для измерения малого давления, в основном, в вакуумной технике.

4.1. Жидкостные барометры

Жидкостные барометры основаны на известном опыте Торичелли. Если взять трубку, запаянную с одного конца, заполнить её ртутью и поставить вертикально открытым концом в чашку со ртутью (рис. 4.1), то уровень ртути в трубке будет зависеть от атмосферного давления и может быть рассчитан по формуле:

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}, \quad (4.2)$$

где h – высота ртутного столба;

p – атмосферное давление;

ρ – плотность используемой жидкости (ртути);

g – ускорение силы тяжести.

Собственно, на рис. 4.1 изображен *чашечный ртутный барометр*. Около трубки помещается металлическая шкала с нониусом для снятия отсчёта, а чашка закрывается сверху и сообщается с атмосферным воздухом с помощью небольшого отверстия, которое при переноске барометра заворачивается винтом. Пользование ртутным барометром не требует высокой квалификации наблюдателя.

Чувствительность ртутного барометра может быть определена дифференцированием формулы (4.2):

$$S = \frac{dh}{dp} = \frac{1}{\rho \cdot g} \quad (4.3)$$

Как видно из формулы (4.3), чувствительность ртутного барометра является постоянной величиной и не может быть изменена в процессе изготовления прибора. В связи с этим возникает вопрос: почему в жидкостных барометрах применяется самая плотная жидкость – ртуть? Чувствительность ртутных барометров минимальна по сравнению с барометрами, в которых использовалась бы любая другая жидкость! Студентам предлагается самим ответить на этот вопрос.

При изменении уровня ртути в трубке происходит неизбежное изменение уровня ртути в самой чашке, например, при увеличении атмосферного давления уровень ртути в трубке увеличивается, а в чашке, соответственно, уменьшается. Это нежелательное обстоятельство, поскольку уровень ртути в чашке является точкой отсчёта показаний барометра. Изменение уровня ртути в чашке может быть рассчитано по формуле:

$$\frac{\Delta h}{\Delta h_0} = \frac{s_0}{s} \quad (4.4)$$

где Δh – изменение уровня ртути в трубке;

Δh_0 – изменение уровня ртути в чашке;

s – площадь сечения трубки;

s_0 – соответствующее изменение уровня ртути в чашке.

Для компенсации изменения уровня ртути в чашке применяется *скомпенсированная шкала*, цена деления которой равна 0,98 мм (вместо 1,00 мм).

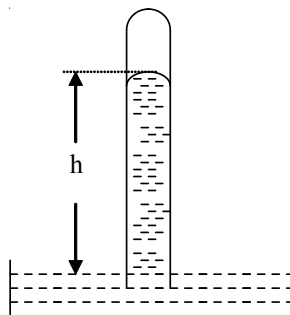


Рис. 4.1. Чашечный ртутный барометр

Перечислим *погрешности ртутных барометров*.

1. Погрешности, связанные с изменением ускорения силы тяжести g .

Их две:

- погрешность, связанная с изменением высоты места. Как известно, сила тяжести уменьшается с высотой. Хотя это очень незначительное уменьшение, но его необходимо учитывать при измерении давления. Поэтому вводится поправка на высоту места:

$$\Delta p_z = -l \gamma z, \quad (4.5)$$

где l – высота ртутного столба, отсчитанная по барометру;

z – высота места, м;

$\gamma = 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$.

- погрешность, связанная с изменением широты места. Эта погрешность обязана своим происхождением вращению Земли и появлению центробежной силы, направленной против силы тяжести. На экваторе уменьшение силы тяжести максимально (хотя совершенно незаметно без использования специальных приборов!), на полюсе центробежная сила равна нулю и уменьшение силы тяжести не происходит. В качестве эталонной широты условились принимать широту 45° . Поэтому на более низких широтах поправка отрицательна, а на более высоких – положительна. Поправка на широту места определяется по формуле:

$$\Delta p_\varphi = -l \beta \cos 2\varphi, \quad (4.6)$$

где l – высота ртутного столба, отсчитанная по барометру;

φ – широта места в градусах;

$\beta = 2,65 \cdot 10^{-3}$.

2. Погрешность, связанная с изменением плотности ртути при изменении температуры. За эталонную температуру условились принимать 0°C . Строго говоря, следует учитывать также изменение линейных размеров латунной шкалы барометра при изменении температуры. Поэтому в формуле (4.7) для расчёта температурной погрешности коэффициент α равен разности коэффициентов линейного расширения ртути и латуни. Поправка на температуру определяется формулой:

$$\Delta p_t = -l \alpha t, \quad (4.7)$$

где l – высота ртутного столба, отсчитанная по барометру;

t – температура, измеренная по шкале Цельсия;

$\alpha = 1,63 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

Кроме указанных поправок следует учитывать *инструментальную поправку* – индивидуальную для каждого барометра. Эта поправка связана с неизбежными погрешностями изготовления и сборки барометра, она определяется на заводе-изготовителе и приводится в паспорте прибора.

В результате введения всех поправок вычисляется атмосферное давление на станции. После этого рассчитывается атмосферное давление на уровне моря, то есть давление, которое наблюдалось бы при данной погоде на уровне моря. Эту операцию нельзя путать с поправкой на изменение силы тяжести с высотой! Вычисление давления на уровне моря необходимо для построения карт барической топографии, оно не связано с погрешностями барометра.

Существует несколько другой тип ртутных барометров – сифонно-чашечный барометр. Его устройство показано на рис. 4.2.

Действие сифонно-чашечного барометра основано на тех же принципах, что и действие чашечного барометра, но вместо чашки используется кожаный мешочек со ртутью (3), в который вставлены две трубки: длинная и короткая. Длинная трубка (1) (длинное колено) закрыта сверху, уровень ртути в длинном колене является мерой атмосферного давления. Короткая трубка (2) (короткое колено) закрыта краном (5), который открывается при проведении измерений. Под кожаным мешочком расположена площадка, которая может передвигаться с помощью винта (6), при этом объём ртути в мешочке изменяется.

Наблюдения проводятся следующим образом. Наблюдатель открывает кран (5), при этом в коротком и длинном колене устанавливается разность уровней ртути, которая зависит от давления. Далее наблюдатель вращает винт (6), изменяя объём ртути в мешочке, и, соответственно, уровень ртути в трубках. Уровень ртути в коротком колене подводится под нулевую отметку. Затем с помощью нониуса наблюдатель снимает показания по шкале (4).

Легко понять, что поскольку нулевой уровень не изменяется, то в сифонно-чашечном барометре скомпенсированная шкала не используется.

При использовании сифонно-чашечного барометра вводятся те же поправки, что и для чашечного барометра.

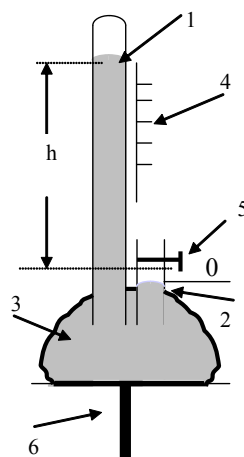


Рис.4.2. Сифонно-чашечный барометр

4.2. Деформационные барометры

Деформационные барометры измеряют силу, с которой атмосферное давление действует на деформируемую поверхность барометрической коробки (барокоробки). Барометрическая коробка в разрезе изображена на рис. 4.3. Она выполнена в виде полого диска, стенки которого изготовлены из сталистой бронзы, материала, обладающего большой упругостью. Нижняя и верхняя поверхность коробки сделана гофрированной, что увеличивает её способность деформироваться. При изменении атмосферного давления коробка деформируется, причём степень деформации зависит от давления. Деформация измеряется с помощью стрелки, соединённой с поверхностью барокоробки системой рычагов для увеличения перемещения стрелки. Другая поверхность (на рис.4.3 – нижняя) закреплена неподвижно.

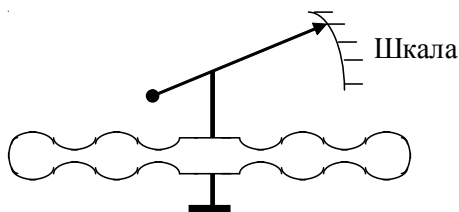


Рис. 4.3. Барометрическая коробка в разрезе

Таким образом, подвижная стрелка перемещается около шкалы, показывая атмосферное давление. Часто вместо одной применяют несколько барокоробок, соединенных друг с другом, что увеличивает перемещение стрелки, а следовательно, чувствительность барометра. Такая конструкция получила название *сильфон*.

Барометр, датчиком которого является сильфон, обычно называют барометром-анероидом (рис. 4.4). Такие барометры более удобны в использовании, чем ртутные. Они более компактны, следовательно, применимы в экспедиционных условиях, в них отсутствует ртуть – как известно, ядовитое вещество, требующее особых правил обращения и хранения. Однако деформационные барометры-анероиды обладают серьезными погрешностями. Перечислим их и дадим рекомендации по их устранению.

1. *Температурная погрешность.* Как известно, упругость металла сильно зависит от температуры. Следовательно, например, при увеличении температуры упругость стенок сильфона уменьшается, он сильнее деформируется, соответственно, показывает завышенное давление. При



Рис. 4.4. Барометр-анероид

уменьшении температуры – наоборот, заниженное. Для ликвидации температурной погрешности применяют два способа.

Первый способ заключается в том, что сильфон вместе со стрелкой помещают на биметаллическую пластинку, которая перемещается при изменении температуры (раздел 1.9). Схема соответствующей установки представлена на рис. 4.5. При изменении температуры сильфон деформируется, стрелка перемещается, но в то же время пластинка перемещает всю конструкцию вместе со стрелкой в противоположном направлении. Если активная часть пластинки отрегулирована так, что суммарное перемещение равно нулю, то происходит полная компенсация и температурная погрешность исчезает.

Второй способ ликвидации температурной погрешности – газовая компенсация. Она заключается в том, что внутри сильфона остается некоторое количество газа. Тогда можно говорить о том, что давление газа внутри сильфона также является функцией температуры. Как известно, при повышении температуры давление газа внутри замкнутого объема возрастает. Можно так отрегулировать количество и состав газа внутри силь-

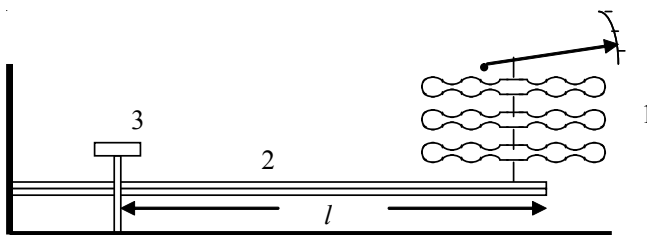


Рис. 4.5. Биметаллический компенсатор.

(1) – сильфон, (2) – биметаллическая пластинка, (3) – винт, перемещением которого можно регулировать активную часть пластинки l

фона, что увеличение внутреннего давления компенсирует потерю упругости стенками сиффона. Тогда, следовательно, температурная погрешность исчезнет.

Упругий гистерезис сиффона. Эта погрешность связана с тем, что стенки сиффона имеют остаточную деформацию. Из-за этого они сохраняют «память» о предыдущем состоянии. Иначе говоря, показания барометра при повышении давления не совпадают с показаниями при понижении давления. Это показано на рис. 4.6. При повышении давления показания барометра оказываются заниженными, а при понижении – завышенными (график на рис. 4.6 сильно утрирован). Для ликвидации погрешности, связанной с упругим гистерезисом, следует уничтожить остаточную деформацию. Это в значительной степени удастся сделать, если встряхнуть сиффон легким постукиванием по барометру, что и рекомендуется делать перед снятием показаний.

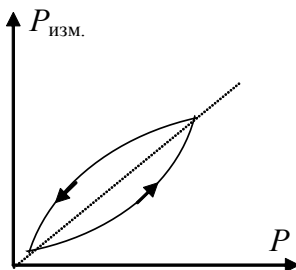


Рис. 4.6. Гистерезис сиффона. $P_{\text{изм.}}$ – показания сиффона, P – атмосферное давление

Однако такой приём не может быть использован в автоматических системах. Поэтому для ликвидации остаточной деформации рекомендуется метод *силовой компенсации*. Это означает, что сиффон удерживается неподвижным (и, следовательно, упругий гистерезис исчезает!), а измеряется сила, препятствующая сжатию сиффона.

Силокомпенсационный метод может быть реализован, по крайней мере, двумя способами. *Первый способ* заключается в том, что сиффон соединяется с коротким плечом (1) рычага (рис. 4.7). На длинном плече рычага помещается подвижный груз (2). При изменении атмосферного давления сиффон деформируется, равновесие рычага нарушается и для его восстановления груз (2) перемещается по рычагу в ту или иную сторону. Этот процесс можно автоматизировать (глава 8, раздел 8.1, датчик

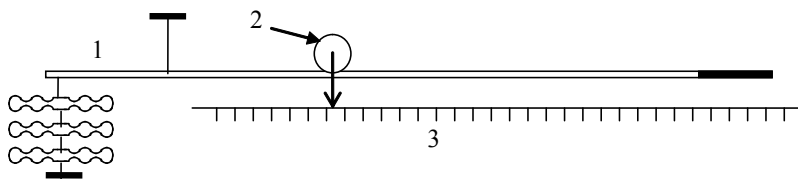


Рис. 4.7. Реализация силокомпенсационного метода измерения давления

давления станции КРАМС). Тогда положение груза на рычаге может служить мерой атмосферного давления. Оно может быть измерено, например, по шкале (3). Упругий гистерезис исчезает, поскольку рычаг практически всегда находится в состоянии равновесия, а следовательно, сильфон не деформируется.

Второй способ реализуется в так называемом струнном микробарометре. Его датчиком (рис. 4.8) являются два сильфона (2), соединенные друг с другом металлической струной (1). Сверху и снизу сильфоны прикреплены к неподвижной раме (4). При изменении давления изменяется сила натяжения струны. Следовательно, изменяется частота её собственных колебаний (если допустить, что струна приводится в колебательное движение). Колебания струны обеспечиваются специальным генератором, который входит в состав микробарометра. Поскольку струна колеблется между полюсами магнита (3), то в струне возникает переменная ЭДС, частота которой равна частоте колебаний струны, а следовательно, за-

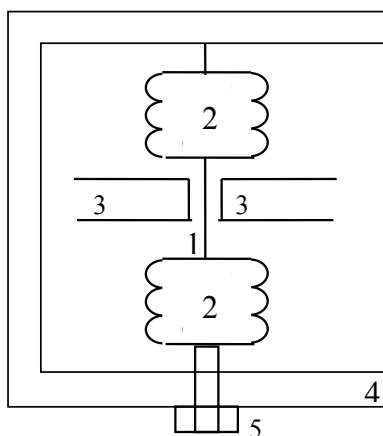


Рис. 4.8. Датчик струнного микробарометра. 1 - струна; 2 - сильфоны; 3 - полюса магнита; 4 - рама; 5 - регулировочное устройство

висит от атмосферного давления. Частоту измеряют электронным частотомером.

Упругий гистерезис в данном случае исчезает, так как сильфоны остаются неподвижными – их удерживает нерастяжимая струна.

4.3. Барометр БРС

В 80-х гг. XX в. был изобретен барометр БРС-1 (барометр рабочий сетевой) (рис. 4.9, а). Предполагалось, что этот барометр полностью вытеснит ртутные барометры, применяемые на метеорологической сети. В действительности, этого не произошло, по причинам, скорее экономического характера. Тем не менее, эти барометры применяются и имеют весьма привлекательные особенности.

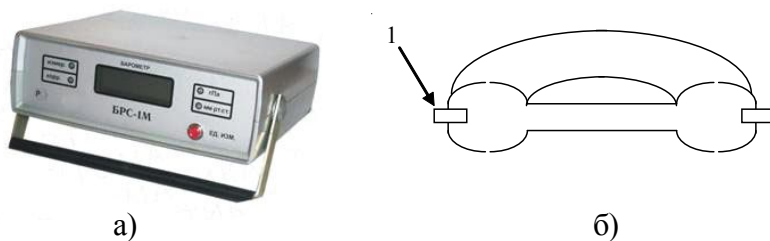


Рис. 4.9. Барометр рабочий сетевой
а) внешний вид; б) датчик барометра БРС в разрезе

Рассмотрим устройство датчика барометра БРС (рис. 4.9, б). Датчик представляет собой электрический конденсатор, т. е. две металлические пластины, изолированные друг от друга кольцом из диэлектрика (1). Пластины выполнены из сталистой бронзы, т. е. по сути дела, этот датчик представляет собой ту же барометрическую коробку. При изменении давления пластины сжимаются или, наоборот, раздвигаются, таким образом, ёмкость конденсатора изменяется. Следовательно, она зависит от атмосферного давления. Измерить ёмкость конденсатора можно с помощью электронной схемы. В барометре БРС-1 имеется цифровая индикация атмосферного давления.

Преимуществом барометра БРС является отсутствие ядовитого вещества – ртути, а также преобразование атмосферного давления в электрический сигнал. Это даёт возможность автоматизировать измерения, записывать данные, например, в память компьютера и использовать прибор в более сложных измерительных комплексах.

4.4. Вакуумметры

Вакуумметрами называются приборы для измерения очень малого давления – менее одного миллиметра ртутного столба (т. е. менее 1 тор). Они могут использоваться для измерения давления на очень больших высотах, а также в вакуумной технике.

1. *Термопарный вакуумметр.* С его помощью можно измерять давление от 10^{-3} до 1 тор. Схема, показывающая принцип его действия, изображена на рис. 4.10. Внутри открытого баллона (1) помещён нагревательный элемент (2) и термопара (3). Холодный спай термопары помещён на корпусе баллона и, следовательно, имеет температуру окружающего воздуха (следует иметь в виду, что применять термин «воздух» по отношению к такой разреженной среде можно с большой натяжкой!). Теплый спай термопары находится вблизи нагревательного элемента. Конвективный поток тепла от нагревательного элемента к спаю термопары является функцией плотности воздуха (формула (1.3)), и, следовательно, зависит от давления внутри баллона, которое равно внешнему давлению (баллон открыт!).

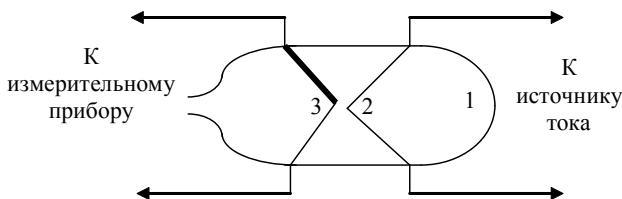


Рис. 4.10. Термопарный вакуумметр

Следовательно, разность температур между спаями термопары также зависит от давления. Она измеряется микроамперметром, причём для повышения чувствительности прибора применяется предварительное усиление сигнала. Шкала выходного прибора проградуирована в единицах измерения давления.

2. *Ионизационный вакуумметр.* Этот прибор употребляется для измерения ещё более низкого давления – от 10^{-3} до 10^{-7} тор. Схема, поясняющая принцип его действия, показана на рис. 4.11.

Основным элементом вакуумметра является трехэлектродная лампа – вакуумный триод, внутренняя часть которого сообщается с окружающей средой. На верхний электрод триода подается отрицательное напряжение

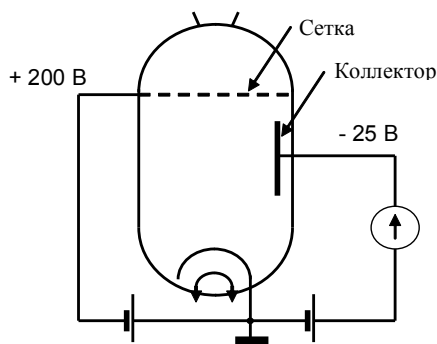


Рис. 4.11. Ионизационный вакуумметр

порядка 25 В. В этом состоит отличие лампы от классического триода, в котором на верхний электрод подается положительное напряжение. Поэтому в данном случае верхний электрод называется коллектором (а не анодом, как в триоде). На сетку лампы подается довольно большое положительное напряжение – около 200 В. Таким образом, нижняя часть лампы работает как вакуумный диод, т. е. электроны летят от катода к сетке. Но поскольку в лампе все-таки есть малое количество воздуха, то электроны сталкиваются с молекулами воздуха и ионизируют их. Образовавшиеся при этом положительные ионы летят к отрицательно заряженному коллектору. Таким образом, возникает слабый ионный ток в промежутке катод – коллектор. Величина этого тока пропорциональна количеству образовавшихся ионов, которое, в свою очередь, тем больше, чем больше нейтральных молекул в лампе. Следовательно, ток в лампе зависит от давления. Он измеряется микроамперметром, шкала которого проградуирована в единицах измерения давления.

Возникает вопрос: почему эти вакуумметры нельзя применить для измерения нормального атмосферного давления? Студентам предлагается ответить на этот вопрос самостоятельно.

Глава 5. АКТИНОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Актинометрическими измерениями называют измерения различных потоков радиации в атмосфере. Основными актинометрическими величинами являются:

1. *Прямая солнечная радиация*, т. е. радиация, поступающая на земную поверхность непосредственно от Солнца. Разумеется, в ночное время, так же как и в пасмурную погоду, прямая солнечная радиация отсутствует.

2. *Рассеянная радиация*. Эта радиация также приходит от Солнца, но рассеивается молекулами воздуха и атмосферными аэрозолями. Именно рассеянная радиация обуславливает голубой цвет неба в ясную погоду. Рассеянная радиация присутствует и в пасмурную погоду, и в сумерки, но в ночное время она равна нулю.

3. *Радиационный баланс*. Это сумма всех радиационных потоков, идущих с верхней полусферы минус сумма всех потоков, приходящих с нижней полусферы. Радиационный баланс может быть как положительным, так и отрицательным. В ночное время он, как правило, отрицательный, так как с верхней полусферы поступает только излучение самой атмосферы.

В актинометрических измерениях важно учесть все радиационные потоки, оказывающие сколько-нибудь заметное влияние на тепловой режим атмосферы и почвы, т. е. в конечном итоге, определяющие погоду. Поэтому одним из основных требований к актинометрическим приборам является способность регистрировать радиацию в спектральном диапазоне от 0,3 до 100 мкм. Именно этот диапазон является в метеорологии наиболее значимым. Нижняя граница этого диапазона находится на границе ультрафиолетового и видимого излучения, далее идет весь видимый диапазон, а верхняя граница заходит далеко в инфракрасную область.

Имея в виду это требование, выберем способ измерения радиационных потоков. Перечислим основные способы измерения и обсудим их особенности.

1. *Калориметрический метод*. Он заключается в том, что чёрное тело (обычно это небольшая пластинка) помещается под радиационный поток и нагревается вследствие поглощения радиации. Измеряется разность температур между пластинкой и окружающим воздухом, которая, разумеется, зависит от величины радиационного потока. Чувствительность этого метода весьма низкая. Спектральный диапазон измерения радиации – практически весь спектр длин волн.

2. *Фотоэлектрический метод*. Этот метод предусматривает использование фотоэлектрических преобразователей – фотоэлемента или фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Преобразователь помещается под радиационный поток и преобразует его в электрический ток. Далее измеряется значение этого тока. Чувствительность этого метода очень высокая. Спектральный диапазон измерения – от 10^{-3} до 6,5 мкм.

3. *Фотографический способ*. В принципе для измерения радиационных потоков возможно применение фотопластинки. Предположим, фотопластинка помещается в поток радиации на некоторое время и затем проявляется. Степень почернения фотопластинки зависит от мощности потока и может быть измерена. Чувствительность такого метода также очень высокая. Спектральный диапазон – от 10^{-3} до 1,2 мкм.

4. *Визуальный метод*. Не будем здесь обсуждать технические детали этого метода. Скажем только, что он также возможен, поскольку глаз человека очень чувствителен к радиационным потокам (в видимом диапазоне!). Чувствительность такого метода достаточно высока, но спектральный диапазон ограничивается видимой частью спектра, т. е. от 0,4 до 0,75 мкм.

Мы видим, что основное требование, касающееся спектрального диапазона, выполняется только для калориметрического метода. Именно по этой причине калориметрический метод является основным в актинометрических измерениях. Недостаточная чувствительность метода может быть в значительной степени компенсирована чувствительностью элементов для измерения разности температур черной пластинки и окружающего воздуха.

Единица измерения радиационных потоков – Дж/м²·с, т. е. Вт/м².

5.1. Измерение прямой солнечной радиации

Для измерения прямой солнечной радиации используется один из двух приборов: *компенсационный пиргелиометр* или *термоэлектрический актинометр*. Компенсационный пиргелиометр является абсолютным прибором, термоэлектрический актинометр – относительным. Основным прибором для актинометрических измерений на метеорологической сети является термоэлектрический актинометр. Пиргелиометр используется в лабораторных условиях для калибровки актинометров.

Рассмотрим устройство компенсационного пиргелиометра. Его внешний вид показан на рис. 5.1. Трубка длиной около 15 см ориентируется на

Солнце. В крышке трубки (1) сделаны два отверстия прямоугольной формы (2). Внутреннее устройство пиргелиометра и его электрическая схема показаны на рис. 5.2. Внутри трубки находятся две чёрные пластинки (3) и (3'), размер которых точно совпадает с размером отверстий в крышке прибора. Одно из отверстий во время измерений закрывается. Тогда солнечная радиация нагревает только одну из пластин. Вторая пластина нагревается электрическим током, для чего ключ K ставится в соответствующее положение. Переменный резистор R позволяет регулировать ток, протекающий по пластине, и таким образом регулировать её температуру. Разность температур между пластинами контролируется термопарой (4), подключенной к гальванометру G .

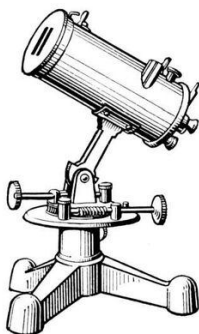


Рис. 5.1. Внешний вид пиргелиометра

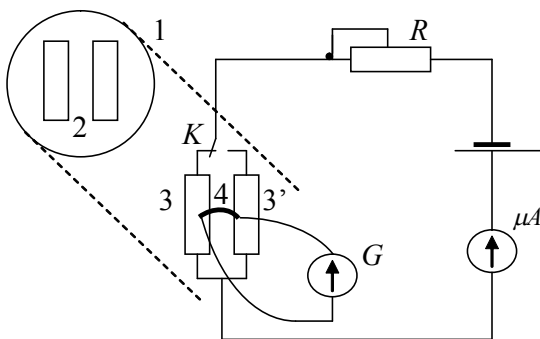


Рис. 5.2. Схема компенсационного пиргелиометра

Наблюдатель во время измерений должен добиться такого состояния, чтобы разность температур между пластинами была бы равна нулю, т.е. чтобы гальванометр показывал бы нулевой ток в цепи термопары. Это означает, что поток тепла в единицу времени J_1 на первую пластину (которая нагревается солнечной радиацией) равен потоку тепла J_2 , выделяющемуся во второй пластине, благодаря прохождению тока по ней. Эти потоки можно выразить как:

$$J_1 = \delta S s, \quad (5.1)$$

$$J_2 = i^2 r, \quad (5.2)$$

где δ – коэффициент поглощения солнечной радиации первой пластиной (если пластина черная, то можно считать $\delta = 1$);
 S – прямая солнечная радиация;

S – площадь пластины;
 i – ток, нагревающий вторую пластину;
 r – её электрическое сопротивление.

Приравняв потоки J_1 и J_2 , имеем:

$$\delta S_s = i^2 r, \quad (5.3)$$

откуда легко выразить прямую солнечную радиацию S :

$$S = \frac{r}{\delta_s} i^2 \quad (5.4)$$

или, обозначив постоянный множитель

$$\frac{r}{\delta_s} = k, \quad (5.5)$$

приходим к выражению:

$$S = k i^2. \quad (5.6)$$

Величину тока i , протекающего по пластине, измеряют с помощью миллиамперметра (μA), включенного в цепь последовательно с пластиной.

Достоинством этого прибора является то, что он, так же как и все абсолютные приборы, не требует калибровки. Постоянный множитель k определяется по формуле (5.5) перед измерениями.

Термоэлектрический актинометр (рис. 5.3, а) входит в состав актинометрической установки УАР (установка актинометрическая регистрирующая), выпускаемой промышленностью и используемой на метеорологической сети.

Принцип действия термоэлектрического актинометра основан на поглощении прямой солнечной радиации зачернённым диском, соединенным с нечётными спаями термобатареи. Чётные спаи термобатареи соединены с медным кольцом, находящимся в тени. Медное кольцо имеет температуру окружающего воздуха, а чёрный диск нагрет до несколько большей температуры, так как на него падает прямая солнечная радиация. Легко показать, что разность температур спаев термобатареи определяется значением прямой солнечной радиации. С другой стороны, термобатарея преобразует эту разность температур в электрический ток, измеряемый гальванометром. Таким образом, ток находится в прямой зависимости от прямой солнечной радиации.

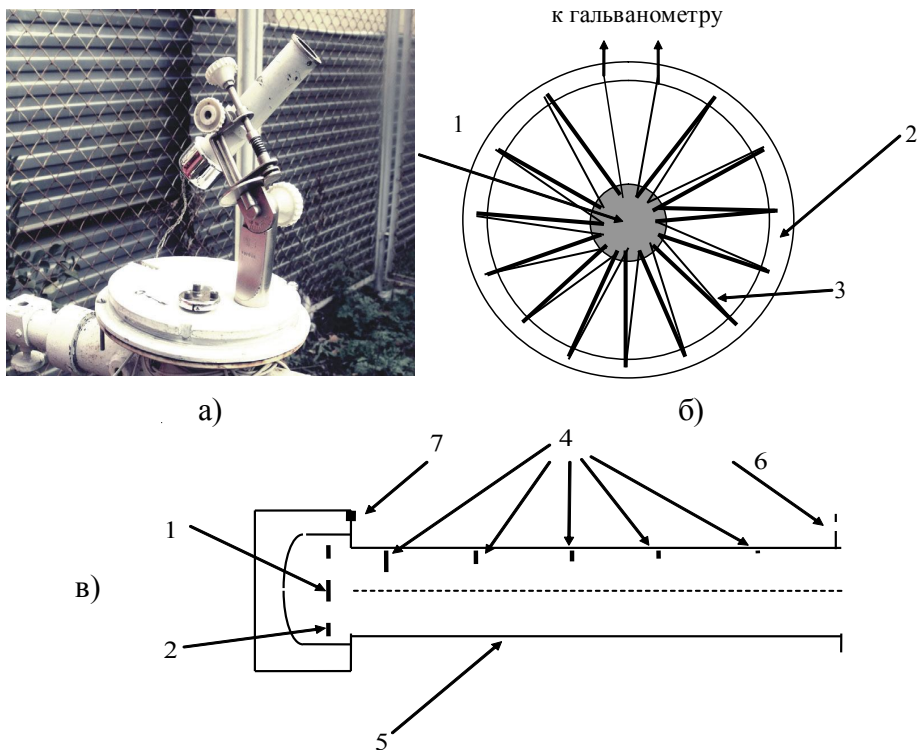


Рис. 5.3. Термоэлектрический актинометр М-3 (АТ-50).

1 - зачерненный диск; 2 - медное кольцо; 3 – термобатарея;
 4 - последовательно сужающиеся диафрагмы; 5 - металлический цилиндр
 (корпус); 6 - отверстие в диске для наведения актинометра на солнце; 7 – точка
 на корпусе прибора

Устройство термоэлектрического актинометра показано на рис. 5.3 (б, в). Приёмником радиации служит диск из серебряной фольги (1), зачернённый со стороны, обращаемой к солнцу. С другой стороны диска через изолирующую прокладку приклеены нечётные спаи термобатареи (3), состоящей из 52 элементов, соединенных последовательно. Чётные спаи термобатареи подклеены через изолирующую прокладку к медному кольцу (2). Элементы термобатареи состоят из манганиновых и константановых полосок, изолирующие прокладки сделаны из папиросной бумаги, пропитанной шеллаком. Выводы термобатареи соединены проводами с гальванометром. Вся эта конструкция помещена в металлический кожух (5) - цилиндр, внутри которого вставлены последовательно сужающиеся диа-

фрагмы (4). Благодаря им, световой поток падает только на зачернённый диск (1). Для нацеливания актинометра на солнце предусмотрено отверстие в ободке трубы (6) и точка на корпусе прибора (7). При точной наводке световой луч, пройдя через отверстие (6), должен попасть в точку. Установка актинометра осуществляется поворотом винтов штатива, на котором закреплен сам актинометр.

Градуировка актинометра проводится вместе с гальванометром или без него. В первом случае рассчитывается прямая солнечная радиация (S) по формуле (5.7). Во втором случае в паспорте прибора указывается величина его чувствительности, т.е. изменение ЭДС термобатареи при единичном изменении (на 1 кВт/м^2) потока радиации.

В первом случае обычно указывают переводной множитель актинометра k , зная который можно по показаниям гальванометра определить величину прямой солнечной радиации S по формуле:

$$S = k \cdot (N - N_0), \quad (5.7)$$

где N – показания гальванометра в делениях при измерении;

N_0 – показания гальванометра при закрытой крышке (место нуля);

k – переводной множитель, имеющий размерность $\text{кВт/м}^2\text{-дел}$.

Легко понять, что переводной множитель зависит от типа применяемого гальванометра. При замене гальванометра прибором другого типа переводной множитель изменяется. Поэтому в актинометрических измерениях используют гальванометры стандартного типа ГСА-1м.

Переводной множитель актинометра зависит также от температуры прибора. Эта зависимость обусловлена двумя причинами: во-первых, от температуры зависит чувствительность гальванометра, во-вторых, изменяется теплоотдача дисков, к которым приклеены спаи термобатареи. Обычно первая причина является определяющей. По этой причине при градуировке актинометра без гальванометра чувствительность его сообщается без учёта температурной зависимости. При градуировке с помощью гальванометра вводится поправка на температуру, определяемая по специальной таблице.

5.2. Измерение рассеянной и суммарной радиации

На первый взгляд, измерение рассеянной и суммарной (т. е. рассеянной плюс прямой) радиации представляет собой простую задачу: необходимо обеспечить падение на некоторую черную поверхность радиации со всей верхней полусферы. Однако необходимо решить следующие проблемы:

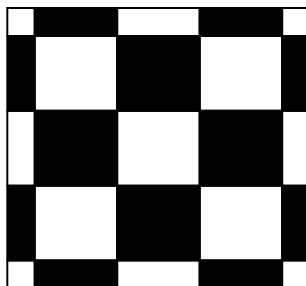
1. Рассеянная радиация имеет максимум в голубой (коротковолновой) части спектра, следовательно, прибор для её измерения должен также иметь максимальную чувствительность в этом диапазоне.

2. Для измерения необходимо исключить попадание радиации на некоторую поверхность, находящуюся рядом с зачерненной пластиной, чтобы далее измерять разность температур между пластиной и этой поверхностью.

Эти трудности решаются комплексно. Основной чувствительный элемент пиранометра (рис. 5.4, а) - прибора для измерения рассеянной и сум-



а)



б)

Рис. 5.4. Внешний вид пиранометра (а);
приёмник радиации пиранометра М-80м (б)

марной радиации, показан на рис. 5.4, б. Это плоская поверхность, участки которой окрашены в чёрный и белый цвета. Чёрные участки закрашены сажей, которая поглощает всю радиацию, белые участки закрашены магнием, поглощающей только длинноволновую радиацию. Таким образом, между черными и белыми участками появляется разность температур, обусловленная разным поглощением радиации. Значит, коротковолновая радиация, которую поглощает сажа, но не поглощает магния, является причиной появления разности температур между участками. Разность температур измеряется с помощью термобатареи, нечётные спаи которой помещены под чёрными участками, а чётные – под белыми. Следовательно, мерой рассеянной радиации является термоток термобатареи, измеряемый с помощью гальванометра.

Однако поглощательные свойства сажи и магнии не являются столь идеальными. Магния все же поглощает коротковолновую радиацию, хотя и гораздо хуже, чем сажа, а поглощательные свойства сажи и магнии

по отношению к длинноволновой радиации различны. Для выравнивания их поглощательных свойств по отношению к длинноволновой радиации белые поля пропитаны парафином. Для исключения ветровой погрешности, т.е. выравнивания температур черных и белых полей, приёмник радиации закрыт прозрачным колпаком (1) (рис. 5.5), пропускающим коротковолновую радиацию. Правда, стеклянный колпак поглощает радиацию в областях $0,3 - 0,4$ мкм и $2,5 - 4$ мкм, но в этих областях интенсивность прямой и рассеянной радиации очень мала. Для измерения рассеянной радиации следует исключить попадание на пиранометр прямой солнечной радиации. С этой целью предусмотрен теневой экран (5), который привинчивается к специальному стержню и закрепляется на нём винтом. Размеры экрана и стержня рассчитаны так, чтобы от центра приёмника радиации пиранометра экран был виден под углом 10° . Тогда экран закрывает участок неба вокруг солнечного диска с размером телесного угла 5° . Необходимой частью пиранометра является осушитель (6), установленный во внутренней полости стойки. Осушитель заполнен силикагелем - веществом, поглощающим водяной пар.

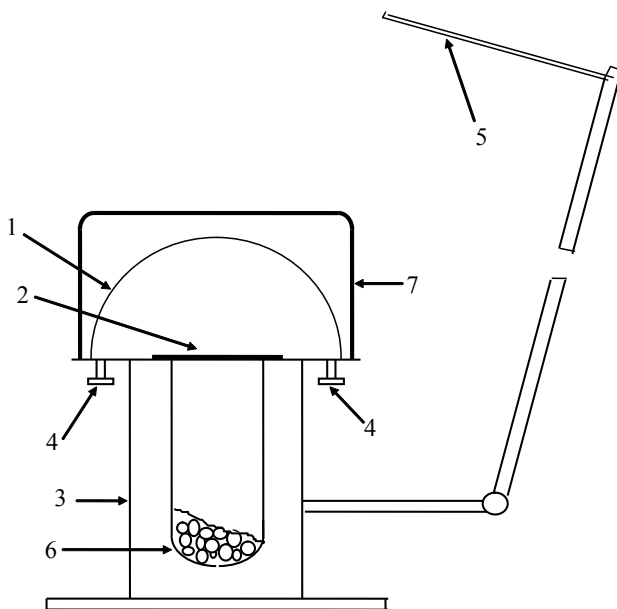


Рис. 5.5. Пиранометр универсальный М-80м.

- 1 - стеклянный колпак; 2 - приёмник радиации; 3 - корпус;
4 - выходы термобатарей; 5 - теневой экран; 6 - осушитель; 7 - крышка

Таким образом, под колпаком находится сухой воздух, что способствует сохранности термобатареи. В промежутках между измерениями пиранометр закрывают металлической крышкой (7).

Суммарная радиация может быть измерена пиранометром точно так же, как и рассеянная, но в этом случае теневой экран не применяется. Практически суммарную радиацию определяют сложением прямой, измеренной по актинометру, и рассеянной, измеренной по пиранометру. Так делают потому, что при измерении суммарной радиации чёрные поля нагреваются слишком сильно и происходит перенос тепла с черных на белые поля, что вызывает погрешность в измерениях.

Пиранометр позволяет измерить альбедо подстилающей поверхности (иногда его называют также альбедометром). Это делается с помощью двух последовательных измерений: сначала измеряется (или вычисляется) суммарная радиация, приходящая с верхней полусферы, затем пиранометр поворачивают на 180° и измеряют радиацию, отраженную земной поверхностью. Альбедо вычисляют как отношение этих величин.

Градуйровка пиранометра производится путём его сравнения с актинометром или пиргелиометром. Пиранометр помещают в специальную трубу, исключая попадание на него рассеянной радиации, тогда пиранометр превращается, по сути дела, в актинометр. Далее сравнивают его показания с образцовым актинометром. Результатом сравнения является так называемый нормальный переводной множитель. Он действителен для того случая, когда радиация падает на приёмник перпендикулярно его поверхности, т. е. с зенита. Точно так же, как и для актинометра, переводной множитель (k) определяют при различных температурах прибора для введения в дальнейшем температурной поправки в показания.

При наклонном падении лучей чувствительность, а следовательно, и переводной множитель пиранометра меняются (рис. 5.6). Это происхо-

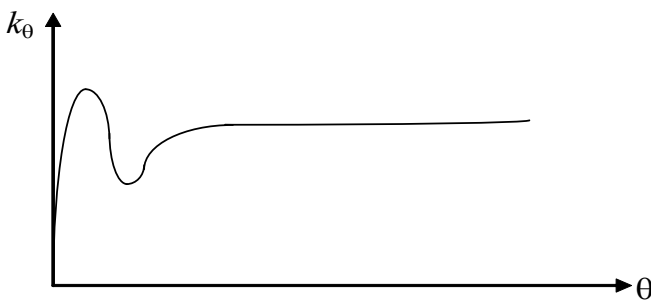


Рис. 5.6. Зависимость переводного множителя актинометра от зенитного угла Солнца

дит из-за того, что поглощательная способность покрытий приёмника зависит от угла падения лучей, а также из-за того, что прозрачность применяющихся стеклянных колпаков на различных участках разная. Для учёта указанного обстоятельства пиранометры градуируются дополнительно, и определяется зависимость переводного множителя от угла падения лучей.

Если переводной множитель пиранометра известен, то рассеянная радиация D вычисляется по формуле, аналогичной формуле (5.7):

$$D = k \cdot (N - N_0), \quad (5.8)$$

где N – показания гальванометра в делениях при измерении;

N_0 – показания гальванометра при закрытой крышке (место нуля);

k – переводной множитель, имеющий размерность $\text{кВт/м}^2 \cdot \text{дел}$.

5.3. Измерение радиационного баланса. Балансомер

Согласно определению, радиационный баланс – это сумма всех радиационных потоков на данную поверхность, причём потоки с верхней полусферы суммируются с положительным знаком, а с нижней – с отрицательным. Для измерения радиационного баланса используется балансомер М-10м в комплекте с одним из приборов: гальванометром, интегратором или самописцем типа КСП-4. Часто проводят измерения с одним гальванометром, что не даёт возможности определять интегральный радиационный баланс и проводить непрерывную запись результатов.

Балансомер М-10м состоит из термобатареи, укрепленной между двумя черными пластинами, помещёнными одна под другой (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Внешний вид балансомера М-10м

Пластины устанавливаются горизонтально. Верхняя пластина нагревается потоками радиации с верхней полусферы, а именно: прямой солнечной радиацией, рассеянной радиацией, излучением самой атмосферы. Нижняя пластина нагревается потоками радиации с нижней полусферы: отраженной земной поверхностью прямой солнечной радиацией, рассеянной радиацией (если балансомер помещён на некоторой высоте над землей), излучением нижележащего слоя атмосферы и излучением земной поверхности. Кроме того, менее нагретая пластина нагревается потоком тепла, приходящим с более нагретой пластины. Обе пластины обмениваются теплом с окружающим воздухом в результате излучения и конвективного теплообмена.

Поперечное сечение отдельной секции термобатареи представлено на рис. 5.8. Термобатарея состоит из ленты константана (1), намотанной на медный брусок (2). Половина витков гальваническим путем покрыта тонким слоем серебра (3). Вторая половина витков (4) зачернена. Места окончания серебряного слоя – термоспаи, которые располагаются поочередно на верхней и нижней поверхности бруска. Выводы секции также выполнены из константана и все секции соединены между собой последовательно так, что общая ЭДС термобатареи равна сумме 320 – 330 ЭДС термопар “константан – серебро”. Для соединения с гальванометром к крайним термоэлементам припаяны концы мягких проводов, которые выведены через рукоятку. Внутренняя полость балансомера герметизирована. Балансомер крепится к стойке с помощью шарнира.

Свяжем радиационный баланс B с разностью температур верхней и нижней пластин балансомера. Представим все радиационные потоки, действующие на пластины балансомера (рис. 5.9). На верхнюю пластину приходит прямая солнечная радиация S , рассеянная радиация, приходящая с верхней полусферы D , собственное излучение атмосферы (в инфракрасном диапазоне) E_A .

Кроме этого, сама пластина излучает поток, равный:

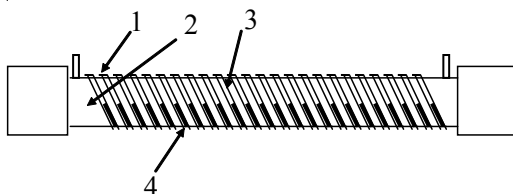


Рис. 5.8. Отдельная секция термобатареи (вид сверху)

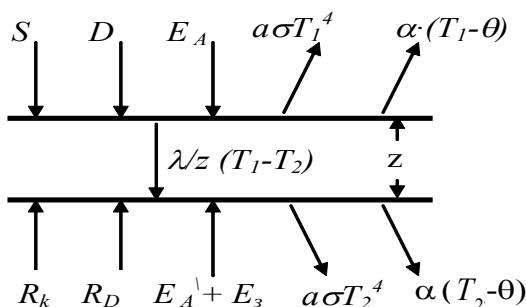


Рис. 5.9. Радиационные потоки, действующие на пластины балансомера

$$a\sigma T_1^4,$$

где a – коэффициент серости;

σ – коэффициент Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴);

T_1 – температура верхней пластины по шкале Кельвина.

Пластина теряет тепло в результате конвекции, конвективный поток тепла выражается формулой

$$\alpha (T_1 - \theta),$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена между пластиной и окружающим воздухом;

θ – температура воздуха.

Кроме того, внутри балансомера существует поток тепла между пластинами, равный

$$\lambda/z(T_1 - T_2),$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, заполняющего балансомер;

z – расстояние между пластинами.

(Примем направление потока от верхней пластины к нижней положительным). На нижнюю пластину приходят следующие потоки радиации: отраженная солнечная радиация R_k , отраженная рассеянная радиация плюс радиация рассеянная воздухом, находящимся ниже балансомера R_D , излучение атмосферы ниже балансомера плюс излучение земной поверхности $E_A' + E_3$. Также как и с верхней пластины, с нижней уходят радиационный поток тепла $a\sigma T_2^4$ и конвективный поток

$$\alpha (T_2 - \theta),$$

где T_2 – температура нижней пластины.

Если температура верхней и нижней пластин стабилизировалась, то сумма всех тепловых потоков на каждую пластину равна нулю – сколько тепла приходит в единицу времени на единицу площади каждой пластины, столько же и уходит. Запишем уравнение баланса тепловых потоков на единицу площади каждой пластины. Для верхней пластины имеем:

$$\delta (S + D + E_A) = a \sigma T_1^4 + \alpha (T_1 - \theta) + \frac{\lambda}{z} (T_1 - T_2), \quad (5.9)$$

где δ – коэффициент поглощения радиации поверхностью пластины (для черной пластины $\delta \approx 1$).

При составлении уравнения для нижней пластины учтём, что тепловой поток внутри балансомера для неё является приходящим, и, следовательно, должен быть записан в левой части уравнения:

$$\delta (R_k + R_D + E_A' + E_s) + \frac{\lambda}{z} (T_1 - T_2) = a \sigma T_2^4 + \alpha (T_2 - \theta). \quad (5.10)$$

Вычтем из уравнения (5.9) почленно уравнение (5.10) и перенесем в правую часть одинаковые члены. Тогда после очевидных преобразований имеем:

$$\begin{aligned} \delta (S + D + E_A - R_k - R_D - E_A' - E_s) = \\ = a \sigma (T_1^4 - T_2^4) + \alpha (T_1 - T_2) + \frac{2 \lambda}{z} (T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Мы видим, что выражение, стоящее в скобках в левой части уравнения, есть не что иное, как радиационный баланс! Действительно, все потоки, приходящие с верхней полусферы учтены с положительным знаком, а с нижней – с отрицательным. Обозначив радиационный баланс за B , можем написать:

$$\delta B = a \sigma (T_1^4 - T_2^4) + \alpha (T_1 - T_2) + \frac{2 \lambda}{z} (T_1 - T_2). \quad (5.12)$$

Теперь преобразуем разность:

$$(T_1^4 - T_2^4) = (T_1^2 - T_2^2)(T_1^2 + T_2^2) = (T_1 - T_2)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2).$$

Принимая во внимание, что температура нижней пластины отличается от температуры верхней пластины всего на несколько градусов, и при-

няв её примерно равной температуре окружающей среды θ , можем с достаточной степенью точности принять:

$$T_1^2 + T_2^2 = 2T^2 = 2\theta^2,$$

а также

$$T_1 + T_2 = 2T = 2\theta.$$

Тогда уравнение (5.12) перепишем в виде:

$$\delta B = 4a \sigma \theta^3 (T_1 - T_2) + \alpha (T_1 - T_2) + \frac{2\lambda}{z} (T_1 - T_2). \quad (5.13)$$

Или, вынося за скобки разность $(T_1 - T_2)$ и решая уравнение относительно B , получим:

$$B = \frac{(4a \sigma \theta^3 + \alpha + \frac{2\lambda}{z})}{\delta} (T_1 - T_2). \quad (5.14)$$

Поскольку разность температур между пластинами измеряется с помощью термобатарей, подключенной к гальванометру, напишем выражение для тока, протекающего через гальванометр. Согласно формуле (1.34):

$$i = \frac{n e (T_1 - T_2)}{nR_t + R_g + r}. \quad (5.15)$$

Напомним, что n – количество термопар в термобатарее, e – табличная термоЭДС для термопары. Обозначив выражение в знаменателе (5.15) как R_Σ – суммарное сопротивление всей электрической цепи, и подставив в (5.15) разность температур, выраженную из (5.14), получим:

$$i = \frac{e n \delta}{R_\Sigma (\alpha + 4a \sigma \theta^3 + 2 \frac{\lambda}{z})} \cdot B. \quad (5.16)$$

Это даёт нам возможность написать выражение для чувствительности балансомера. Поскольку входным параметром является радиационный баланс B , а выходным – ток i , то чувствительность балансомера получим дифференцированием формулы (5.16):

$$S = \frac{di}{dB} = \frac{e n \delta}{R_{\Sigma} (\alpha + 4a \sigma \theta^3 + 2 \frac{\lambda}{z})}. \quad (5.17)$$

Следовательно, для увеличения чувствительности балансомера необходимо пользоваться теми же рекомендациями, которые были даны для увеличения чувствительности термобатареи (раздел 1.6). Плюс к этому, необходимо, чтобы коэффициент поглощения радиации δ был бы максимальным (напомним, что его максимальное значение равно единице).

Рассмотрим *погрешности балансомера*. Влияние температуры весьма мало: $\alpha \gg 4a\sigma\theta^3$, значит, основной погрешностью является влияние скорости ветра. Поэтому показания балансомера могут изменяться при изменении скорости ветра. Чтобы этого не произошло, применяют уже известный нам принцип «мухи и слона». На роль «слона» здесь лучше всего подойдет последнее слагаемое в знаменателе формулы (5.17). Следовательно, мы должны обеспечить соотношение:

$$\alpha \ll 2 \frac{\lambda}{z}. \quad (5.18)$$

Этого можно добиться, уменьшив, насколько возможно, толщину балансомера z . Правда, соблюдение требования (5.18) приведёт к увеличению знаменателя в формуле (5.17), а значит, к уменьшению чувствительности балансомера. Но к этому следовало быть готовым, так как уменьшение чувствительности прибора – это обычная цена уменьшения погрешности. Уменьшение чувствительности можно в значительной степени скомпенсировать применением чувствительного гальванометра.

Практически определение радиационного баланса проводится по формуле, аналогичной формулам (5.7) и (5.8):

$$B = k \cdot (N - N_0), \quad (5.19)$$

где B – радиационный баланс;

N – показания гальванометра при измерении;

N_0 – показания гальванометра при закрытой крышке балансомера (место нуля).

При измерении радиационного баланса целесообразно выставить значение $N_0 \sim 4 - 5$ делений. Это делается для того, чтобы в сумерки, когда радиационный баланс переходит через нуль, точно определить знак

баланса. При $N < N_0$ он отрицательный. Переводной множитель k всё-таки несколько зависит от скорости ветра, что учитывается специальными таблицами.

Глава 6. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Современную метеорологическую измерительную технику невозможно себе представить без цифровых приборов. В цифровых измерительных приборах, в отличие от аналоговых (введение, раздел 1), показывающим устройством является цифровой индикатор, дисплей, или другие устройства. Элементы индикатора могут, например, светиться, если на них подаётся напряжение. Из светящихся элементов составляются цифры и знаки. Следовательно, выходной сигнал нельзя себе представить в виде изменяющегося напряжения, как в аналоговых системах. Здесь напряжение должно быть подано (или не подано) на множество проводов, идущих к элементам индикаторов.

Задачей этого раздела как раз и является показать, как формируются такие сложные выходные сигналы, которые мы будем называть *цифровой формой* представления сигнала. Однако прежде чем перейти к изложению внутренней структуры цифровых информационно – измерительных систем (ИИС), рассмотрим очень кратко основные положения теории информации.

6.1. Информация. Основные определения, свойства. Цифровые коды

Слово «информация» знакомо всем. «Я получил информацию», «он владеет информацией» - эти выражения употребляются часто. Вот два человека разговаривают – обмениваются информацией. Но что такое информация? Как её измерять? Каковы должны быть её свойства? На эти вопросы мы сейчас должны дать ответ.

Определим информацию как *совокупность сведений, отражающих наше знание о предмете, объекте или процессе*. Вот, например, объект нашего изучения – земная атмосфера. Информация о ней – это набор сведений о температуре, давлении, скорости ветра и других метеорологических величинах. Информация о человеке – это сведения о его возрасте, профессии и т.д.

Информацию обычно передают в виде *сообщения*. Сообщение – это информация, передаваемая по каким-либо каналам связи, т.е. *движущая информация*. Допустим, перед нами книга. Она содержит большое количество информации. Но эта информация превращается в сообщение

только тогда, когда книгу читают, например, вслух. Тогда сообщение передаётся в виде акустического сигнала. Или, например, по кабелю от индукционного анемометра идёт сообщение о скорости ветра в виде электрического сигнала.

В каких же единицах измерять количество информации? Сформулируем основные требования к единицам измерения информации.

1. Универсальность применения. Единица измерения должна быть применима к любой информации, о любом объекте или процессе.

2. Аддитивность. При увеличении сообщения в n раз количество передаваемой информации также должно возрасти в n раз.

А теперь попробуем разложить информацию на составные элементы и выделить самый малый элемент. Предположим, Вы ведёте разговор с человеком, который отвечает на Ваши вопросы. Ответы могут быть подробными, содержать большое количество информации, или, наоборот, краткими. Какой самый краткий ответ Вы можете получить? Очевидно, «да» или «нет». Вот этот ответ на вопрос и примем за элемент информации. Этот единичный элемент информации носит название «*бит*». Нетрудно понять, что, задавая такие вопросы, на которые возможны только ответы «да» или «нет», можно узнать практически всё. Известна детская игра – угадать задуманное число от 1 до 1000, если собеседник отвечает «да» и «нет». При правильной формулировке понадобится задать не более десяти вопросов. Количество информации – 10 бит.

Ну, а как же измерить информацию, содержащуюся в непрерывном сообщении? Вот идёт, например, электрический сигнал – напряжение, которое может изменяться в определённых пределах в течение определённого интервала времени. Здесь уместно вспомнить, что любую величину мы всегда измеряем приближенно. Когда мы говорим, что напряжение равно 2,36 В, то мы пренебрегаем тысячными и более мелкими долями вольта, нас удовлетворяет измерение с точностью до 0,01 В. Поэтому в технике измерений непрерывно меняющиеся сигналы всегда можно заменить *квантованными*, т.е. принимающими только определённые значения (0,01 В, 0,02 В и т.д.).

Разность между двумя ближайшими допустимыми уровнями носит название *шаг квантования*. Естественно, что уменьшение шага квантования увеличивает точность измерения. Также введём квантование и во времени: будем считать сигнал *дискретным*, т.е. измерять его будем только через определённые промежутки времени. Пример преобразования непрерывного сигнала квантованным показан на рис. 6.1.

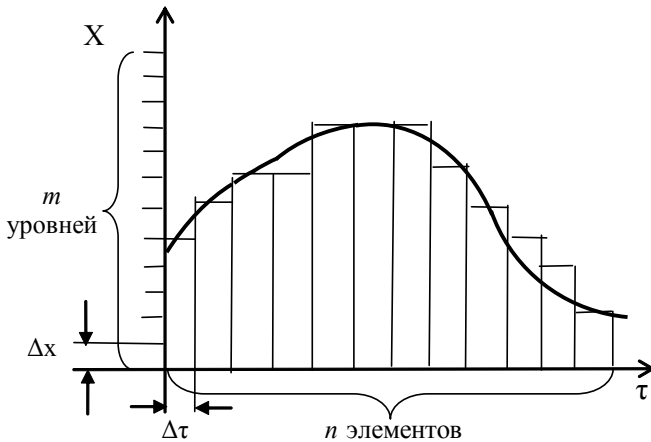


Рис. 6.1. Замена непрерывного сигнала квантованным.
Шаг квантования величины $x - \Delta x$, шаг квантования по времени - $\Delta \tau$

Теперь предположим, что такой сигнал, квантованный на m уровнях, состоящий из n элементов, передаётся в линию связи. Сколько различных сообщений может быть передано таким образом? Самое малое число – если $n = 1$, $m = 2$ – тогда возможны только два сообщения (0-й уровень или 1-й уровень). Если $n = 1$, $m = 3$, возможны три сообщения; если $n = 1$, а $m = m$, возможно m сообщений. Если же $n = n$, $m = m$, то, очевидно, возможно N сообщений, где $N = m^n$.

Нельзя ли принять N - число различных возможных сообщений за количество информации, которая может быть передана в таком сообщении? Очевидно, нет, так как не выполняется второе поставленное требование – аддитивность. При возрастании сообщения (т.е. числа n) в 2 раза величина N возрастёт в m^n раз. Для выполнения требования аддитивности прологарифмируем N по некоторому основанию a :

$$J = \log_a N = n \log_a m. \quad (6.1)$$

Если эту величину J взять в качестве меры информации, то требование аддитивности будет соблюдено. Однако какое же основание взять для логарифма? Для ответа на этот вопрос выделим единичный элемент информации: примем $n = 1$, $m = 2$. Тогда возможны только два сообщения (2 ответа), т.е. $J = 1$ бит:

$$J = 1 = 1 \cdot \log_a 2. \quad (6.2)$$

Отсюда видно, что $a = 2$. Значит, в дискретном квантованном сообщении содержится количество информации:

$$J = n \cdot \log_2 m. \quad (6.3)$$

Из этой формулы вытекают интересные следствия. Рассмотрим случай, когда $n = 1$ и $m = 1$. Это означает, что передаётся всего один элемент, который может принимать только одно значение (и, следовательно, сообщение нам известно заранее!). Тогда:

$$J = 1 \cdot \log_2 1 = 0. \quad (6.4)$$

Если передаваемое сообщение (или элемент сообщения) заранее известен, то оно несёт в себе нулевое количество информации.

А теперь предположим, что сигнал всё-таки непрерывный, т.е. $\Delta t \rightarrow 0$ и $\Delta x \rightarrow 0$. Следовательно, $n \rightarrow \infty$ и $m \rightarrow \infty$. Формула (6.3) свидетельствует, что в этом случае $J \rightarrow \infty$, т.е. абсолютно точное измерение невозможно хотя бы потому, что для этого требуется бесконечно большое количество информации.

Итак, в дальнейшем будем передавать в линию связи, квантованные дискретные сигналы. Однако обязательна ли буквально такая передача? Ведь теперь каждое значение измеряемой величины можно выразить числом. Это число может быть передано разными способами. Можно установить множество уровней квантования. А можно уменьшить число уровней квантования сигнала, но зато каждое значение измеряемой величины передавать несколькими элементами. Поясним на примере. Допустим, надо передать число 2014. Можно установить 10000 уровней квантования сигнала и передать всего один сигнал на 2014 - м уровне. А можно установить всего 10 уровней квантования и передать четыре сигнала: первый – на 2-м уровне, второй – на нулевом, третий - на первом, четвертый – на 4-м. Нетрудно заметить, что в этом случае мы воспользовались привычной для нас десятичной системой счисления! Мы можем воспользоваться любой другой системой – двоичной, троичной и т.д., но число передаваемых сигналов всякий раз придется выбирать в соответствии с количеством уровней квантования сигнала.

Заметим, что здесь речь идет уже о количестве уровней квантования сигнала, а не измеряемой величины! Число уровней квантования величины X остается прежним. Таким образом, точность измерения не пострадает.

Какая же система счисления наиболее подходит для технической реализации? Можно доказать, что самой экономичной является двоичная

система. В соответствии с этим прием для передачи сообщений *двоичный код* – такой, в котором каждый элемент может принимать только два значения – есть или нет, 1 или 0. Такой код будем называть ещё *двухпозиционным* или *бинарным*. Кстати, технически осуществлять его реализацию гораздо проще, чем других. Легко узнать и количество информации (в битах), переданное таким кодом – оно равно количеству элементов в сообщении. Ведь каждый элемент несет информацию в один бит.

Подавляющее большинство цифровых электронных систем использует этот код. Но для этого все числа придется переводить в двоичную систему. Рассмотрим пример записи числа в различных системах. Число в десятичной системе счисления представляет собой сумму:

$$A = a_1 \cdot 10^{n-1} + a_2 \cdot 10^{n-2} + \dots + a_n \cdot 10^0, \quad (6.4)$$

где a_i принимает десять возможных значений от 0 до 9.

А в двоичной системе:

$$A = a_1 \cdot 2^{n-1} + a_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + a_n \cdot 2^0, \quad (6.5)$$

где a_i принимает всего два значения: 0 или 1.

Например, число 5 в двоичной системе представляется следующим образом:

$$5 = 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0, \text{ т.е.} \\ 5 = 101.$$

Техническая реализация этого кода очень проста. Будем передавать числа в виде импульсов тока одинаковой длительности, но разного уровня – высокого (1 - есть импульс) и низкого (0 - нет импульса). Такая реализация получила название *цифровой формы сигнала*.

Всё наше дальнейшее рассмотрение цифровой техники будет посвящено устройствам для передачи, приёма, преобразования и запоминания сигнала в цифровой форме. Отдельно рассмотрим преобразование сигнала из цифровой формы в аналоговую и из аналоговой в цифровую. Мы не сможем подробно изучить схемы цифровых систем, но основные принципы их устройства нам необходимо рассмотреть.

В заключение заметим, что бит – самая малая, но не единственная единица информации. Есть ещё одна единица информации – слово. Под «словом» понимают количество информации в несколько байт – неопределенное количество (так же, как в слове неопределенное количество букв), выражающее законченный по смыслу участок сообщения.

Вот какие единицы чаще всего используют:

1 байт = 8 бит,

1 килобайт = 2^{10} байт = 1024 байт,

1 мегабайт = 2^{20} байт = 1048576 байт,

1 гигабайт = 2^{30} байт = 1073741400 байт.

6.2. Устройства для хранения информации (запоминающие устройства)

Итак, информация поступает в цифровом коде – в виде токовых и бестоковых импульсов (единиц и нулей). Теперь эту информацию нужно обработать. Но для этого её необходимо сохранить хотя бы на короткое время. Рассмотрим устройства, позволяющие сохранять и запоминать информацию. Будем называть их «ЗУ» - *запоминающие устройства*.

ЗУ делятся по своему целевому назначению на два крупных класса: *постоянные запоминающие устройства* (ПЗУ) и *оперативные запоминающие устройства* (ОЗУ). ПЗУ – это устройство, в котором информация записывается, как правило, только один раз. Стереть её и записать новую информацию в ПЗУ или вообще невозможно, или требует большого труда и времени. В отличие от ПЗУ в ОЗУ можно многократно записывать и стирать информацию, причем сохранять её в ОЗУ можно достаточно долго.

Любое ЗУ удобно представлять в виде ячеек, в каждой из которых хранится единица информации – один бит, или байт, или большее количество. Иногда такие ячейки можно выделить, как участки электронной схемы, иногда – нет. Рассмотрим примеры реализации схем ЗУ.

1. *ПЗУ*. ПЗУ делятся, по крайней мере, на три типа: ПЗУ масочного типа, программируемые ПЗУ, репрограммируемые ПЗУ.

ПЗУ масочного типа – это такое ПЗУ, в каждой ячейке которого записана информация, обусловленная конструкцией схемы. Процесс записи информации, собственно, отсутствует – информация уже содержится в схеме после её сборки. Понятно, что изменить записанную информацию – значит переделать схему. Такое ПЗУ можно сравнить с напечатанной книгой. При рассмотрении схем запоминающих устройств будем иметь в виду, что ЗУ имеет несколько выходов и несколько входов (рис. 6.2). На входы $X_1, X_2 \dots X_n$ подается число в двоичном коде. Это число называется *адресом ячейки*. В соответствии с этим на выходах $Y_1, Y_2 \dots Y_k$ также возникает число, которое называется *содержимым ячейки*.

Программируемые ПЗУ (ППЗУ) – это такие ПЗУ, в каждой ячейке которых первоначально не содержится информации (записаны нули). Информация записывается в ППЗУ только один раз и в дальнейшем не может быть стерта или переписана. Продолжая наше сравнение, можно сказать, что ППЗУ – это чистая тетрадь, в которую можно ручкой записать текст, но стереть его уже нельзя.

Схема ППЗУ организована так же, как и в ПЗУ масочного типа, но она содержит миниатюрные легкоплавкие перемычки или же p - n -переходы, которые могут быть пробиты импульсами напряжения. Запись информации, т.е. программирование ППЗУ, заключается в удалении легкоплавких перемычек (в нужных местах!) импульсами тока, или пробоем p - n -переходов импульсами напряжения. Ясно, что перепрограммирование, т.е. восстановление перемычек уже невозможно.

Репрограммируемые ПЗУ (РПЗУ) – это такие запоминающие устройства, которые позволяют осуществлять стирание и запись информации, но процесс этот достаточно трудоёмкий. Схема РПЗУ организована так же, как и ППЗУ, но вместо легкоплавких перемычек она содержит кристаллы веществ, которые приобретают свойства проводников при облучении ультрафиолетовым светом и теряют эти свойства при пропускании импульсов тока. Таким образом, если нужно осуществить перезапись информации, схему необходимо вынуть из прибора, стереть информацию пропусканием тока, а затем наложить на схему маску с отверстиями в нужных местах и облучить ультрафиолетовым светом.

2. *ОЗУ*. В свою очередь, ОЗУ делятся на два типа:

- а) энергозависимые ОЗУ;
- б) энергонезависимые ОЗУ.

Энергозависимые ОЗУ – такие запоминающие устройства, в которых информация сохраняется только при условии подачи напряжения питания. При отключении схемы от источника питания информация стирается. Такие ОЗУ основаны на двух методах хранения информации. Первый метод – схема, содержащая триггерные ячейки, второй метод основан на заряде конденсатора.

Рассмотрим схему такой триггерной ячейки (рис. 6.3). Эта схема имеет два входа (S-вход и R-вход) и два выхода. Коллектор транзистора VT_1 соединен с базой VT_2 через резистор R_2 . Коллектор транзистора VT_2

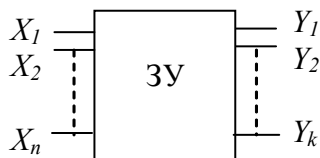


Рис. 6.2. Запоминающее устройство

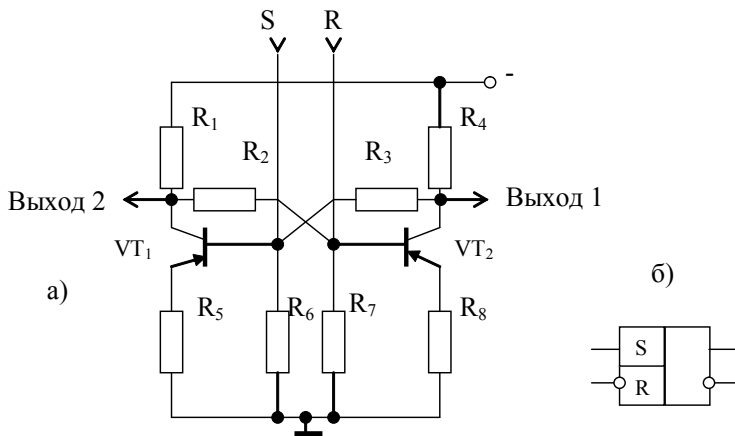


Рис. 6.3. Принципиальная схема триггера (а) и его обозначение на схемах (б)

соединен с базой VT_1 через резистор R_3 . В данной схеме использованы $p-n-p$ -транзисторы.

Следовательно, если транзистор VT_1 открыт, то напряжение на его коллекторе близко к нулю, через открытый транзистор проходит ток. Этот нулевой потенциал сообщается базе VT_2 через R_2 и, следовательно, VT_2 закрывается. Коллектор VT_2 должен теперь иметь отрицательный потенциал, так как VT_2 закрыт и его коллектор соединен с отрицательным полюсом питания через R_4 . Этот отрицательный потенциал сообщается базе VT_1 через R_3 и поддерживает VT_1 в открытом состоянии. Такое состояние триггера устойчиво, так как транзисторы “поддерживают друг друга” и оно может сохраняться неопределенно долгое время.

Легко заметить, что триггер является абсолютно симметричной системой и, следовательно, возможно другое состояние, когда VT_1 закрыт, а VT_2 открыт. Оно столь же устойчиво, как и предыдущее. Перевести триггер из одного состояния в другое можно, подав положительный импульс на R -вход или отрицательный импульс на S -вход. Тогда транзистор VT_1 закроется, а VT_2 - откроется. Следовательно, даже после окончания импульса триггер останется в новом состоянии. Перевести триггер в прежнее состояние можно, подав кратковременный отрицательный импульс на R -вход или положительный импульс на S -вход.

Мы видим, что управлять состоянием триггера можно с помощью как положительных, так и отрицательных импульсов как по R , так и по S -входу. Будем говорить, что триггер “перебрасывается в другое состояние”

или “опрокидывается”. Чтобы подчеркнуть, какой именно вход вызвал опрокидывание триггера, говорят: “триггер срабатывает по R-входу” (или по S-входу). При изменении состояния триггера изменяется потенциал его выходов. Легко видеть, что потенциалы выходов противоположны по знаку.

Таким образом, триггер сохраняет память о том, какой импульс перевёл его в последнее состояние. Это позволяет применять триггеры в качестве элементов оперативной памяти.

Итак, триггер имеет два состояния, легко переводится из одного в другое; триггерная ячейка запоминает один бит информации.

Второй метод основан на заряде конденсатора. Любой конденсатор может быть заряжен или разряжен, таким образом можно также записать один бит информации. Правда, заряженный конденсатор через некоторое время потеряет заряд, поэтому необходима схема, которая периодически подзаряжает конденсатор. В современных микросхемах в качестве конденсатора используется ёмкость p - n -перехода в транзисторах. Разумеется, эта ёмкость мала и приходится подзаряжать её через каждые 20-30 микросекунд, но зато такая ёмкость быстро заряжается коротким импульсом напряжения. Стереть информацию можно очень быстро и просто: разрядить конденсатор, замкнув p - n -переход.

Энергонезависимые ОЗУ – это такие ОЗУ, в которых информация сохраняется при отключении источника питания. В качестве носителей информации сейчас применяются магнитные ленты или магнитные дискеты. Поверхность магнитной ленты представляет собой множество мельчайших ферритов, каждый из которых намагничивается специальной магнитной головкой при движении ленты. При повторном движении ленты около считывающей магнитной головки намагниченные ферриты возбуждают в головке малые импульсы тока, направление которых зависит от направления намагниченности ферритов. Такая система записи позволяет хранить большой объем информации в лентах или дискетах, имеющих малые размеры. Простота осуществления записи и чтения информации, которая может сохраняться в течение десятилетий – все эти качества делают этот способ весьма привлекательным.

Наконец, укажем ещё один способ записи и хранения информации – на лазерных твердых дисках (Card Discs – CD). Эти, знакомые всем нам диски, представляют собой миниатюрные концентрические канавки, в нужных местах прожигаемые чрезвычайно узким лазерным лучом. Так осуществляется запись информации. Затем, при чтении информации, CD

освещается другим, менее мощным лазерным лучом. Отраженный сигнал попадает на фотопреобразователь, с которого снимется цифровой электрический сигнал. Ёмкость таких CD гораздо больше ёмкости магнитных дисков. Размеры прожигаемых элементов теоретически ограничены лишь длиной волны лазерного сигнала, поэтому количество таких элементов памяти чрезвычайно велико. Ёмкость современных CD составляет 700 – 800 Мбайт.

6.3. Логические элементы (малые интегральные схемы)

Дальнейшее рассмотрение цифровых измерительных систем мы посвятим преобразованию сигналов. Как преобразовать аналоговый сигнал в цифровой? Как обеспечить зажигание элементов цифрового индикатора в соответствии с цифровым сигналом? Для решения этих задач применяются достаточно сложные схемы. Но любую сложную схему можно разделить на несколько элементов и уже из них собирать схемы любой сложности, как здание из кирпичей.

Основных, самых простых, схем в цифровой технике три. Это широко известные элементы «И», «ИЛИ», «НЕ». Эти схемы выполняют простые логические операции и поэтому называются малыми интегральными схемами или логическими элементами. Рассмотрим их.

1. Логический элемент «И».

Эта схема имеет один выход и два входа. На входы X_1 и X_2 подается сигнал в цифровом виде (1 или 0), а сигнал на выходе Y возникает в зависимости от входных сигналов (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Таблица истинности схемы «И»

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Из этой таблицы видно, что на выходе возникает единица только в том случае, если и на первом, и на втором входах – единицы. Во всех остальных случаях на выходе ноль. Схема «И» работает по принципу - «всё или ничего!».

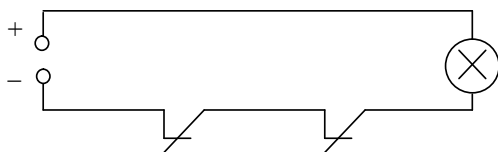


Рис. 6.4. Электрический аналог схемы «И»

Легко себе представить электрический аналог такой схемы – лампочка с двумя последовательно соединенными ключами (рис.6.4). Лампочка загорится только в том случае, если и первый, и второй ключи замкнуты. Если хотя бы один из них разомкнут, лампочка не горит.

А теперь рассмотрим электронную схему «И» (рис. 6.5). В ней применены два транзистора $n-p-n$ -типа. Мы знаем, что если на базу такого транзистора подать положительное напряжение (логическая единица), то транзистор будет открыт, т.е. по цепи эмиттер – коллектор течёт ток. Следовательно, если на обоих входах положительное напряжение ($X_1 = 1$ и $X_2 = 1$), то на выходе возникает также положительное напряжение ($Y = 1$), так как выход соединен с положительным полюсом источника питания. Если же хотя бы один из транзисторов заперт, то Y имеет нулевой потенциал – он соединен с землей через сопротивление R .

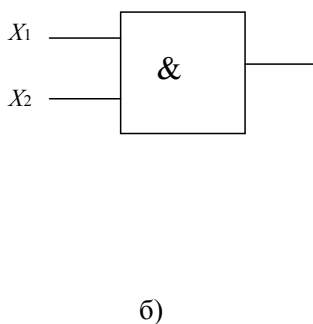
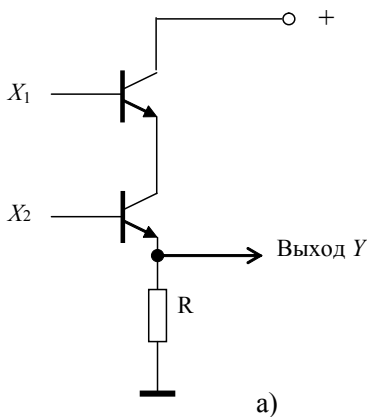


Рис. 6.5. Электронная схема «И» (а) и её обозначение на схемах (б)

В дальнейшем мы не будем рисовать такую схему с двумя транзисторами, а, как это принято в технической литературе, будем рисовать её в виде, изображенном на рис. 6.5, б.

2. Логический элемент «ИЛИ».

Таблица истинности схемы «ИЛИ»

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Эта схема также имеет два входа и один выход. Рассмотрим её таблицу истинности (табл.6.2).

На входе возникает логическая единица, если хотя бы на одном из входов – *или на первом, или на втором* – имеется единица. Принцип работы этой схемы можно сформулировать так: «*все или хоть что-нибудь!*». Её электрический аналог – лампочка с двумя параллельно соединенными ключами (рис. 6.6). Если хотя бы один из ключей замкнут, лампочка горит. Разумеется, она горит и в том случае, если замкнуты оба ключа.

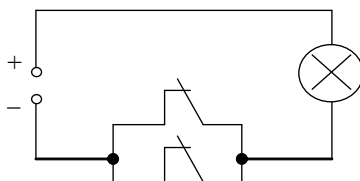


Рис. 6.6. Электрический аналог схемы «ИЛИ»

Электронная схема «ИЛИ» и её обозначение изображены на рис. 6.7. Здесь также применены два транзистора типа $n-p-n$, если хотя бы один из них открыт положительным напряжением на базе ($X_1 = 1$ или $X_2 = 1$), то выход соединен с положительным полюсом источника питания. Если же оба транзистора закрыты ($X_1 = 0$ и $X_2 = 0$), то выход Y имеет нулевой потенциал – он соединен с землей через сопротивление R .

1. Логический элемент «НЕ».

Эта схема имеет один вход и один выход. Таблица истинности её очень проста: сигнал на выходе всегда противоположен сигналу на входе (табл. 6.3).

Принцип работы этой схемы можно выразить короткой фразой: «*не так!*». Электронная схема «НЕ» содержит всего один транзистор $n-p-n$ -типа (рис. 6.8).

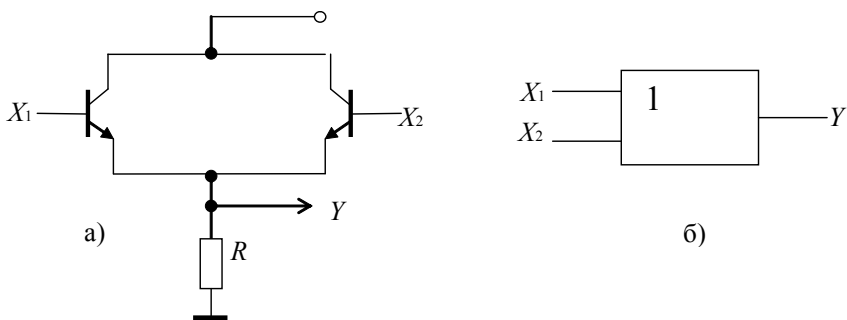


Рис. 6.7. Электронная схема «ИЛИ» (а) и её изображение на схемах (б)

Таблица 6.2

Таблица истинности схемы «НЕ»

X	Y
0	1
1	0

Если транзистор открыт положительным напряжением на базе ($X = 1$), то выход Y соединен с землей через открытый транзистор ($Y = 0$), если же он закрыт ($X = 0$), то выход соединен с положительным полюсом источника питания через сопротивление R .

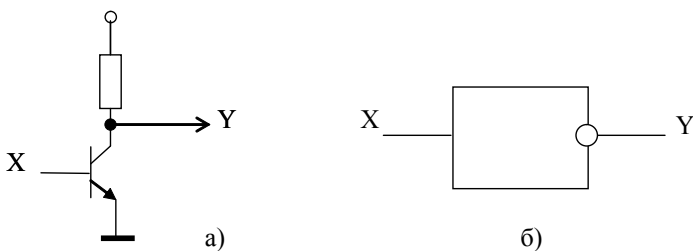


Рис. 6.8. Электронная схема «НЕ» (а) и её обозначение (б)

6.4. Логические действия и логические функции. Минимизация логических функций

Итак, мы познакомились с логическими элементами. Каждый из них выполняет определенное *логическое действие*, т.е. создает сигнал на выходе в зависимости от сигналов на входах. Действие, осуществля-

емое схемой «И», называется *конъюнкцией*, или логическим умножением. Оно выражается привычной для нас формулой:

$$Y = X_1 \cdot X_2, \quad (6.6)$$

где X_1 и X_2 - сигналы на входах.

В самом деле, рассматривая таблицу истинности для схемы «И» (табл. 6.1), можно заметить, что так оно и есть: если хотя бы один из сомножителей X_1 или X_2 равен нулю, то $Y = 0$ тоже.

Действие, осуществляемое схемой «ИЛИ», называется *дизъюнкцией*, или логическим сложением. Соответственно, его также можно выразить формулой:

$$Y = X_1 + X_2. \quad (6.7)$$

Таблица истинности (табл. 6.2) даёт возможность убедиться в этом. Правда, нам придется допустить, что $1+1=1$. Но в логической алгебре это справедливо. Это означает, что если из двух событий, каждое из которых обуславливает какое-то третье, выполняются сразу оба, то и третье событие также выполняется. Например, утверждение: «Я пойду в театр, если достану билет или меня кто-то пригласит». Ясно, что если есть и билет и приглашение, то в театр Вы попадаете.

Действие, выражаемое схемой «НЕ», называется *инверсией*, или логическим отрицанием. Его алгебраическая запись:

$$Y = \overline{X} \text{ (читается – «не икс»)}. \quad (6.8)$$

В обычной алгебре для него нет аналога.

Итак, мы видим, что существуют особые, логические действия. Из них можно составлять сложные выражения – логические функции. Их можно преобразовывать так же или почти так же, как и обычные алгебраические выражения. Рассмотрению логических выражений посвящен целый раздел математики, называемый *логической алгеброй* или *булевой алгеброй* – по имени её изобретателя Дж. Буля. Мы сейчас не будем изучать логическую алгебру. Но для нас чрезвычайно важно вот что: ведь по любому алгебраическому выражению можно сконструировать схему, содержащую малые интегральные схемы «И», «ИЛИ», «НЕ». Эта схема может быть простой или сложной в зависимости от сложности алгебраического выражения, по которому она конструируется. Значит, мы должны научиться упрощать алгебраические выражения или, как говорят, *ми-*

минимизировать их. Выпишем основные соотношения логической алгебры, на основе которых проводится минимизация логических функций:

$$\left. \begin{array}{ll} X + 0 = X & X \cdot 0 = 0 \\ X + 1 = 1 & X \cdot 1 = X \\ X + X = X & X \cdot X = X \\ X + \bar{X} = 1 & X \cdot \bar{X} = 0 \end{array} \right\} \quad (6.9)$$

Над этими выражениями надо немного подумать и тогда смысл их становится понятным. Например, последнее выражение ($X + \bar{X} = 1$) можно прочесть так: «Некое событие X произойдет, или не произойдет». Ясно, что это утверждение абсолютно правильно, т.е. сумма равна логической единице. А другое выражение: «Событие X произойдет и то же событие не произойдет» - невыполнимо, ложно, т.е. произведение равно нулю.

Поупражняемся в составлении логических выражений. Запишем, например, в виде формулы следующее утверждение: «Я пойду в театр (T), если достану билет (B), или меня кто-нибудь пригласит (Π), и если не поеду в экспедицию ($\bar{Э}$)». Здесь каждое переменное ($T, B, \Pi, \bar{Э}$) может принимать значение 1 или 0 («в театр пойду – не пойду», «билет достану – не достану» и т.д.). Тогда формула для упомянутого утверждения будет выглядеть так:

$$T = (B + \Pi) \cdot \bar{Э}. \quad (6.10)$$

Составить её было просто – достаточно лишь внимательно прочитать сказанное утверждение. Но вот пример посложнее. Предположим, нужно сконструировать электронную систему для голосования. Проект принимается большинством голосов. Пусть голосующих всего трое (X_1, X_2, X_3), каждый из них может нажать кнопку «за» ($X_i = 1$) или не нажать её, а в случае принятия проекта загорается лампочка ($Y = 1$). Из этих пожеланий логического выражения не составить. Но, исходя из них, можно составить таблицу истинности для такой схемы (табл. 6.4).

А теперь внимательно рассмотрим эту таблицу и составим сначала словесное выражение для искомой формулы:

$$\begin{aligned} &\text{«} Y = 1 \text{ в случаях, если } X_1 \neq 1 \text{ и } X_2 = 1 \text{ и } X_3 = 1, \\ &\text{или если } X_1 = 1 \text{ и } X_2 \neq 1 \text{ и } X_3 = 1, \text{ или если } X_1 = 1 \text{ и } X_2 = 1 \text{ и } \\ &X_3 \neq 1, \text{ или если } X_1 = 1 \text{ и } X_2 = 1 \text{ и } X_3 = 1 \text{»}. \end{aligned}$$

Таблица истинности схемы электронного голосования для троих голосующих

X_1	X_2	X_3	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	1	0	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	1	1

Формула у нас теперь получится такая:

$$Y = \overline{X_1} X_2 X_3 + X_1 \overline{X_2} X_3 + X_1 X_2 \overline{X_3} + X_1 X_2 X_3. \quad (6.11)$$

Для реализации схемы, составленной по этой формуле, понадобится восемь схем «И», три схемы «ИЛИ» и три схемы «НЕ». Посмотрим, нельзя ли минимизировать её. Согласно одному из соотношений (6.9), к любому слагаемому можно прибавить любое число таких же слагаемых без изменения результата. Прибавим к выражению (6.9) два слагаемых $X_1 X_2 X_3$, а затем сгруппируем их и воспользуемся ещё одним соотношением (6.9): $X + \overline{X} = 1$. Получим:

$$\begin{aligned} Y &= (\overline{X_1} X_2 X_3 + X_1 X_2 X_3) + (X_1 \overline{X_2} X_3 + X_1 X_2 X_3) + \\ &+ (X_1 X_2 \overline{X_3} + X_1 X_2 X_3) = X_2 X_3 (X_1 + \overline{X_1}) + X_1 X_3 (X_2 + \overline{X_2}) \\ &+ X_1 X_2 (X_3 + \overline{X_3}) = X_2 X_3 + X_1 X_3 + X_1 X_2 = \\ &= X_3 (X_1 + X_2) + X_1 X_2 \end{aligned} \quad (6.12)$$

Дальнейшее упрощение, видимо, невозможно. Мы пришли, как говорят, к *тупиковой форме* выражения. Для её схемной реализации необходимо лишь две схемы «И» и две схемы «ИЛИ» (рис. 6.9).

Сформулируем теперь общие принципы конструирования логических электронных схем. Пусть схема имеет K входов и i выходов. Для её конструирования необходимо следующее:

1. Составить таблицу истинности для всех функций Y_i .

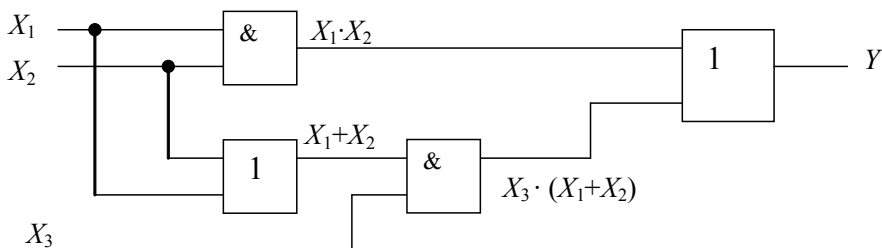


Рис. 6.9. Схема электронной системы для голосования с тремя входами

2. Составить алгебраические выражения для каждой функции Y_i . Для этого в таблице истинности выделяются строки, соответствующие $Y_i = 1$ и составляется сумма произведений всех аргументов X_k , причём если в данной строке $X_k = 0$, то его значение инвертируется.

3. Минимизировать полученное выражение, приведя к одной из типовых форм.

4. Сконструировать электронную схему.

Пользуясь этими рекомендациями, можно составить любую, сколько угодно сложную схему! Главное – правильно составить таблицу истинности. Приведём таблицу истинности для электронного преобразователя кодов, назначение которого зажечь элементы цифрового индикатора, изображенного на рис. 6.10. Такая схема должна иметь семь выходов – по числу элементов индикатора. Если на соответствующий выход подается напряжение ($Y = 1$), то элемент загорается. Очевидно, чтобы зажечь цифру «0», нужно подать напряжение на все выходы, кроме Y_4 ($Y_1 = 1, Y_2 = 1, Y_3 = 1, Y_5 = 1, Y_6 = 1, Y_7 = 1$).

Чтобы зажечь «1», нужно подать напряжение на третий и шестой выходы, и т.д.

Теперь напомним таблицу истинности для формирования выходных сигналов такого индикатора. Пусть на схему подается сигнал в двоичной системе. Для того чтобы отобразить однозначное число от 0 до 9, необходимо четыре входа (X_1, X_2, X_3, X_4). Представив себе, какие элементы индикатора должны гореть для отображения той или иной цифры, заполним табл. 6.5.

Разумеется, алгебраическое выражение, составленное по этой таблице, а следовательно, и схе-

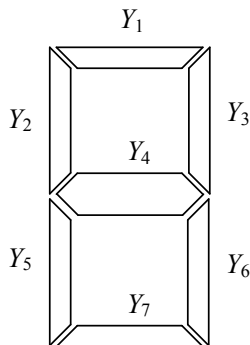


Рис. 6.10. Семизlementный цифровой индикатор

Таблица истинности электронного преобразователя кодов

Отображаемое число в десятичной системе	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7
0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
2	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
4	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
5	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1

ма, будут достаточно сложными. Но, как мы увидим далее, вовсе не нужно каждый раз составлять схему из простейших элементов. Достаточно сделать эту процедуру один раз, а в дальнейшем пользоваться стандартными схемами, выполняющими уже более сложные операции.

Теперь мы знаем, что из малых интегральных схем (МИС) можно собирать любые сложные логические схемы. На практике, однако, так почти никогда не поступают. Дело в том, что промышленность выпускает уже готовые схемы, каждая из которых выполняет определенный набор операций. В зависимости от степени интеграции, т.е. от решаемых задач, логические схемы разделяют на *средние интегральные схемы* (СИС) и *большие интегральные схемы* (БИС). Иногда выделяют ещё *сверхбольшие интегральные схемы* (СБИС). СИС обычно реализуют какую-либо одну функцию, БИС и СБИС – целый набор функций. БИС и СБИС называют еще микропроцессорами.

6.5. Средние интегральные схемы

В этом разделе мы рассмотрим некоторые СИС, необходимые для дальнейшего понимания цифровой техники.

1. Шифраторы

Представим себе, что мы вводим информацию в некоторое устройство (например, ЭВМ) с помощью клавиатуры. Но любое цифровое устрой-

во требует введения информации в виде двоичного цифрового кода, с которым мы уже знакомы. Значит, при нажатии определенной клавиши, например, с цифрой 6, необходимо, чтобы входное устройство сформировало двоичный код, соответствующий числу, изображенному на клавише (в данном случае – 110). Такое устройство называется шифратором (рис. 6.11).

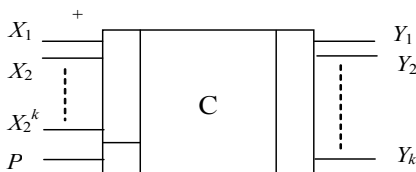


Рис. 6.11. Схемное обозначение шифратора, снабженного входом стробирования

Он имеет несколько выходов, на любой из которых может быть подана логическая единица, и несколько выходов, на которых возникает сигнал в виде параллельного двоичного кода. Очевидно, если число выходов K , то число входов 2^K . Как правило, шифратор снабжается еще одним входом (P), на который обычно подается логическая единица, если мы хотим разрешить возникновение входного сигнала. Если на вход P подается логический ноль, то сигнала на выходе не возникает, шифратор не работает. Этот вход называют входом разрешения или входом стробирования.

Шифратор, как и все СИС, конструируется на основе МИС. Методика его конструирования обычная для всех логических схем – ее мы изучали в предыдущем разделе.

2. Дешифраторы

Задача, которую выполняет дешифратор, является обратной по отношению к той, которую выполняет шифратор. Дешифратор используется в тех случаях, когда нужно подать напряжение на один из многих проводников (например, зажечь одну из многих лампочек), причём номер этого проводника определяется входным сигналом в двоичном коде. Предположим, на входы подается число 6 в двоичном коде (110) – на шестом выходе возникает логическая единица, на остальных – нули. Дешифратор имеет K входов и 2^K выходов. Он также может быть снабжен входом стробирования. Его схемное обозначение показано на рис. 6.12.

Обычно шифраторы используются во входной части цифровых устройств, а дешифраторы – выходной части. Сложность шифратора и дешифратора определяется, в основном, количеством входов и выходов, т.е. числом разрядов двоичного кода, которое может воспринять схема.

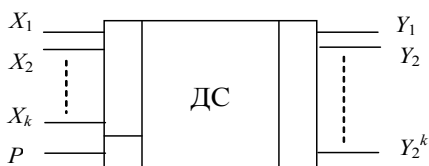


Рис. 6.12. Схемное обозначение дешифратора, снабженного входом стробирования

3. Преобразователи кодов

Эти СИС предназначены для преобразования сигнала из одного кода в другой. Например, мы имеем сигнал в двоичном коде, необходимо его преобразовать в код управления семиэлементным цифровым индикатором. Эту задачу мы уже решали (табл. 6.5). Можно сказать, что преобразователь кодов представляет собой ПЗУ: входной сигнал – это адрес ячейки, в которую записан соответствующий выходной сигнал. Совершенно очевидно, что число входов преобразователя кодов i (как и число выходов k) не является строго определенным.

Числа i и k определяются структурой выходного и выходного сигнала. Можно себе представить, например, что цифровой индикатор является более сложным, составленным из светящихся точек: 7 точек по горизонтали и 9 по вертикали для одного знака. Тогда, соответственно, преобразователь кодов будет иметь 63 выхода. Таблица истинности для него будет более сложной. Можно представить себе преобразователь сигнала из двоичного кода в десятичный (или обратно!), из двоичного в шестнадцатеричный и т.д. Мы уже знаем, что двоичный код является наиболее употребительным в цифровой технике, но не единственным. Поэтому преобразователи кодов присутствуют в каждом цифровом приборе. Схемное изображение преобразователя кодов показано на рис. 6.13. Он также может быть снабжен выходом стробирования (P).

Особо скажем о преобразователях последовательного кода в параллельный и параллельного - в последовательный. Ведь любой цифровой

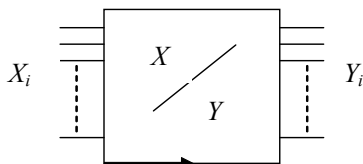


Рис. 6.13. Схемное обозначение преобразователя кодов

сигнал – комбинация нулей и единиц - может быть передан либо сразу, по многим проводам (в *параллельном* виде), либо все элементы передаются по очереди, один за другим, по одному проводу (в *последовательном* виде). Возьмём любую из рассмотренных СИС. Мы молчаливо предполагали, что входной сигнал поступает одновременно на все входы, и при этом одновременно на всех выходах возникает выходной сигнал. Значит, все эти СИС работают с параллельными кодами. А между тем сигналы передаются по линиям связи чаще всего в последовательном коде. Отсюда ясно, что должны существовать соответствующие преобразователи.

Эти преобразователи представляют собой ячейки памяти ОЗУ, в которых сохраняется один бит информации. Ячейки эти (например, триггеры) соединены так, что информация (0 или 1) может последовательно переходить из первой ячейки во вторую, затем в третью и т.д. Таким образом, все ячейки могут быть заполнены последовательно поступающими импульсами. После этого сигнал, поступивший одновременно на все ячейки, переводит всю содержащуюся в них информацию в многопроводную линию связи, т. е. преобразует сигнал в параллельный код. Обратное преобразование производится в обратном порядке: ячейки одновременно заполняются нулями и единицами с многопроводной линии связи, а затем импульсы, поступающие со специального тактового генератора на крайнюю ячейку, последовательно вытесняют всю информацию в однопроводную линию связи.

4. *Счётчики*

В цифровой технике часто встречается задача сосчитать количество импульсов, приходящих с какого-либо устройства, например, с генератора прямоугольных импульсов. Разумеется, ответ должен быть дан в цифровом коде – чаще всего в двоичном. Для этого используются счётчики.

Схема счётчика представляет собой последовательно соединенные триггеры (рис. 6.15), разделенные дифференцирующими диодно-ёмкостными цепочками. После прохождения через конденсаторы прямоугольный импульс дифференцируется - преобразуется в два мгновенных импульса (рис. 6.14, а, б). Дiodы пропускают лишь отрицательные импульсы (рис. 6.14, в).

Этот отрицательный импульс возникает в момент прохождения заднего фронта входного прямоугольного импульса. Следовательно, в этот момент на оба входа триггера поступает отрицательный импульс.

Триггер срабатывает и на его выходе (Y_1) возникает инверсное напряжение (логическая единица). Второй входной импульс также дифферен-

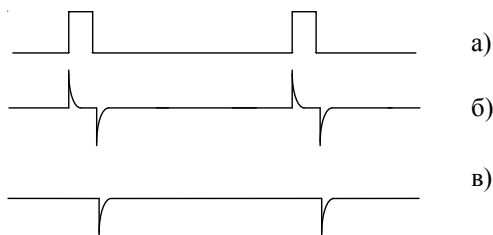


Рис. 6.14. Преобразование прямоугольных импульсов конденсаторно-диодной цепочкой

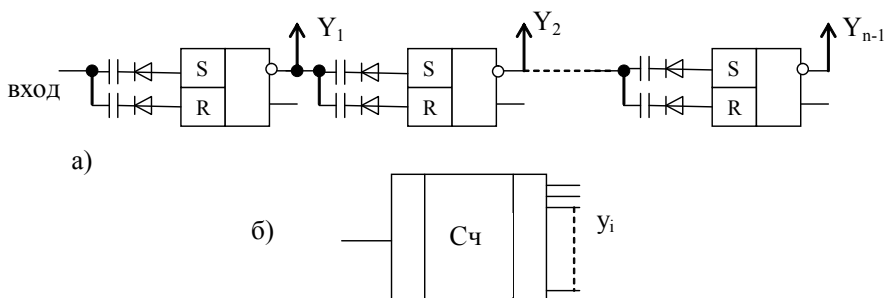


Рис. 6.15. Схема счетчика на SR-триггерах с ответом в двоичном коде (а); обозначение такого счетчика (б).

цируется и вызывает срабатывание первого триггера уже по R -входу. На выходе Y_1 напряжение резко падает (логический ноль) и это падение напряжения проходит через следующую дифференцирующую цепочку на входы второго триггера. Он срабатывает и на его выходе (Y_2) возникает логическая единица. Продолжив эти рассуждения, мы увидим, что сигналы на выходах возникают в последовательности, показанной в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Сигналы на выходе счетчика при последовательно поступающих импульсах

Номер входного импульса	Сигналы на выходах				
	Y_1	Y_2	Y_3	...	Y_n
0	0	0	0	...	0
$1 = 2^0$	1	0	0	...	0
$2 = 2^1$	0	1	0	...	0
3	1	1	0	...	0
$4 = 2^2$	0	0	1	...	0
...				...	
2^{n-1}	0	0	0	...	1

Рассмотрев эту таблицу, мы видим, что выходной сигнал — это и есть номер входного импульса, представленный в двоичном коде. Здесь Y_1 — это младший разряд, а Y_n — старший. Таким образом, «прочитав» сигнал на выходах счётчика, мы узнаем, сколько импульсов поступило на вход.

Для того чтобы стереть выходной сигнал, т.е. вернуть счётчик в состояние, необходимое для начала нового счёта, можно подать на все R -входы триггеров отрицательный импульс. На всех выходах возникает логический ноль и счётчик готов к работе. Схемное обозначение счётчика показано на рис. 6.15, б.

5. Компараторы

Компараторы предназначены для сравнения двух напряжений. Эта схема отвечает на вопрос «что больше?». Она имеет два входа и один выход (рис. 6.16). Если напряжение на первом входе больше, чем на втором ($U_1 > U_2$), то на выходе Y возникает логическая единица. Если же $U_1 < U_2$, то $Y = 0$.

Компараторы, строго говоря, не являются средними интегральными схемами. Но мы их здесь рассматриваем, так как они входят в схему аналого-цифрового преобразователя, который мы будем изучать далее. Электронная схема компаратора может быть сконструирована на одном транзисторе, на базу которого подаются два напряжения противоположной полярности. В зависимости от того, какое из напряжений больше, потенциал базы будет положительным или отрицательным относительно эмиттера. Соответственно, транзистор будет открыт или закрыт. Выходной сигнал снимается с коллектора или с эмиттера транзистора в зависимости от его типа.

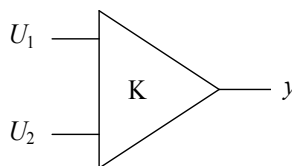


Рис. 6.16. Компаратор

6.6. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи

Теперь мы знаем, что любой сигнал можно представить в виде цифрового кода, его можно преобразовать, сохраняя содержащуюся в нём информацию. Можно направить сигнал на цифровые индикаторы и таким образом «прочитать» информацию.

Но ведь все измерительные приборы, которые мы раньше изучали, дают аналоговый сигнал, например, в виде напряжения. Значит, для того чтобы воспользоваться элементами цифровой техники, нужно преобразовать аналоговый сигнал в цифровой. Можно представить себе и обрат-

ную задачу – преобразовать цифровой сигнал в аналоговый. Для решения этих задач употребляются аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи: АЦП и ЦАП.

По причинам, которые станут ясны впоследствии, рассмотрим сначала ЦАП. Из нескольких существующих схем ЦАП мы рассмотрим только одну: схему с двоично-взвешенными сопротивлениями.

Итак, нам необходимо преобразовать цифровой сигнал в аналоговый, например, в ток. Вспомним, что цифровой сигнал определяется формулой (6.5), т.е. суммой нескольких слагаемых. Число слагаемых равно числу разрядов в двоичном коде. Самый младший разряд даёт самый малый вклад во всю сумму, а каждый следующий разряд даёт (или не даёт, в зависимости от коэффициента a_i !) вклад в два раза больше предыдущего. Значит, для того чтобы преобразовать цифровой сигнал в аналоговую форму в соответствии с формулой (6.5), нам необходимо сделать следующее:

1. Собрать схему, которая даёт возможность получить на выходах токовые сигналы, причём на каждом следующем выходе ток должен быть в два раза большим по сравнению с предыдущим.
2. Соединить с помощью ключей выходы схемы с суммирующим устройством, а ключ замыкать, если в соответствующем разряде двоичного кода стоит единица, или оставлять разомкнутым, если в разряде - нуль.

Тогда, действительно, выходной сигнал будет представлен в виде суммы токов в соответствии с формулой (6.5). Первая часть задачи решается просто. Представим себе схему (рис. 6.17), состоящую из n сопро-

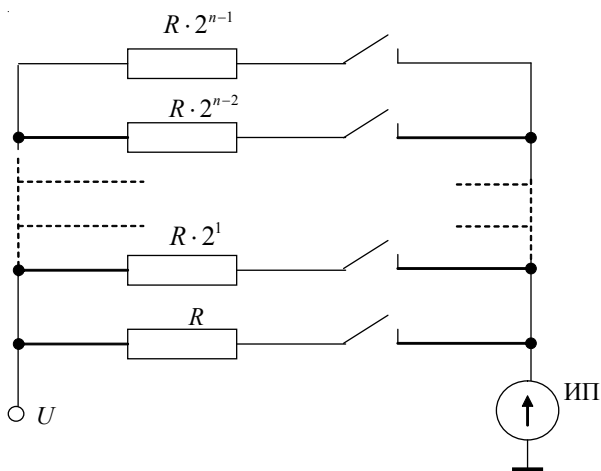


Рис. 6.17. Схема, обеспечивающая токовые сигналы на выходе

тивлений, каждое из которых в два раза меньше предыдущего. На вход U подается положительное опорное напряжение. При подключении к одному из выходов измерительный прибор (ИП) покажет ток – самый большой при подключении к Y_0 ; в два раза меньший – при подключении к Y_1 и т.д. Самый малый ток – при подключении к Y_{n-1} . Если одновременно подключить прибор к нескольким выходам, то токи будут складываться (по закону Кирхгофа), ИП покажет суммарный ток.

Теперь остается решить вторую задачу: подключать или не подключать прибор к выходам в соответствии с сигналом в соответствующем разряде. Решим эту задачу с помощью электронных ключей. Электронный ключ собирается на одном транзисторе (например, $n-p-n$ -типа), который открывается (т.е. через ключ идет ток) логической единицей – положительное напряжение на базе и закрывается логическим нулем. Схемное изображение электронного ключа показано на рис. 6.18. Ключ замкнут (вход X соединен с выходом Y), если на вход a подана логическая единица, ключ разомкнут, если на вход a подан логический нуль.

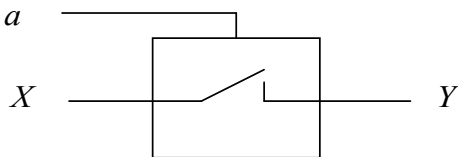


Рис. 6.18. Электронный ключ

Теперь рассмотрим всю схему ЦАП (рис. 6.19).

На вход $U_{оп.}$ подается опорное напряжение. Электронные ключи управляются входами a_i , на которые подается входной сигнал в цифровом виде – самый старший разряд a_1 , самый младший – a_{n-1} . Суммарный ток подается на усилитель. С выхода усилителя снимается сигнал $U_{вых}$ в аналоговом виде. Разумеется, при изменении входного цифрового сигнала выходной аналоговый сигнал может принимать только определенные значения, т. е. он изменяется ступенчато, с точностью до одного шага квантования.

В современных цифровых устройствах применяются ЦАП в виде микросхем, сделанных в соответствии с рис. 6.19 или по другим схемам, которые мы здесь не рассматриваем. Схемное обозначение ЦАП показано на рис. 6.19, б).

Теперь рассмотрим *аналого-цифровой преобразователь*. Как и в случае с ЦАП, мы рассмотрим лишь одну из многих схем АЦП – последо-

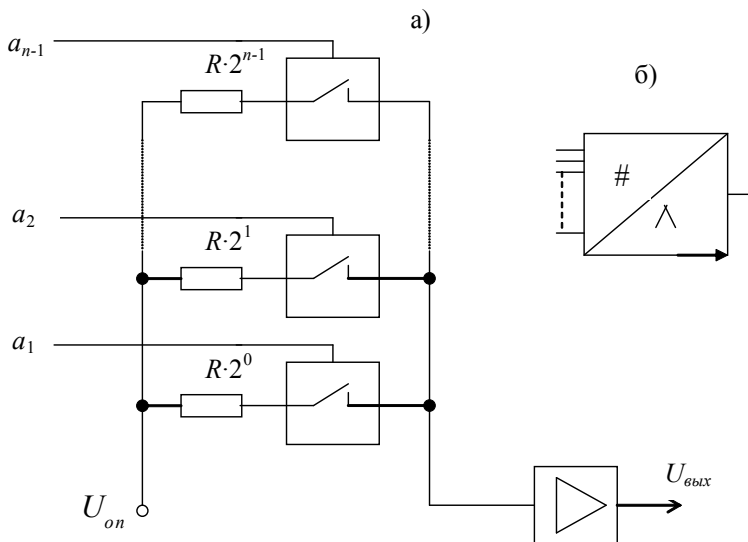


Рис. 6.19. Принципиальная схема цифроаналогового преобразователя (а) и его обозначение на схемах (б)

вательный АЦП с единичным приближением. Для того чтобы проиллюстрировать работу такой схемы, рассмотрим следующую аналогию. Пусть нам необходимо сделать автомат для взвешивания предметов на чашечных весах. На одну из чашек мы положим предмет, который нужно взвесить, а на другую – самую маленькую из имеющихся гирек, например, 1 грамм. Предположим, чашка с гирькой легче предмета. Положим ещё одну такую же гирьку, затем еще и т.д. Будем считать эти гирьки. Когда чашка с гирьками, наконец, станет тяжелее предмета, прекратим класть гирьки. Вес гирек, положенных на чашку, равен весу предмета. Допустимая погрешность не превысит веса одной гирьки.

Примерно по такой схеме и работает последовательный АЦП с единичным приближением. Роль «гирек» выполняют импульсы, источником которых является специальный тактовый генератор, счёт импульсов осуществляет счётчик, а сравнение напряжений – компаратор. В состав схемы входит ЦАП, который преобразует цифровой сигнал в аналоговый. Поэтому мы и вынуждены были сначала рассмотреть работу ЦАП.

А теперь рассмотрим всю электронную схему АЦП (рис. 6.20).

Работа схемы начинается с того, что на вход S триггера подаётся импульс запуска (например, нажатием кнопки или иным путём). Триггер переводится в такое состояние, что на его верхнем выходе возникает логи-

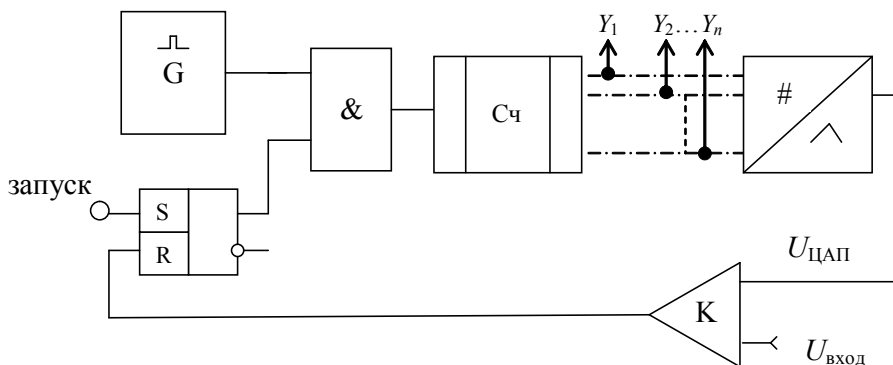


Рис. 6.20. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

ческая единица. Она подается на один из входов схемы «И».

На другой её вход поступают импульсы (т.е. логические единицы) с тактового генератора прямоугольных импульсов (G). Поскольку на нижнем входе схемы «И» единица, то эти импульсы проходят на выход схемы «И» и попадают на вход счётчика. Счётчик считает их. Значит, на его выходах будет число в двоичном коде, которое возрастает по мере поступления импульсов на вход. Это число с выхода счетчика поступает на входы ЦАП. Значит, на выходе цифроаналогового преобразователя будет напряжение, которое также будет возрастать по мере работы тактового генератора. С выхода ЦАП напряжение ($U_{\text{ЦАП}}$) подаётся на вход компаратора. На второй его вход подается напряжение $U_{\text{вход}}$, которое и нужно преобразовать в цифровой сигнал.

Если $U_{\text{ЦАП}} < U_{\text{вход}}$, то на выходе компаратора – логический ноль. Но $U_{\text{ЦАП}}$ всё время возрастает, так как с тактового генератора поступают импульсы и счётчик считает их. Как только $U_{\text{ЦАП}}$ становится больше $U_{\text{вход}}$, на выходе компаратора возникает логическая единица. Она поступает на R -вход триггера и переводит его в начальное состояние, т. е. на верхнем выходе возникает логический ноль. Так как этот ноль поступает на нижний вход схемы «И», то теперь импульсы с генератора уже не проходят сквозь схему, т.е. на её выходе тоже ноль. Счётчик прекращает свою работу и число, образовавшееся на его выходе (в двоичном коде!) перестает изменяться. Это число и является цифровым представлением входного напряжения $U_{\text{вход}}$. Разумеется, при этом допускается погрешность, но она не превышает одного шага квантования.

Как можно в этой схеме регулировать величину шага квантова-

ния? Мы этот вопрос разбирать не будем, но желающим предлагаем подумать над этим. Обозначение АЦП на схемах показано на рис. 6.21.

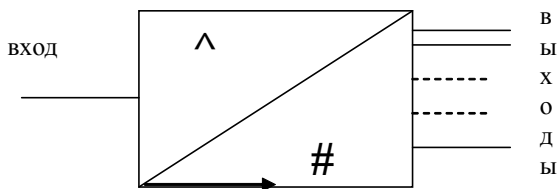


Рис. 6.21. Схемное обозначение АЦП

Совершенно очевидно, что для работы такого АЦП требуется определенное время. Существуют другие схемы АЦП, которые позволяют сократить время преобразования без ущерба для точности результата. Но в любом случае выгодно применять тактовый генератор, генерирующий импульсы с высокой частотой, тогда время преобразования сокращается. Чем же определяется верхний предел частоты импульсов?

Дело в том, что в каждой схеме, в каждом элементе схемы приходится учитывать такие понятия, как паразитная ёмкость и паразитная индуктивность. Возьмём, например, транзистор. Это устройство, содержащее *p-n*-переходы, причём ширина обеднённой зоны там очень мала, и значит, два проводника могут быть разделены непроводящим слоем. То есть это конденсатор, ёмкость которого очень мала. Если на него подавать прямоугольный импульс напряжения, то этот транзистор – конденсатор заряжается очень быстро, и при малой частоте импульсов мы можем считать, что импульсы не искажаются. Но если частота импульсов велика, а ширина импульсов мала, тогда время зарядки паразитных емкостей сравнимо с шириной импульса. Импульс искажается (рис. 6.22) и искаженный импульс может иметь меньшую амплитуду, чем исходный, так как ёмкость

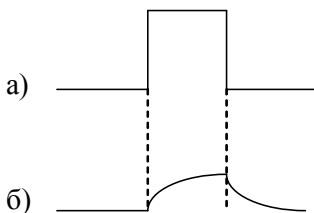


Рис. 6.22. Искажение прямоугольного импульса паразитными емкостями.

а) – исходный импульс, б) – искаженный импульс

не успевает зарядиться. В результате, схема может счесть единичный импульс логическим нулем и работа схемы будет нарушена.

Уменьшить паразитную ёмкость и индуктивность можно, сократив геометрические размеры всех элементов и всей схемы в целом. Становится теперь понятным стремление конструкторов к миниатюризации элементов. Современные микросхемы весьма миниатюрны. Например, один кристалл микропроцессора, изготовленный вакуумным напылением, имеет размеры 0,5/0,5/0,5 см и содержит несколько сотен тысяч транзисторов. Такие схемы могут обрабатывать высокочастотные сигналы и совершать сотни миллионов логических операций в секунду.

Глава 7. ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В этом разделе мы будем изучать уже конкретные приборы, которые используются для метеорологических измерений. Приборы эти имеют определённое название и выпускаются промышленностью. О некоторых приборах мы будем лишь упоминать, другие будем изучать достаточно подробно. Параллельно с этим мы продолжаем знакомство с методами, используемыми в метеорологических измерениях и их технической реализацией.

7.1. Измерение высоты нижней границы облачности

Для измерения высоты нижней границы облаков (НГО) используются следующие способы:

- визуальный способ;
- определение высоты НГО с помощью шаров-пилотов;
- триангуляционный метод;
- светолокационный способ.

Первые два метода находятся за пределами данного курса.

Триангуляционный метод употребляется в ночное время. Его идея заключается в следующем. Мощный прожектор (1) (рис. 7.1) направляется вертикально и на облаке появляется световое пятно (2). Угломерное устройство в точке (3) на расстоянии L от прожектора определяет угол α , под которым наблюдается световое пятно. Высота облака рассчитывается по очевидной формуле:

$$H = L \operatorname{tg} \alpha \pm \Delta h, \quad (7.1)$$

где Δh - разность высот точек (1) и (3), рис. 7.1.

Сейчас этот метод практически не применяется, так как его невозможно применять в светлое время суток, и он требует протяженной базы измерений L .

Светолокационный метод основан на измерении времени прохождения импульсом света расстояния до облака и обратно. Разумеется, это время (τ) очень мало. Например, для высоты НГО $H=1500$ м оно составляет:

$$\tau = \frac{2H}{C} = \frac{3000}{3 \cdot 10^8} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ с}. \quad (7.2)$$

где C - скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

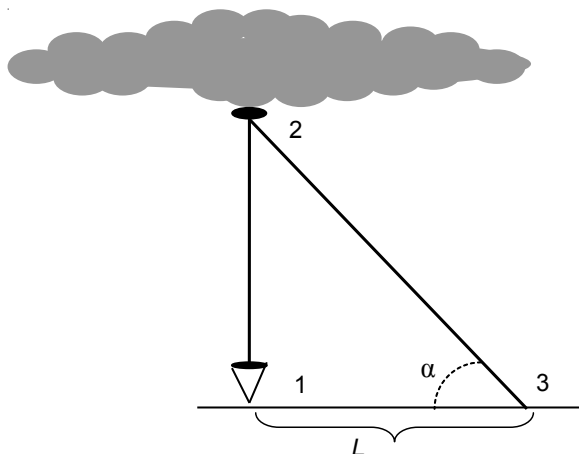


Рис. 7.1. К пояснению триангуляционного метода

Такое малое время можно измерить с помощью электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) (Приложение 5). В момент вспышки импульсной лампы (т.е. в момент начала движения к облаку светового импульса) на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ подается *импульс развертки* (рис.7.2, а). Электронный луч начинает движение по экрану ЭЛТ слева направо. В момент τ_2 , когда отраженный облаком пучок света будет воспринят приёмником, на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ подается импульс напряжения. В результате на экране ЭЛТ возникает характерный всплеск (рис.7.2, б). Расстояние от точки начала движения до всплеска на экране однозначно связано с высотой облака. Будем называть этот всплеск *облачным им-*

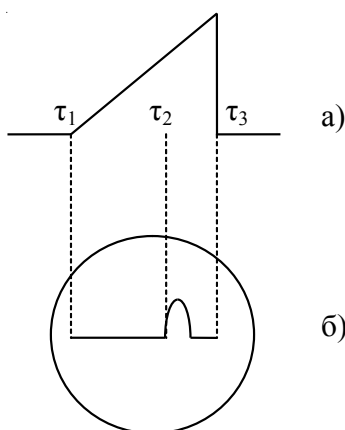


Рис. 7.2. Импульс развертки (а) и картина, возникающая на экране ЭЛТ (б)

пульсом. Чем выше нижняя граница облака, тем правее на экране располагается облачный импульс.

Светолокационный метод используется в отечественных установках РВО-1, РВО-2 и РВО-2М, ИВО-1 и ИВО-1М. В некоторых светолокаторах применяется лазерный источник света (установки ЛИВО и ЛИНГО, применяемые в военном деле).

Светолокационная установка ИВО-1м

Измеритель высоты облачности ИВО-1М основан на светолокационном методе. Схема ИВО-1М очень сходна со схемой регистратора высоты облаков РВО-2М. Рассмотрим блок-схему ИВО-1М (рис.7.3).

В *передатчике* находится импульсная газоразрядная лампа, которая располагается в фокусе вогнутого зеркала. Зеркало подвешено на подвесе Кардана. Лампа поджигается по сигналам с пульта управления.

Частота вспышек импульсной лампы около 20 Гц. Большая частота ведёт к преждевременному износу лампы, а меньшая создает неприятный для глаз эффект “мерцаний” на экране ЭЛТ (Приложение 5). В момент вспышки лампы в передатчике формируется *импульс запуска* - короткий (0,5 мкс) импульс напряжения. Он передается по кабелю в пульт управления и запускает *генератор развертки*, который генерирует пилообразный импульс развертки. Импульс развертки подается на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ, которые на рис. 7.3 для наглядности показаны рядом с экраном. Длительность импульса развертки такова, что за время его прохождения должен прийти отраженный световой сигнал от облаков высотой до 2 км. Значит, длительность импульса развертки может быть рассчитана по формуле (7.2), которая при подстановке $H = 2$ км даёт $\tau_{\text{и}} = 13,3$ мкс.

Приёмник располагается на метеоплощадке, на расстоянии 5-10 м от передатчика (рис. 7.4). В приёмнике находится фотоумножитель, который располагается в фокусе вогнутого зеркала. Зеркало также подвешено на подвесе Кардана, что обеспечивает вертикальное направление его оптической оси. Фотоумножитель преобразует отраженный от облака световой сигнал в электрический импульс. Однако этот импульс очень слаб. Перед трансляцией по кабелю импульс усиливается *фотоусилителем*, а затем подаётся в пульт управления. После вторичного усиления видеусилителем, находящимся в пульте управления, импульс поступает на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Они также показаны на рис. 7.3 рядом с экраном.

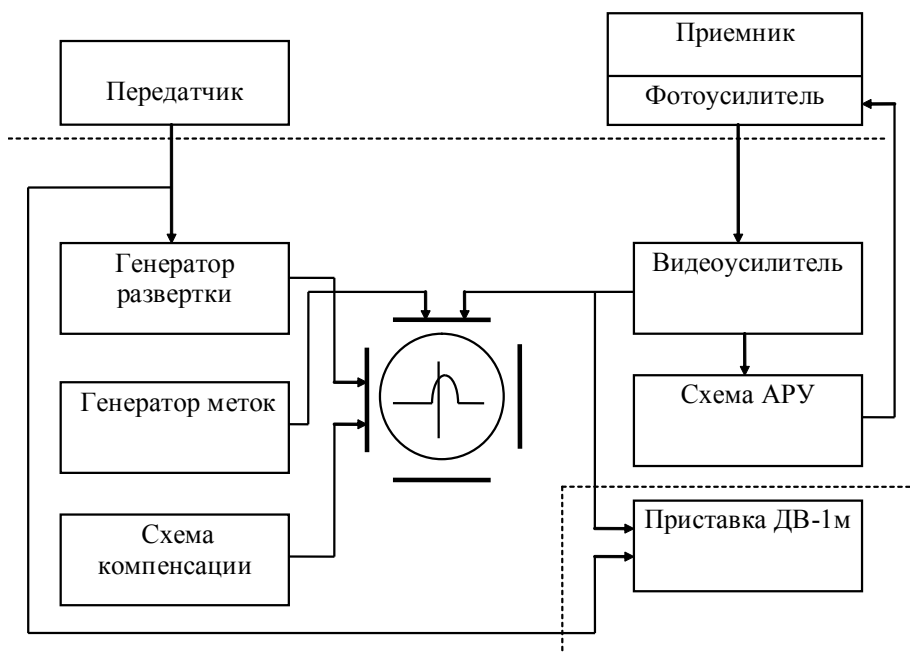


Рис. 7.3. Блок-схема ИВО-1М

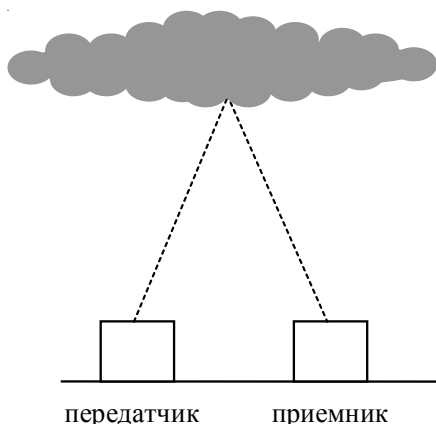


Рис. 7.4. Схема прохождения светового луча в установке ИВО-1М

На экране возникает всплеск - облачный импульс. Затем оператор вращает ручку схемы компенсации - потенциометра. Эта схема подаёт на горизонтально отклоняющие пластины постоянное напряжение. Вся картина на экране сдвигается влево. Вращением ручки можно менять напря-

жение, перемещая картину на экране влево или вправо. Задача оператора - подобрать такое положение ручки, чтобы середина переднего фронта облачного импульса находилась в центре экрана, отмеченным вертикальной чертой. Ясно, что если облачность высокая и облачный импульс до регулировки находится далеко слева, то оператору придётся повернуть ручку на большой угол, чтобы переместить импульс в центр. Таким образом, каждому положению ручки может быть поставлена определенная высота облака. Шкала высот находится рядом с ручкой.

Амплитуда облачного импульса зависит от высоты и плотности облаков. Удобнее, однако, работать с импульсами одинаковой амплитуды. Это обеспечивается *схемой АРУ* - автоматическим регулятором усиления. В зависимости от амплитуды импульсов схема регулирует коэффициент усиления фотоусилителя, обеспечивая одинаковую амплитуду импульсов.

Если зондирование ведётся во время дождя, то наблюдается сильный ложный импульс за счет отражения света от капель дождя. Он располагается впереди облачного импульса. Схема АРУ срабатывает именно на ложный импульс. Поэтому во время дождя АРУ выключается и оператор вручную подбирает режим усиления.

Для калибровки прибора включен *генератор меток*. Это генератор импульсов, период следования которых соответствует стометровому промежутку по высоте. Оператор при калибровке проверяет это, включая генератор и перемещая возникшие на экране импульсы один за другим в центр экрана. Если 100-метровый интервал не соблюдается или калибровка не соответствует заводской, то корректируют параметры импульса развёртки специальными резисторами на боковой панели прибора.

Прибор обеспечивает зондирование облаков, находящихся только в зените. Если наблюдатель располагается далеко (до 10 км) от точки, над которой измеряется высота облаков, то используют приставку ДВ-1м. С её помощью временной промежуток между импульсами запуска и отражённым импульсом преобразуется в напряжение. Это напряжение транслируется по кабелю к наблюдателю, где может быть измерено стрелочным или цифровым прибором.

7.2. Измерение содержания озона в атмосфере

Озон является одним из важнейших атмосферных газов благодаря свойству поглощать жесткую ультрафиолетовую радиацию (УФР) в диапазоне

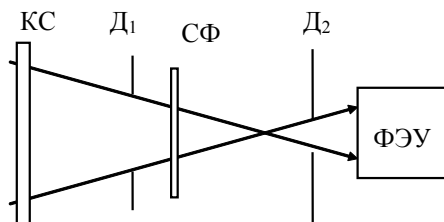


Рис. 7.5. Оптическая схема озонметра

220-330 нм. Губительное влияние УФР и возможность разрушения озонного слоя обуславливают необходимость тщательных измерений его содержания.

Озон располагается на высоте 20-55 км. Его количество таково, что будучи приведенной к приземным условиям (температура 0°C , давление 760 мм рт. ст.), толщина озонного слоя составила бы 0,3 – 0,6 см. Эта величина - толщина *приведенного слоя озона* является единицей измерения его количества. Количество озона измеряется единицами Добсона (Дн). 1 Дн = 0,001 см. Нормальное содержание озона - около 300 Дн.

Дистанционный озонметр, сконструированный Гуциным, использует свойство озона поглощать УФР. В озонметре Гуцина измеряется интенсивность УФР от внеземного источника в полосе поглощения озона. В качестве источника света используется Солнце, в пасмурную погоду озонметр направляют в зенит.

Рассмотрим оптическую схему озонметра (рис. 7.5).

Озонметр направляется на Солнце. Диафрагмы D_1 и D_2 вырезают соответствующий телесный угол. Кварцевое стекло (КС) предохраняет прибор от пыли и влаги, светофильтр (СФ) пропускает УФР в полосе поглощения озона, а фотоумножитель (ФЭУ) преобразует УФР в электрический сигнал. Для того чтобы избежать влияния поглощения УФР аэрозолями, используются два светофильтра, пропускающие УФР на длинах волн $\lambda_1=300$ нм (в середине полосы поглощения) и $\lambda_2=326$ нм (на краю полосы). Измеряются два значения УФР - J_1 , на длине волны λ_1 (ослабляется озоном и аэрозолем) и J_2 , на длине волны λ_2 (ослабляется, в основном, аэрозолем). Отношение J_1/J_2 зависит только от содержания озона. Однако следует преодолеть две трудности.

1. Отношение J_1/J_2 зависит от температуры светофильтров, так как температура влияет на их поглощательные свойства. Это учитывается коэффициентом k_t , который даётся специальной таблицей, а температуру t измеряют отдельно.

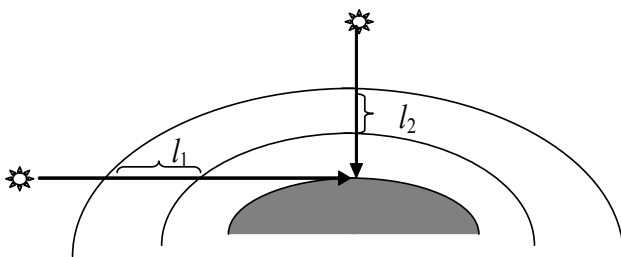


Рис. 7.6. Прохождение солнечных лучей через озоносферу

2. Отношение J_1/J_2 зависит от зенитного угла Солнца. При малых зенитных углах солнечный луч проходит больший путь в озоносфере, чем при больших (близких к 90°), рис. 7.6. Видно, что $l_1 > l_2$.

Чтобы избежать влияния зенитного угла Солнца (θ), пользуются специальной номограммой (рис. 7.7) где нанесены изолинии содержания озона. По измеренным значениям J_1 ; J_2 ; t , рассчитывают величину $(J_1/J_2) \cdot k_t$, находят точку на номограмме, определяя содержание озона по изолиниям.

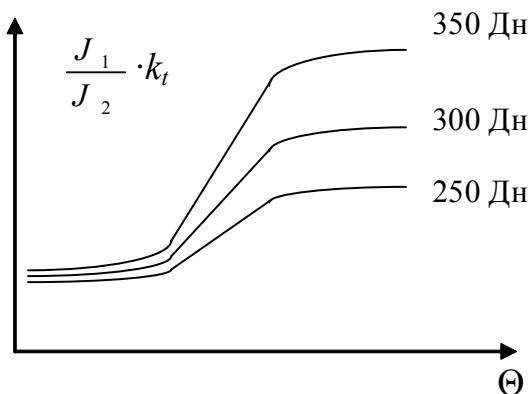


Рис. 7.7. Номограмма для определения содержания озона в атмосфере

7.3. Измерение метеорологической дальности видимости. Понятие контраста. Уравнение Кошмидера.

Понятие “метеорологическая дальность видимости” (МДВ) тесно связано с такими понятиями, как видимый контраст, пороговая контрастная чувствительность глаза. Поэтому, прежде чем излагать способы измерения МДВ, введем ряд определений и установим связь между определёнными величинами.

Предположим, что некий объект с видимой яркостью J_o наблюдается на однородном фоне, имеющем яркость J_ϕ . Тогда понятие контраста (K) определяется из уравнения:

$$K = \frac{J_\phi - J_o}{J_\phi}. \quad (7.3)$$

Совершенно очевидно, что если яркость фона больше яркости объекта, то $0 < K < 1$. Действительно, при $J_o = 0$ (чёрный объект) $K = 1$, а если $J_\phi = J_o$, то $K = 0$. В последнем случае объект неотличим от фона. При малом контрасте объект тоже трудно отличить от фона. Минимальный контраст, при котором объект можно различить, называется *порогом контрастной чувствительности глаза* ε . Обычно $0,02 < \varepsilon < 0,05$.

Метеорологическая дальность видимости (МДВ) - это такое расстояние, на котором чёрный предмет с угловыми размерами 20' становится неразличимым (т.е. видимый контраст $K = \varepsilon$) на фоне неба.

Для того чтобы связать введенные понятия, напомним уравнение Бугера-Ламберта:

$$J = J_o e^{-kl}, \quad (7.4)$$

где J - видимая яркость объекта;

J_o - яркость объекта;

l - расстояние до объекта;

k - показатель ослабления.

Если рассматривается чёрный объект в мутной атмосфере, то его видимая яркость J_{OB} определяется яркостью дымки, находящейся между объектом и наблюдателем:

$$J_{OB} = J_\infty (1 - e^{-kl}). \quad (7.5)$$

где J_∞ - яркость фона (дымки).

Тогда перепишем уравнение контраста:

$$K = \frac{J_\infty - J_\infty (1 - e^{-kl})}{J_\infty} = e^{-kl} \quad (7.6)$$

На расстоянии МДВ = L видимый контраст равен ε :

$$\varepsilon = e^{-kL} \quad (7.7)$$

Отсюда выразим метеорологическую дальность видимости L :

$$L = -\frac{1}{k} \ln \varepsilon. \quad (7.8)$$

Выведенное уравнение (7.8) носит название уравнения Кошмидера. Оно связывает значение МДВ с показателем ослабления k при заданном значении порога контрастной чувствительности ε . Обычно все приборы для измерения МДВ калибруются с учётом уравнения Кошмидера, причём при калибровке задается значение ε , которое вписывается в паспорт прибора.

Для измерения МДВ применяются три группы методов.

1. Визуальные методы.
2. Инструментально-визуальные методы.
3. Инструментальные методы.

Визуальный метод измерения метеорологической дальности видимости в дневное время суток заключается в следующем. Величина МДВ определяется по наиболее далекому видимому и по наиболее близкому невидимому объектам. Объект будет считаться невидимым, если он полностью сливается с фоном. Для проведения измерений на метеоплощадке устанавливают девять щитов (возможно использование естественных объектов) на определенном расстоянии от наблюдателя (рис. 7.8). Наблюдатель оценивает, какие объекты видимы, а какие не видимы и по специальным таблицам определяет балл МДВ.

Щиты или естественные объекты, используемые при определении МДВ визуальным методом должны отвечать следующим требованиям:

1. Быть наиболее темными, лучше черными.
2. Иметь четкие контуры и угловые размеры не менее $15'$.
3. Не возвышаться над пунктом наблюдения более чем на $5-6^\circ$.
4. Сторона, обращенная к наблюдателю должна быть наклонена вниз под углом 45° .

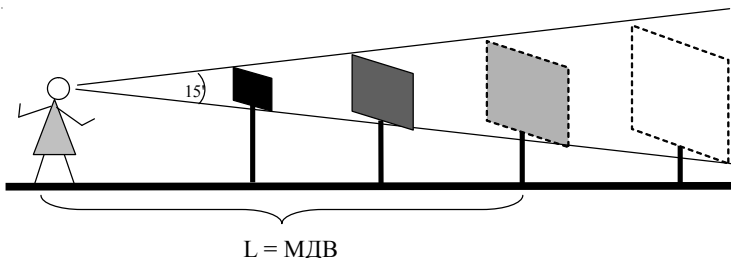


Рис. 7.8. Система щитов для определения МДВ визуальным методом

В ночное время суток для определения МДВ визуальным методом используются огни - одиночные не цветные источники света, установленные открыто (уличные фонари, осветительные лампы).

Определение дальности видимости визуальным методом является сложной задачей, так как её оценка зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- психофизические свойства зрения;
- геометрические и фотометрические характеристики наблюдаемого объекта и условия его освещенности или светимости;
- оптические свойства слоя воздуха, расположенного между наблюдателем и объектом.

Визуальный метод является наименее точным.

Инструментально-визуальный метод включают в себя человеческий глаз как составную часть инструмента, необходимого для определения МДВ. К ним относятся поляризационный измеритель дальности видимости М-53, измеритель дальности видимости ИДВ, сконструированный В.А. Гавриловым, и нефелометрическая установка М-71, применяемая в ночное время суток. В настоящее время установка М-71 снята с производства и не применяется, поскольку точность измерения весьма низкая. Прибор М-53 иногда применяется и по сей день, его устройство простое, он не требует электропитания и специальной установки.

Инструментальный метод измерения МДВ включают в себя большую группу приборов. Прежде всего, это приборы, основанные на измерении МДВ в проходящем свете. Их называют *трансмиссометрами*. Идея трансмиссометров заключается в том, что свет распространяется от специального источника (например, электрической лампочки) в атмосферу, затем отражается от отражателя, установленного на определенном фиксированном расстоянии – обычно оно составляет около 100 м. Отраженный свет воспринимается приёмником. Далее измеряется яркость ослабленного мутной атмосферой пучка света. Чем меньше МДВ, тем меньше яркость.

К трансмиссометрам относятся выпускавшийся ранее прибор РДВ (регистратор дальности видимости), импульсные фотометры ФИ-1, ФИ-2, ФИ-3.

Далее упомянем о приборах, измеряющих МДВ *в отраженном и рассеянном свете*. Их идея заключается в том, что измеряется световой пучок, рассеянный аэрозолями, содержащимися в мутной атмосфере. Одним из первых таких приборов была нефелометрическая установка М-71 (см. выше). Её основу составляла мощная лампа, направлявшая пучок

света в атмосферу, причём направление распространения света выбиралось так, чтобы на пути светового пучка не было бы никаких предметов. Таким образом, обратный пучок мог быть сформирован только аэрозолями, рассеивающим пучок света от лампы. Этот обратный пучок сравнивался с опорным пучком, источником которого являлась та же лампа, но в атмосферу опорный пучок не выходил, он отражался от внутренних стенок специальной коробки. Сравнение производилось на глаз, с помощью поляризатора М-53, почему этот прибор относится к инструментально-визуальной группе.

В дальнейшем появились приборы, измеряющие МДВ в рассеянном под углом световом пучке. Примерная оптическая схема такого прибора показана на рис. 7.9.

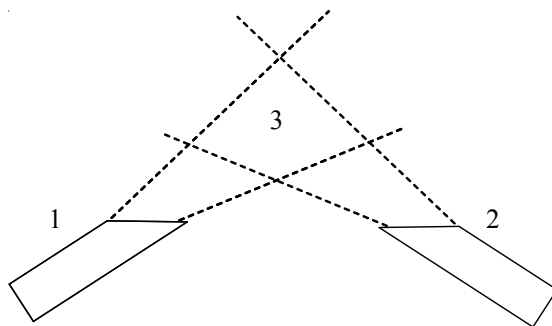


Рис. 7.9. Оптическая схема прибора, измеряющего МДВ в отраженном свете под углом

Световой пучок от источника (1) распространяется в атмосферу, на некотором расстоянии от него (порядка одного метра) находится приёмник света (2), воспринимающий свет из некоторой области, показанной штриховыми линиями. Отраженный пучок, попадающий на светоприёмник, формируется в области (3) пересечения сектора распространения света и поля зрения приёмника. Объём этой области невелик, поэтому можно сказать, что такие приборы измеряют МДВ «в точке». Это необходимо, например, на аэродроме с длинной взлетно-посадочной полосой. МДВ в разных областях аэродрома может быть различной.

7.4. Поляризационный измеритель дальности видимости М-53а

Пусть чёрный объект, находящийся в 5 – 10 м от наблюдателя (рис. 7.10), проектируется на далекий фон (лес, темный берег и т.п.). При хо-



Рис. 7.10. Подготовка пункта наблюдения МДВ с помощью поляризационного измерителя дальности видимости М-53а

рошей прозрачности атмосферы контраст объекта и фона значительный. При замутненной атмосфере контраст ухудшается, а в достаточно плотном тумане может быть менее пороговой чувствительности глаза.

Теперь представим себе, что у нас имеется прибор, который даёт возможность изменять видимый контраст, например, с помощью поворота какой-либо ручки. Тогда, посмотрев в окуляр такого прибора, будем поворачивать ручку до тех пор, пока видимый контраст между чёрным объектом и фоном не станет равным порогу контрастной чувствительности глаза ε . Очевидно, что, если истинный контраст был значительным (т.е. при высокой МДВ) ручку придется повернуть на достаточно большой угол, а при малом контрасте (при низкой МДВ) – на малый. Таким образом, угол поворота ручки может служить мерой МДВ.

Рассмотрим теперь механизм изменения видимого контраста. Прежде чем рассматривать устройство этого прибора, напомним, что поляризованный свет предполагает ориентирование векторов E (напряжённости электрической части электромагнитного поля) в одном направлении. Глаз человека, чувствительный только к величине вектора E (но не к направлению!) не может отличить поляризованный свет от неполяризованного. Как известно, поляризатор, например, призма Николя ориентирует проходящий пучок в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Эти два пучка носят условные названия: обыкновенный и необыкновенный. Направление поляризации зависит от положения поляризатора.

Если же за первым поляризатором поместить на пути любого из пучков второй поляризатор, то амплитуда вектора E изменится (рис. 7.11). Теперь наблюдатель воспринимает только проекцию вектора E на направление второго поляризатора. Яркость пучка будет зависеть от взаимной ориентации поляризаторов. Если ориентация их совпадает, яркость пучка не изменится. Вращением одного из поляризаторов можно изменять яркость вплоть до полного “гашения” при взаимно перпендикулярной ориентации осей поляризаторов.

Теперь рассмотрим оптическую схему прибора М-53а (рис. 7.12). Главной его частью являются два поляризатора: неподвижный (2) и подвиж-

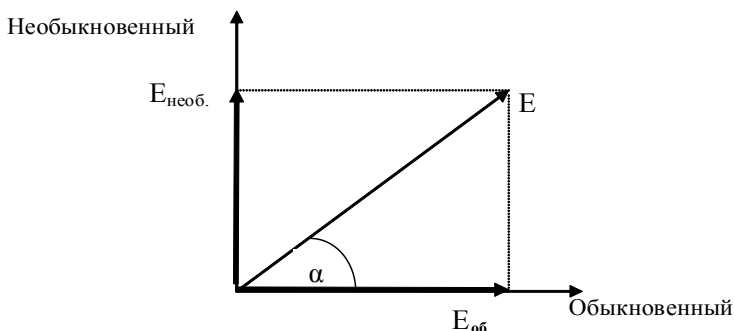


Рис. 7.11. Разложение векторов напряженности E при последовательном прохождении двух поляризаторов

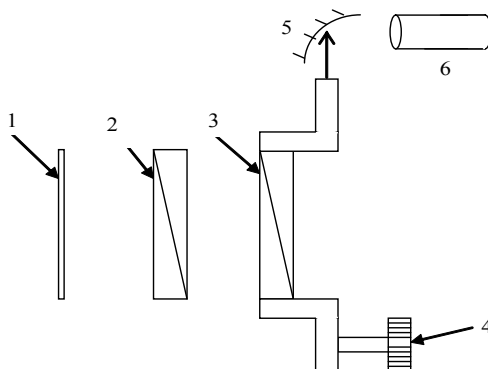


Рис. 7.12. Оптическая схема М-53а

ный (3). Стекло (1) предохраняет прибор от пыли и влаги. Перед наблюдением чёрный объект (коробка) устанавливается на расстоянии 5 - 10 м от точки наблюдения так, чтобы он проектировался бы на удаленном фоне (рис. 7.10). Наблюдатель выбирает изображения фона и коробки, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях, например, “необыкновенный” луч от фона (H_{ϕ}) и “обыкновенный” луч от коробки ($O_{\text{кор}}$).

Поскольку изначально луч уже поляризован первым поляризатором, то вращением второго поляризатора с помощью ручки (4) можно добиться одинаковой яркости H_{ϕ} и $O_{\text{кор}}$, т.е. нулевого контраста (рис. 7.13). Очевидно, при замутненной атмосфере, когда видимый контраст сам по себе мал, для этого потребуется повернуть ручку (4) на небольшой угол и отсчёт по шкале (5) будет невелик. Далее величина МДВ рассчитывается по известным величинам расстояния до фона и его отражающей способности, кото-

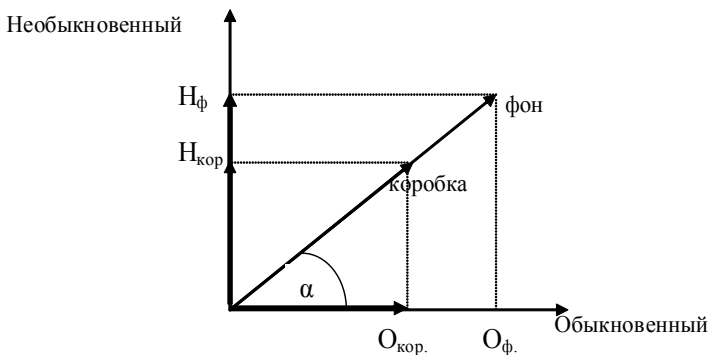


Рис. 7.13. Пояснение работы прибора М-53а

рые даются в специальных таблицах. Этот метод можно использовать только в дневное время. Точность измерения МДВ с его помощью достаточно низкая, так как, во-первых, величина отсчёта зависит от остроты зрения наблюдателя, во-вторых, отражающая способность фона меняется в течение суток, она зависит от освещённости, от погоды и пр. Тем не менее, прибор М-53а используется, поскольку является достаточно дешевым и не требует сложного обслуживания.

7.5. Регистратор дальности видимости РДВ-3

Регистратор дальности видимости РДВ-3 предназначен для измерения МДВ в любое время суток в пределах от 200 до 6000 м. Он состоит из двух блоков: фотометрического блока и отражателя, который устанавливается в 100 м от фотометрического блока. Фотометрический блок включает в себя источник света (обычная лампа накаливания), свет от которой направляется к отражателю. Отражённый пучок света несет информацию об МДВ. Как уже было сказано, такие приборы получили название *трансмиссометров*.

Принцип действия трансмиссометра РДВ-3 следующий. В фотометрическом блоке формируются два пучка света от одного источника. Один из них, который проходит 100-метровое расстояние до отражателя и обратно, назовем *зондирующим пучком*. Другой пучок проходит только через оптические элементы внутри прибора и регулируется измерительной диафрагмой. Он называется *опорным пучком*. Опорный пучок автоматически регулируется диафрагмой так, чтобы его яркость была бы равна яркости зондирующего пучка. Следовательно, если диафрагма мала, то

яркость опорного пучка также мала, а поскольку она всегда равна яркости зондирующего пучка, то зондирующий пучок также мал. Следовательно, метеорологическая дальность видимости также мала. Рассуждая так, мы видим, что величина диафрагмы определяется дальностью видимости. Диафрагма соединена со шкалой, которая показывает значение МДВ.

Рассмотрим, как работает эта автоматическая система. Для этого прежде всего рассмотрим оптическую схему прибора, изображенную на рис. 7.14. Пучок света от лампы Л преобразуется объективом O_1 в параллельный. Полупрозрачная пластина Пл делит пучок на два: зондирующий и опорный. Зондирующий пучок проходит через объектив O_2 , который фокусирует его в нижней части диска-модулятора ДМ, показанного на рисунке в профиль. Диск-модулятор имеет форму, показанную на рис. 7.15. Он вращается мотором М. Зондирующий пучок проходит через нижнюю часть диска-модулятора, опорный пучок - через верхнюю часть.

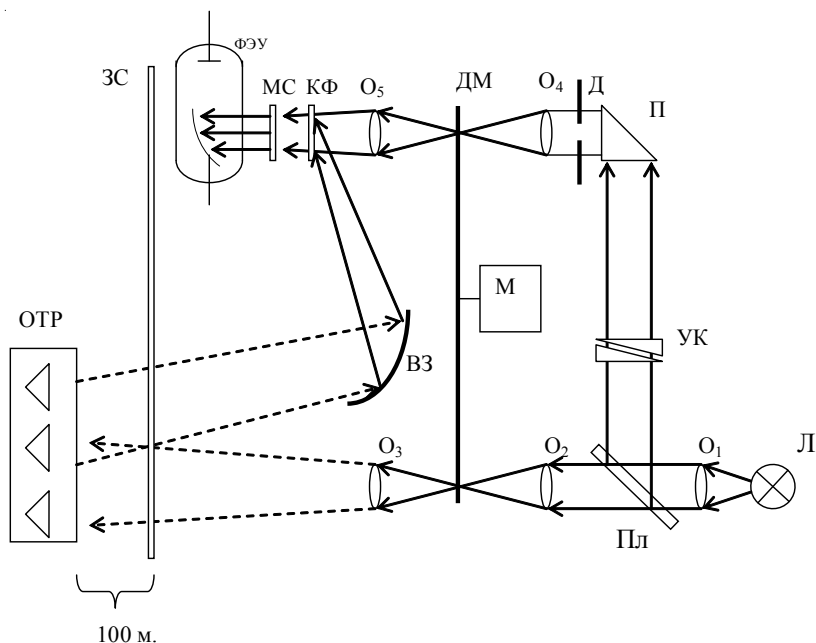


Рис. 7.14. Оптическая схема РДВ-3

Устройство диска-модулятора таково, что когда зондирующий пучок прерывается мелкими зубцами диска, опорный пучок вообще не проходит, так как его не пропускает большой зубец. И, наоборот, когда опорный пучок прерывается, зондирующий не проходит. Таким образом, зондирующий

и опорный пучки проходят по очереди с частотой 150 Гц.

То обстоятельство, что в РДВ-3 применяются модулированные (прерывистые) пучки света с частотой модуляции 1800 Гц, позволяют выделить полезный сигнал на фоне помех, например, дневного света. Помехи также воспринимаются фотоумножителем, но резонансный усилитель сигнала пропускает только сигнал с частотой 1800 Гц. Поэтому прибором РДВ-3 можно пользоваться как в ночное время, так и днем.

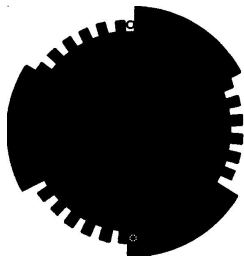


Рис. 7.15.

После прохождения диска-модулятора зондирующий пучок проходит через объектив O_3 и превращается в слаборасходящийся (рис. 7.14). Через защитное стекло ЗС он выходит в атмосферу и отражается от отражателя ОТР. Возвращаясь в фотометрический блок, зондирующий пучок фокусируется вогнутым зеркалом ВЗ на катод фотоумножителя ФЭУ.

Опорный пучок проходит через установочные оптические клинья УК. Яркость опорного пучка может изменяться с помощью этих клиньев, что необходимо для регулировки прибора. Затем призма П поворачивает опорный пучок под углом 90° , после чего он проходит через измерительную диафрагму Д. Диафрагма управляется реверсивным двигателем через редуктор. Затем опорный пучок проходит через верхнюю часть диска-модулятора и направляется на ФЭУ. Как опорный, так и зондирующий пучки проходят через корректирующий фильтр КФ и молочное стекло МС. Корректирующий фильтр пропускает только видимые лучи, выравнивая спектральный состав света со спектральной чувствительностью глаза. Молочное стекло рассеивает свет по всей поверхности фотокатода. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) преобразует световой сигнал в электрический (глава 1, раздел 1.10).

Для того чтобы понять прохождение электрического сигнала, воспользуемся блок-схемой, изображенной на рис. 7.16. Чтобы представить себе преобразования сигнала отдельными блоками схемы, будем рисовать эпюры напряжений сигнала в точках схемы, обозначенных буквами *a*, *b*, *c* и *d* (рис. 7.16). Оптический сигнал приходящий на фотоумножитель, имеет вид, показанный на рис. 7.17, *a*. Представим себе, что зондирующий пучок больше опорного например, в результате рассеивания тумана. Докажем, что это вызовет изменение диафрагмы и выравнивание пучков. Фотоумножитель преобразует сигнал в электрический. Затем он усиливается

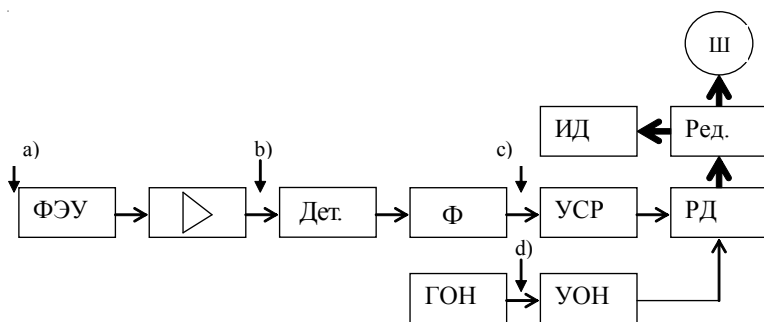


Рис. 7.16. Блок-схема РДВ-3

резонансным усилителем и принимает вид, представленный на рис. 7.17, *b*. Такая форма сигнала обуславливается особенностями электрической схемы усилителя. Этот сигнал детектируется детектором Д и проходит через фильтр Ф. Фильтр преобразует сигнал к синусоидальной форме (рис. 7.17, *c*). Разумеется, этот синусоидальный сигнал существует только тогда, когда зондирующий и опорный пучки не равны. Поэтому он называется *сигналом разбаланса*. Он усиливается усилителем сигнала разбаланса (УСР) и поступает на обмотку реверсивного двигателя РД. На вторую обмотку РД подается опорный сигнал, генерируемый специальным генератором опорного напряжения ГОН (рис. 7.17, *d*) и усиленный усилителем опорного напряжения УОН.

Сигнал разбаланса и опорное напряжение сдвинуты по фазе на 90° . Частоты их равны. Оба сигнала поступают на РД. Двигатель РД начинает вращаться и через редуктор (Ред.) двигает измерительную диафрагму ИД. Если яркость опорного пучка меньше зондирующего пучка, то диафрагма будет открываться. Это вызовет увеличение яркости опорного пучка и скоро пучки будут выровнены. Сигнал разбаланса обратится в нуль и двигатель остановится.

С другой стороны, двигатель вращает шкалу Ш, которая также останавливается при выравнивании пучков. Следовательно, каждому положению шкалы соответствует определенная амплитуда пучков, т.е. определённая дальность видимости.

Если изменение погоды таково, что опорный пучок больше зондирующего, то сигнал разбаланса изменит фазу на 180° . Тогда фазовый сдвиг между сигналом разбаланса и опорным напряжением составит 90° и РД будет вращаться в другую сторону, закрывая диафрагму ИД. Это также приведёт к выравниванию пучков.

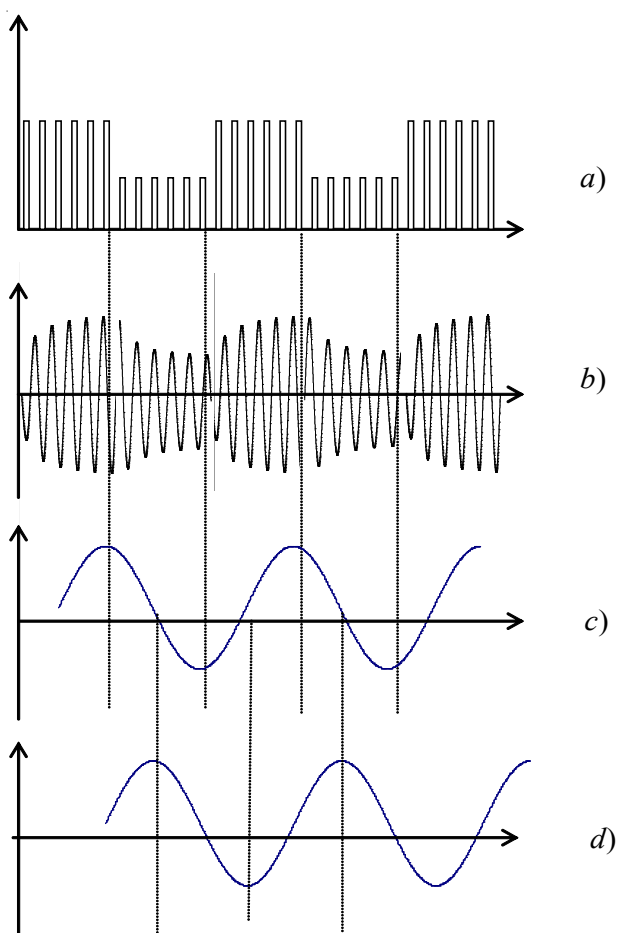


Рис. 7.17. Эпюры напряжения

Мы видим, что в приборе РДВ-3 применён уже знакомый нам принцип следящей системы с отрицательной обратной связью. Действительно, при появлении сигнала разбаланса отрицательная обратная связь его уничтожает.

Для коррекции показаний РДВ-3 применяются установочные клинья УК. С их помощью можно вручную изменить яркость опорного пучка и ввести сигнал разбаланса. Это вызовет вращение РД и установление баланса на новом уровне. Шкала также передвинется на новую отметку. Обычно корректировка проводится в ясную погоду, когда прозрачность атмосферы заведомо близка к 100% .

РДВ-3 очень прост в обращении. Однако он не обеспечивает измерения МДВ менее 200 м. Поэтому в настоящее время РДВ-3 заменяется более современным прибором - импульсным фотометром ФИ -1 и его последующими модификациями ФИ-2 и ФИ-3.

7.6. Импульсный фотометр ФИ-1

Так же как и РДВ-3, импульсный фотометр работает по принципу трансмиссометров. Но в отличие от РДВ-3 пределы измерения ФИ-1 составляют 50 - 6000 м. Таким образом, нижний предел измерения значительно ниже, чем в РДВ-3. Импульсный фотометр ФИ-1 допускает проведение измерений в довольно плотном тумане. Это достигается за счёт применения двух отражателей вместо одного.

Дальний отражатель (ОД) установлен на расстоянии 100 м от фотометрического блока, *ближний отражатель* (ОБ) на расстоянии 20 м. Дальний отражатель применяется при сравнительно высокой МДВ от 400 до 6000 м, а ближний отражатель - при дальности видимости от 50 до 1500 м. Это обеспечивает получение достаточно сильного светового сигнала даже при малой МДВ.

Принцип действия ФИ-1 несколько отличается от РДВ-3. Опорный пучок в приборе ФИ-1 не регулируется. Оптическая схема ФИ-1 более проста (рис. 7.18). Импульсная газоразрядная лампа ИЛ генерирует световые импульсы с частотой 50 Гц. Зондирующий пучок проходит через объектив О, который превращает его в слаборасходящийся, и через защитное стекло ЗС выходит в атмосферу. Оба отражателя ОД и ОБ освещаются световым пучком. Но ОД располагается на оптической оси прибора, а ОБ смещён вниз относительно оси.

Благодаря этому отраженные пучки света проходят по разным траекториям: свет от ОД, сфокусированный вогнутым зеркалом ВЗ, проходит через диафрагму D_1 , а световой пучок от ОБ через D_2 . Таким образом, чтобы воспользоваться только одним из отражателей, необходимо закрыть одну из диафрагм и открыть другую. Это делает коммутатор K_1 . Через диафрагму D_1 или D_2 световой пучок попадает на клинообразный рассеиватель КР.

Опорный пучок света проходит от импульсной лампы прямо на клинообразный рассеиватель через диафрагму D_3 . Очередность прохождения пучков регулируется оптическим коммутатором K_2 , периодически открывающим путь для зондирующего пучка (D_1 или D_2) и для опорного (через

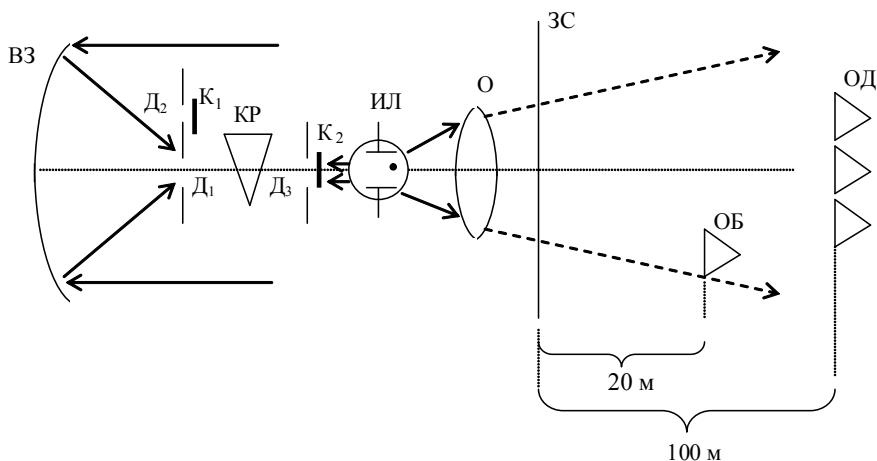


Рис. 7.18. Оптическая схема ФИ-1

Д₃). Оптический коммутатор представляет собой непрозрачные металлические шторки, перекрывающие световой поток и управляемые электромагнитами. Частота чередования светового потока (будем называть её *частотой коммутации*) составляет 0,25 Гц.

Таким образом, на клинообразный рассеиватель поступают по очереди зондирующий и опорный пучки света. Клинообразный рассеиватель – призма с двумя белыми матовыми гранями – рассеивает поступающий свет и направляет его на катод ФЭУ (на рис. 7.18 не показан). ФЭУ преобразует световой сигнал в электрический (глава 1, раздел 1.10).

Дальнейшие преобразования электрического сигнала проследим по блок-схеме прибора (рис. 7.19). Как и в предыдущем случае, удобно

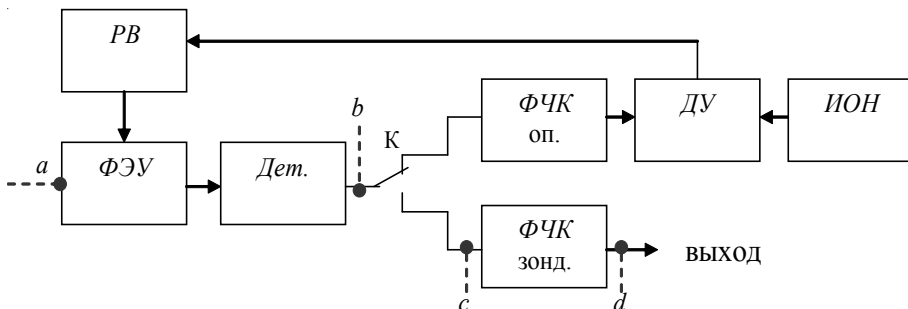


Рис. 7.19. Блок-схема ФИ-1

следить за преобразованием сигнала, изучая эпюры напряжений в отдельных точках схемы (*a*, *b*, *c* и *d*). Эпюры показаны на рис. 7.20.

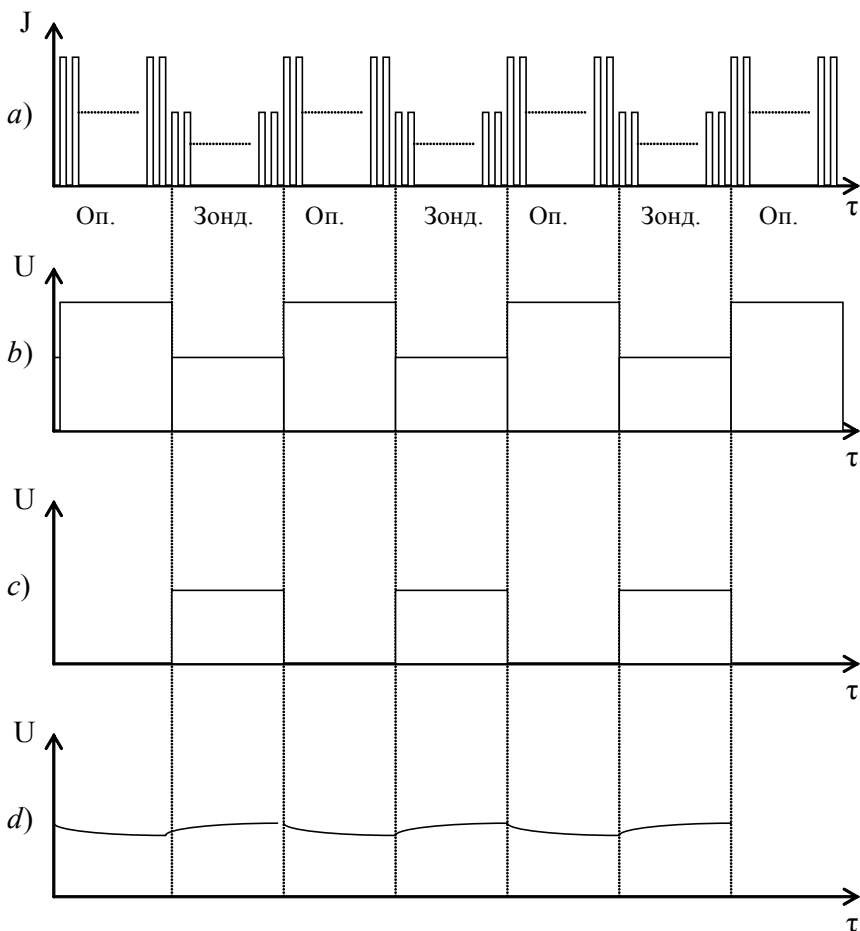


Рис. 7.20. Эпюры напряжения для ФИ-1

Итак, световой сигнал, приходящий на ФЭУ, имеет вид, показанный на рис. 7.20, *a*. Допустим, что зондирующий пучок света меньше опорного. Сигнал с фотоумножителя подвергается детектированию. Детектор Д представляет собой схему с RC-цепочкой. Постоянная времени цепочки выбрана такой, чтобы конденсатор не успевал бы разряжаться в промежутке между импульсами частотой 50 Гц, но успевал бы быстро разряжаться или заряжаться при смене амплитуды импульсов. Тогда сигнал после де-

тектора будет иметь вид, изображенный на рис. 7.20, *b*. Можно сказать, что детектор даёт *огibaющую* входного сигнала. Амплитуда импульсов зондирующего сигнала определяется величиной МДВ и яркостью импульсной лампы, амплитуда опорных импульсов только яркостью лампы. Далее импульсы разделяются по двум каналам. Электрический коммутатор (ключ) К работает синхронно с оптическим коммутатором и переключает сигналы на два *фильтра частоты коммутации* (ФЧК): опорного и зондирующего сигнала. Оба фильтра имеют одинаковые схемы, схожие с пиковым детектором, но постоянная времени фильтров гораздо больше. Поэтому если на входе фильтров сигнал представляет собой широкие импульсы с частотой 1 Гц (рис. 7.20, *c*), то сигнал на выходе фильтров будет иметь почти постоянный уровень с малыми колебаниями (рис. 7.20, *d*).

Рассмотрим теперь, от каких параметров зависит уровень сигнала на выходе каждого из фильтров. Сигнал (т.е. постоянное напряжение) на выходе ФЧК_{зонд} зависит от МДВ и от яркости лампы. Если бы эта зависимость была бы однозначной только от МДВ, то для измерения МДВ было бы достаточно просто измерить это напряжение. Но так как эта зависимость не однозначна, то для измерения МДВ необходимо избавиться от неоднозначности, для чего в схеме предусмотрена обратная связь (верхняя часть рис. 7.19).

Очевидно, напряжение на выходе ФЧК_{оп} зависит только от яркости лампы. Оно подается на *дифференциальный усилитель* (ДУ). На второй вход ДУ подается строго постоянное опорное напряжение (40 В) с *источника опорного напряжения* (ИОН). Дифференциальный усилитель усиливает разность между этими напряжениями. В зависимости от соотношения между ними эта разность может иметь разные знаки. Усиленная разность напряжений поступает на *регулируемый выпрямитель* (РВ), который в зависимости от знака разности увеличивает или уменьшает напряжение питания ФЭУ. Соответственно, изменяется чувствительность ФЭУ, изменяется амплитуда сигнала на его выходе и зависимость выходного сигнала ФЧК_{зонд} от МДВ становится однозначной.

Поясним это на примере. Допустим, яркость импульсной лампы увеличилась, и все сигналы, изображенные на рис. 7.20, теперь имеют большую амплитуду. Соответственно увеличился сигнал на выходе ФЧК_{оп} и появилась положительная разность сигналов с ФЧК_{оп} и ИОН.

Подчиняясь этому (положительному) сигналу-команде, регулируемый выпрямитель уменьшает напряжение питания ФЭУ и его чувствительность уменьшается. Соответственно уменьшаются все сигналы на рис. 7.20.

Когда разность сигналов с $\text{ФЧК}_{\text{оп}}$ и ИОН становится равной нулю, регулируемый выпрямитель прекращает уменьшать напряжение питания ФЭУ. Следовательно, в результате действия такой обратной связи напряжение с $\text{ФЧК}_{\text{оп}}$ будет всегда равно напряжению с ИОН (т.е. 40 В), а напряжение на выходе $\text{ФЧК}_{\text{зонд}}$ теперь будет определяться только величиной МДВ. Оно измеряется стрелочным прибором и переводится в значение МДВ по специальным таблицам, помещенным на передней панели прибора.

Заметим, что прибор ФИ-1 представляет собой ещё один пример следящей системы. В качестве сигнала разбаланса здесь выступает разность напряжений с $\text{ФЧК}_{\text{оп}}$ и напряжения с ИОН. Для удобства измерения прибор комплектуется цифровым вольтметром. Напряжение, подаваемое на вольтметр, приводится к такому уровню, что оно равно значению МДВ в метрах (напряжение измеряется с точностью до тысячных долей вольта).

Переключение диапазонов измерения, т.е. переход с ОД на ОБ и обратно осуществляется автоматически при понижении (или повышении) выходного напряжения, связанного с МДВ, до значения 0,4 В (400 м) или 1,6 В (1600 м). Имеющийся в комплекте самописец позволяет вести запись изменения МДВ со временем.

В настоящее время в России, в ГГО им. А. И. Воейкова разработаны приборы ФИ-2 и ФИ-3 (рис. 7.21), представляющие собой импульсный фотометр нового поколения. ФИ-3 имеет пределы измерения от 60 до 8000 м, кроме того, значительно повышена надежность его работы.



Рис. 7.21. Импульсный фотометр ФИ-3

7.7. Дистанционная метеорологическая станция М-49

Дистанционная метеорологическая станция (ДМС) М-49 (рис. 7.22) предназначена для оперативного измерения скорости и направления ветра, температуры и относительной влажности воздуха.

Точность измерения метеопараметров с помощью М-49 ниже, чем на соответствующих специальных приборах (станционные термометры, анеморумбометры, психометры), поэтому её используют в тех случаях, когда требования к точности измерений невысоки. Несмотря на то, что станция М-49 является довольно старым прибором, (первые образцы станции были изготовлены в 40-х гг. XX века), она до сих пор, правда с изменённым дизайном, выпускается промышленностью.

Простота эксплуатации, сравнительно несложная схема и достаточно малая стоимость по сравнению с другими аналогичными установками – все эти качества делают станцию конкурентноспособным прибором.

В таблице 7.1 приведены значения диапазона и погрешности измерений метеопараметров с помощью М-49.



Рис. 7.22. Дистанционная метеорологическая станция М-49

Таблица 7.1

Значения диапазона и погрешности измерений метеопараметров станцией М-49

Параметры	Температура воздуха		Относительная влажность		Скорость ветра		Направление ветра	
	от	до	от	до	от	до	от	до
Диапазон измерений	-55 ⁰ С	+45 ⁰ С	30%	100%	1,5м/с	50м/с	0 ⁰	360 ⁰
Погрешность измерений	±0,5 ⁰		±8%		±(0,5+0,05v)		±10 ⁰	

Датчики станции располагаются в зоне, где предполагается измерять метеопараметры, например, на метеоплощадке. Они соединены с пультом управления стандартными кабелями с медными жилами. Длина кабелей составляет несколько десятков метров, но при необходимости они могут быть удлинены до нескольких сотен метров. Датчики состоят из двух блоков, которые размещаются на специальной мачте ПР57. Датчик температуры и влажности устанавливается на высоте 2 м. Он снабжен жалюзи, окрашенными в белый цвет для уменьшения радиационной погрешности. Датчик параметров ветра – флюгарка с винтовым ветроприёмником устанавливается на высоте 7 м.

Электрическая схема станции приведена на рис. 7.23. В верхней части схемы пунктиром выделены блоки, содержащие датчик параметров ветра (ДПВ) и датчик температуры и влажности (ДТВ). Остальная часть схемы расположена в пульте управления. Всю схему можно разделить на следующие узлы:

1. Выпрямитель, используемый при сетевом питании станции. Схема выпрямителя расположена в левом нижнем углу рис. 7.23.

2. Преобразователь постоянного тока в переменный. Его схема расположена в правом нижнем углу рис. 7.23.

3. Канал измерения скорости ветра.

4. Канал измерения направления ветра.

5. Канал измерения температуры.

6. Канал измерения относительной влажности.

Рассмотрим последовательно все эти блоки.

Выпрямитель. Переменное напряжение от сети (220 В) подаётся через контакты (2) переключателя Π_1 на первичную обмотку трансформатора $\text{Tr}1$. Последовательно с этой обмоткой включен конденсатор C_3 , который вместе с обмоткой образует колебательный контур. Резонансная частота этого контура составляет 50 Гц, т. е. равна частоте сетевого напряжения. Поэтому при колебаниях амплитуды напряжения в сети амплитуда напряжения в обмотке трансформатора практически не изменяется. Таким образом, осуществляется стабилизация напряжения питания. Высокоомный резистор R_8 служит для разряда C_3 при отключении станции от сети.

Со вторичной обмотки трансформатора $\text{Tr}1$ снимается напряжение около ~12 В. Эта обмотка имеет среднюю точку, т.е. практически разделена на две одинаковых части. Средняя точка служит нулём, относительно которого напряжение в крайних точках обмотки колеблется по синусоидальному закону. Если левая точка обмотки имеет положительное напряжение, то диоды VD_5 - VD_6 открыты, а VD_7 - VD_8 – закрыты. Если же положительный полупериод поступает на правую часть обмотки, то диоды VD_7 - VD_8 , наоборот, открыты, а VD_5 - VD_6 – закрыты. Таким образом, на конденсатор C_2 поступает однополярное напряжение, которое сглаживается конденсатором.

В итоге получается постоянное напряжение около 6 В, которое используется для питания станции. Станция может питаться как от сети, так и от батареи постоянного напряжения 6 В. В зависимости от вида питания переключатель Π_1 ставится в положение (2) – сетевое питание или в по-

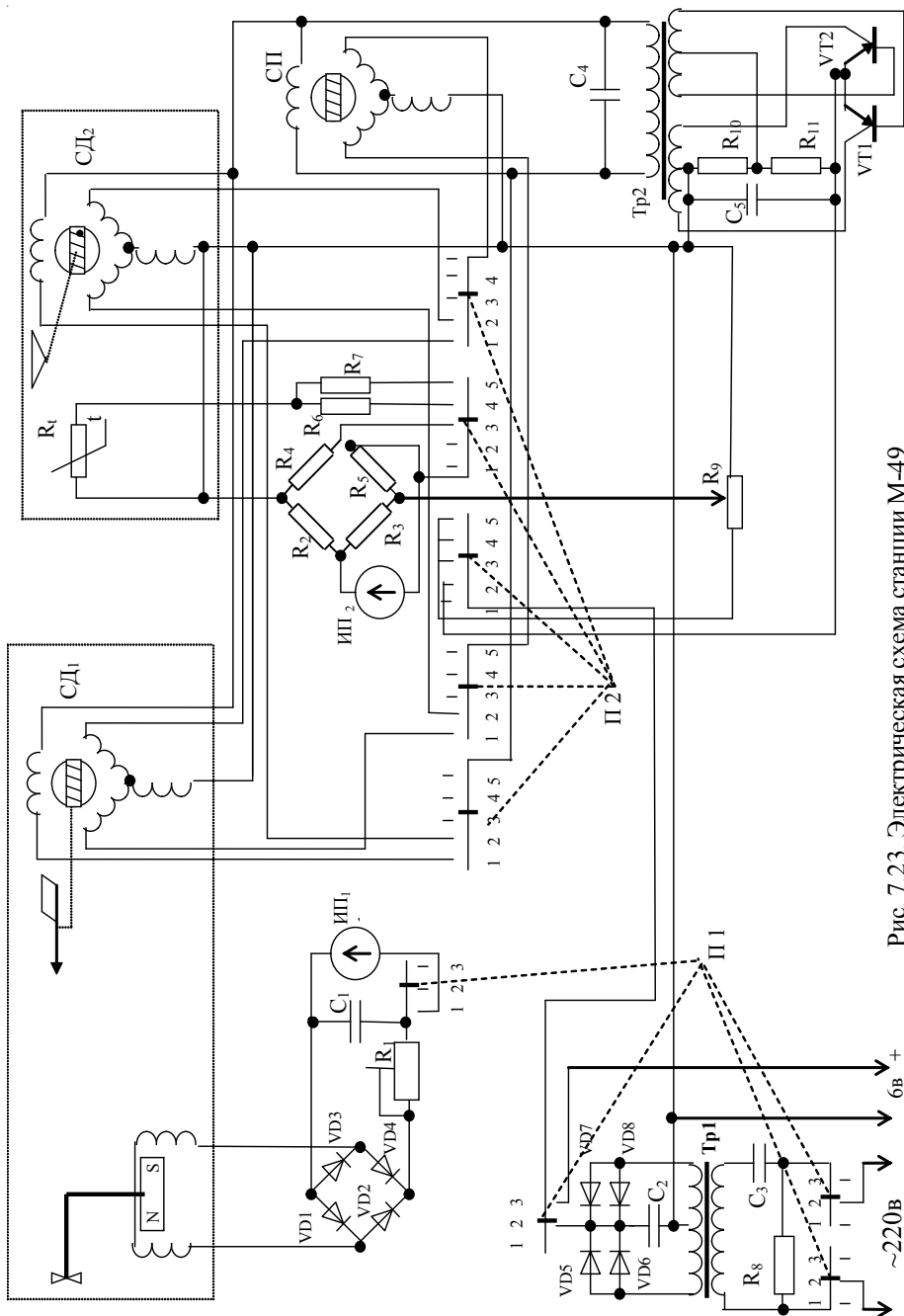


Рис. 7.23. Электрическая схема станции М-49

ложение (3) – батарейное питание. В положении (1) на станцию вообще не подается напряжение питания, это положение используется для измерения скорости ветра.

Преобразователь постоянного тока в переменный представляет собой мультивибратор с индуктивной обратной связью. В качестве задающего элемента мультивибратора используется индуктивность одной из первичных обмоток трансформатора ТР2 и конденсатор C_5 . Мультивибратор собран на транзисторах VT_1 и VT_2 . Поскольку обмотки обладают индуктивностью, мультивибратор даёт не импульсный, а синусоидальный ток. Частота переменного тока определяется емкостью C_5 и индуктивностью первичной обмотки трансформатора. В данном случае она составляет 400 Гц.

Такая высокая частота используется для питания сельсинов, потому что это позволяет уменьшить их размеры. Окончательно переменный ток для питания сельсинов снимается со вторичной обмотки трансформатора Тр2. Параллельно обмотке включена емкость C_4 , образующая вместе с обмоткой колебательный контур. Резонансная частота этого контура равна рабочей частоте мультивибратора (400 Гц). Это стабилизирует амплитуду напряжения питания сельсинов.

Канал измерения скорости ветра представляет собой индукционный анемометр с ветроприёмным винтом, ориентируемым по потоку с помощью флюгарки. Винт вращает тахогенератор переменного тока, причём частота и амплитуда переменного тока зависят от скорости ветра. Переменный ток транслируется по кабелю в пульт, где выпрямляется с помощью двухполупериодного выпрямителя VD_1 - VD_4 . Далее происходит сглаживание пульсаций тока с помощью фильтра R_1 - C_1 .

Напомним, что резистор R_1 выполняет также функцию температурного компенсатора. Кроме того, с его помощью можно корректировать показания измерительного прибора ИП1 при настройке и поверке канала. На переднюю панель пульта ручка регулировки резистора R_1 не вынесена. Подробнее работа индукционного анемометра описана в главе 3, раздел 3.2.

Канал измерения направления ветра. Датчиком направления ветра в М-49 является флюгарка, ось которой приводит в движение ротор сельсина-датчика $СД_1$. Сельсин-датчик соединен с сельсином-приёмником СП, который находится внутри пульта станции.

Подробнее устройство и принцип работы сельсинов описаны в главе 3, раздел 3.6.

Канал измерения температуры представляет собой неуравнове-

шенный термометр сопротивления, включенный по трёхпроводной схеме (см. глава 1, раздел 1.6).

Датчиком температуры является проволочный резистор R_i из медного провода, помещённого в металлическую трубку. Мостовая схема собрана на резисторах R_2 , R_3 , R_5 и R_i . Последовательно с резистором R_i в плечо моста включается один из резисторов – R_6 или R_7 . Это делается для смещения шкалы при выборе диапазона измерения. При этом переключатель П2 ставится в положение 4 или 5. Переключатель П1, с помощью которого подается питание на схему, ставится в положение 2 или 3 в зависимости от того, сетевое или батарейное питание используется. В обоих случаях источник питания подключается к переменному резистору R_9 , которое выполняет роль делителя напряжений. С помощью резистора R_9 можно отрегулировать напряжение питания моста. Это делается перед каждым измерением температуры. Для этого переключатель П2 ставится в положение 3 («контроль температуры») и в измерительное плечо моста включается контрольное сопротивление R_4 . При включении этого сопротивления в измерительной диагонали моста возникает ток, вызывающий смещение стрелки измерительного прибора ИП2 до деления 45^0 . Если же стрелка занимает другое положение, это означает, что напряжение питания отрегулировано неправильно, тогда вращением ручки резистора R_9 стрелку устанавливают на контрольную отметку. Ручка резистора R_9 выведена на переднюю панель.

Канал измерения относительной влажности. Датчиком влажности служит круглая органическая пленка, центральная часть которой оттягивается вниз с помощью пружины и системы рычагов. Вертикальное движение рычага преобразуется во вращательное движение шестерни, укрепленной на оси сельсина-датчика СД₂. Переключатель П2 ставится в положение 2 и обмотки сельсина-датчика соединяются с соответствующими обмотками сельсина-приёмника, находящегося в пульте. Ось сельсина-приёмника поворачивает стрелку, показывающую значение влажности по шкале, находящейся внутри шкалы, показывающей направление ветра.

В ДМС М-49 применяется один сельсин-приемник СП, который может соединяться с одним из двух сельсинов-датчиков. Один из них соединён с органической пленкой (датчик влажности), а другой – с флюгаркой (датчик направления ветра). Переключение производится с помощью переключателя П2. В положении 1 измеряется направление ветра, а в положении 2 – относительная влажность.

7.8. Анеморумбометр М-63М

Анеморумбометр М-63М является дистанционным прибором для измерения параметров ветра. С его помощью можно измерять следующие величины:

1. Мгновенную скорость ветра, т.е. скорость ветра в настоящий момент времени в диапазоне от 1,5 до 60 м/с.
2. Среднюю скорость ветра, т.е. осредненное значение скорости ветра за 10 мин. (или за 2 мин.) в диапазоне от 1 до 40 м/с.
3. Максимальную скорость ветра (порывы) за любой промежуток времени между измерениями в диапазоне от 3 до 60 м/с.
4. Направление ветра в диапазоне от 0 до 360 град.

Конструкция прибора включает три блока: датчик параметров ветра, измерительный блок и блок питания. Блок питания предназначен для преобразования сетевого напряжения (220 В) в постоянное напряжение 12 В. Он собран по обычной схеме выпрямителя и допускает регулировку выходного напряжения в небольших пределах. Блок также укомплектован аккумуляторами, что позволяет проводить измерения независимо от наличия сетевого напряжения.

В состав электронной схемы анеморумбометра М-63М входят триггеры. Описание триггера и его работы было рассмотрено в главе 6, раздел 6.2.

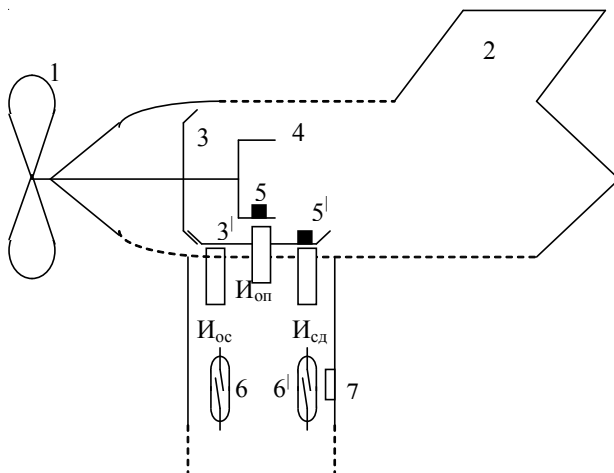


Рис. 7.24. Датчик параметров ветра М-63М.

- 1 - ветроприемный винт; 2 – флюгарка; 3 и 3' косозубые шестерни;
4 - Медный стакан; 5 и 5' - ферритовые стержни; 6 и 6' – герконы; 7 – магнит

Датчик параметров ветра М-63М помещается на мачте высотой 9 м. Внешний вид датчика и его внутреннее устройство показаны на рис. 7.24. Ветроприемный винт (1) вращается ветром, его угловая скорость вращения является функцией скорости ветра. Флюгарка (2) ориентируется в зависимости от направления ветра. Две косозубые шестерни (3) и (3') вращаются вместе с винтом. Они имеют одинаковое количество зубцов и поэтому вращаются с одинаковой скоростью. Медный стакан (4) вместе с ферритовым стержнем (5) вращается в вертикальной плоскости, а шестерня (3') вместе с ферритовым стержнем (5') - в горизонтальной плоскости. Три импульсатора, расположенные рядом с шестернями, генерируют импульсы в момент прохождения ферритового стержня над любым из импульсаторов. Это импульсаторы опорной серии - $I_{оп}$, основной серии - $I_{ос}$ и сдвинутой серии - $I_{сд}$. Импульсатор опорной серии расположен так, что над ним периодически проходит ферритовый стержень (5). Импульсаторы основной и сдвинутой серии расположены под шестерней (3') и над ними с той же частотой проходит стержень (5'). Поскольку частота всех трёх серий одинакова, то для измерения характеристик скорости ветра достаточно измерить частоту импульсов любой серии.

Для того чтобы понять, как измеряется направление ветра, обратим внимание на то, что между импульсами опорной и основной серии (или опорной и сдвинутой серии) имеется сдвиг по фазе. Датчик ориентирован так, что когда ветер имеет северное направление, импульсы опорной и основной серии генерируются одновременно. Если же направление ветра изменяется, то флюгарка поворачивается и вместе с ней поворачивается шестерня (3'). Следовательно, в тот момент, когда феррит (5) оказывается над импульсатором ОП, ферритовый стержень (5') занимает другое положение относительно импульсатора ОС. Появляется фазовый сдвиг между импульсами опорной и основной серии, который зависит от направления ветра. Следовательно, для измерения направления ветра необходимо измерить величину фазового сдвига, т.е. отношение t/T (рис. 7.25), поскольку $\varphi = (t/T) \cdot 360^\circ$.

Но величина фазового сдвига между основной и сдвинутой сериями постоянна и равна 180° (рис. 7.25), как следует из расположения импульсаторов ОС и СД (рис. 7.24). Следовательно, для измерения направления ветра можно измерить фазовый сдвиг ОП - СД, но при этом необходимо предусмотреть вторую шкалу, сдвинутую на 180° .

Теперь рассмотрим работу импульсатора. Он представляет собой изменённый блокинг-генератор, поэтому прежде всего рассмотрим работу

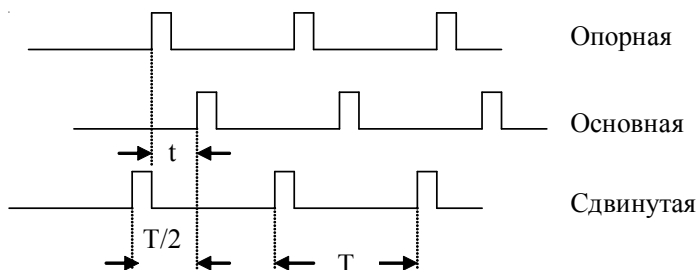


Рис. 7.25. Опорная, основная и сдвинутая серии импульсов

блокинг-генератора (рис. 7.26, а). Главным его элементом является колебательный контур L_2C_1 .

Колебания тока в контуре усиливаются транзистором VT и таким образом в коллекторной цепи транзистора через катушку L_1 проходит усиленный ток той же частоты. Положительная обратная трансформаторная связь L_1 - L_2 обеспечивает периодическую подкачку энергии в контур, следовательно, колебательный процесс становится незатухающим. В результате, ток в коллекторной цепи транзистора (через L_1 -коллектор - эмиттер - R_2) также незатухающий и выходной сигнал с сопротивления R_2 представляет собой синусоидально изменяющееся напряжение постоянной амплитуды.

Теперь рассмотрим схему самого импульсатора (рис. 7.26, б). Отличие от блокинг-генератора состоит в том, что в первичной обмотке со-

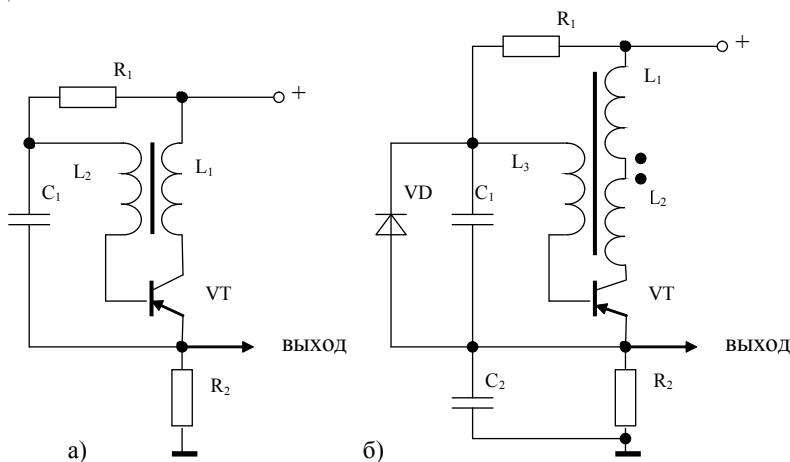


Рис. 7.26. Блокинг-генератор (а) и импульсатор (б)

держатся две катушки L_1 и L_2 . Катушки содержат одинаковое число витков и намотаны в разных направлениях (встречно). Следовательно, магнитные поля, возникающие в этих катушках при протекании по ним тока, гасят друг друга. Трансформаторная связь не возникает, блокинг-генератор не работает.

Однако в момент прохождения над сердечником импульсатора ферритового стержня индуктивность катушки L_1 несколько повышается и на короткое время появляется положительная обратная связь. Блокинг-генератор успевает сгенерировать пакет колебаний (рис. 7.27, а). Однако колебательный контур шунтируется диодом VD, который замыкает контур во время положительного полупериода колебаний тока. Таким образом, остаётся только отрицательный полупериод (рис. 7.27, б). Но параллельно выходному сопротивлению R_2 включен конденсатор C_2 , который играет роль детектирующей ёмкости, так как он не успевает разряжаться в промежутке между короткими отрицательными полупериодами. В результате, пакет колебаний (рис. 7.27, а) преобразуется в отрицательный импульс (рис. 7.27, в), который возникает на выходе каждый раз при прохождении ферритового стержня над импульсатором. Эти импульсы (от всех трёх импульсаторов) транслируются по кабелю в измерительный блок.

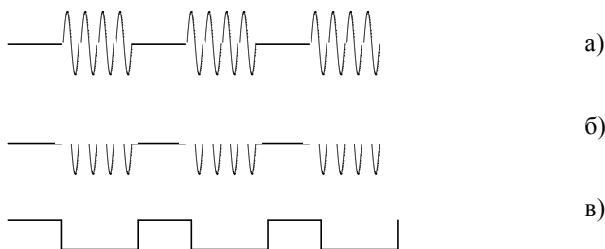


Рис.7.27. Эпюры напряжения

Для преобразования импульсов в положительные и для фильтрации помех импульсы подаются на *формирователи*, которые находятся в измерительном блоке. Формирователей всего три, по одному на каждую серию импульсов ($\Phi_{оп}$, $\Phi_{ос}$ и $\Phi_{сд}$) (рис. 7.28). На выходе формирователей будут положительные импульсы, частота которых зависит от скорости ветра, а фазовый сдвиг ОП-ОС (или ОП-СД) от направления.

Канал измерения средней скорости ветра. Для измерения средней скорости ветра за 10 мин. необходимо решить по меньшей мере, две задачи.

1. Пропускать импульсы в измерительный канал в течение 10 мин.

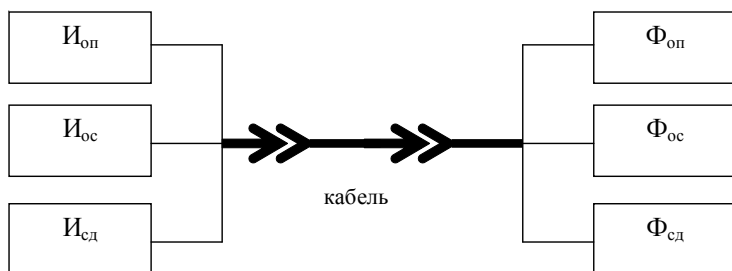


Рис. 7.28. Импульсаторы ($I_{оп}$, $I_{ос}$ и $I_{сд}$) и формирователи ($\Phi_{оп}$, $\Phi_{ос}$ и $\Phi_{сд}$), соединенные кабелем

2. Сосчитать общее количество импульсов, поступивших в канал за 10 мин. Как легко понять, оно пропорционально средней скорости ветра.

Для решения этих задач применяется схема, показанная на рис. 7.29. Положительные импульсы опорной серии подаются с формирователя $\Phi_{оп}$ на масштабный делитель (МД) через ключ К. Ключ замыкается вручную оператором и размыкается через 10 мин. часовым механизмом (ЧМ). В течение этого времени импульсы проходят в канал. Масштабный делитель делит частоту импульсов в N раз. Число N - коэффициент деления - подобрано таким образом, что количество импульсов на выходе МД было равно средней скорости ветра, измеренной в метрах в секунду, с точностью до десятых долей.

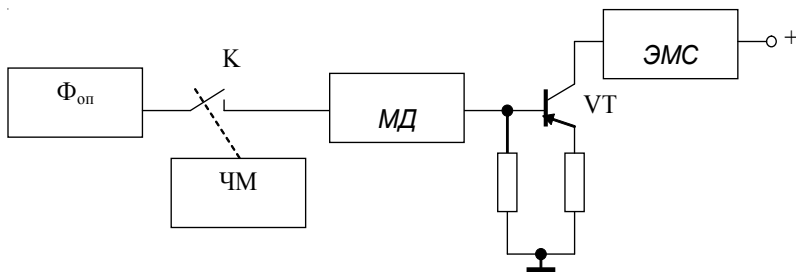


Рис. 7.29. Канал измерения средней скорости ветра (блок-схема)

Например, если средняя скорость ветра составляет 7,5 м/с, то на выходе МД будет 75 импульсов. Таким образом, задача теперь заключается в том, чтобы сосчитать эти импульсы. Транзистор VT периодически открывается и закрывается поступающими с МД импульсами и через электромеханический счетчик (ЭМС) периодически проходит ток, передвигая шкалу счётчика каждый раз на одно деление. Следовательно, по оконча-

нии 10-минутного интервала измерений оператор может прочесть по шкале счётчика среднюю скорость ветра с точностью до десятых долей метра в секунду.

В современных цифровых приборах М-63М-1 измерение временного промежутка осуществляется с помощью таймера, а счёт импульсов с помощью счётчика. Эти элементы собраны на цифровых микросхемах. Индикация измерений производится на цифровом табло.

Канал измерения мгновенной и максимальной скорости ветра. Для измерения мгновенной и максимальной скорости воспользуемся основной серией импульсов. Схема измерительного канала показана на рис. 7.30.

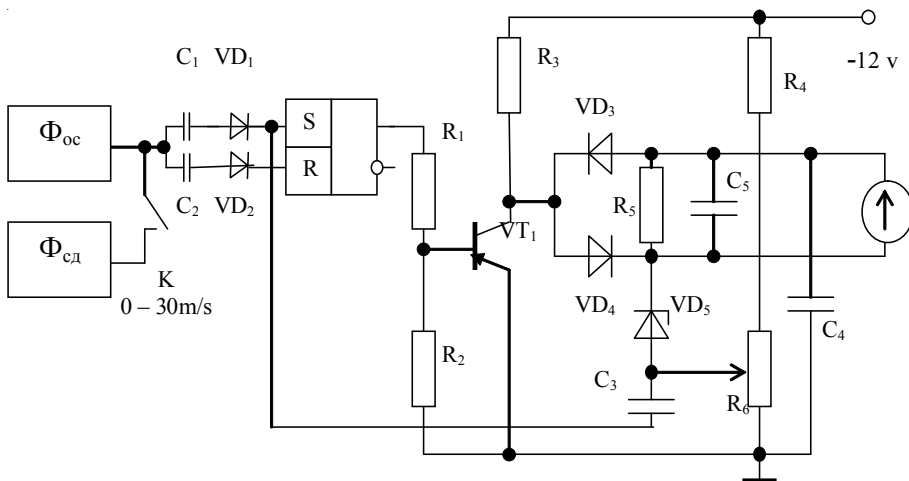


Рис. 7.30. Канал мгновенной и максимальной скорости

Прямоугольные импульсы проходят через диодно-ёмкостные цепи $C_1 - VD_1$ и $C_2 - VD_2$. После прохождения через конденсатор прямоугольный импульс преобразуется в два мгновенных импульса (рис. 7.31, а, б). Диод пропускает лишь один положительный импульс (рис. 7.31, в).

Итак, положительный мгновенный импульс поступает сразу на оба входа триггера. Зададим начальное состояние триггера таким, чтобы на его выходе был бы нуль. Тогда по приходе импульса триггер срабатывает по S -входу и на его выходе появляется положительное напряжение. Проходя через R_1 на базу VT_1 , это напряжение закрывает транзистор. Тогда через него ток не проходит и начинается зарядка конденсатора C_4 по цепи: отрицательный полюс источника питания – $R_3 - VD_3 - C_4$ – земля. Земля соединена в схеме с положительным полюсом источника питания. Кон-

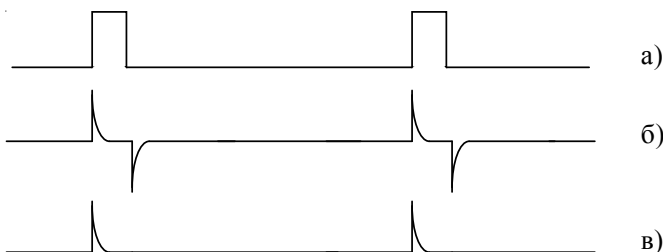


Рис. 7.31. Преобразование прямоугольных импульсов конденсаторно-диодной цепочкой

денсатор C_4 заряжается, причём его верхняя обкладка заряжается отрицательно. Через некоторое время пробивается стабилитрон VD_5 , так как напряжение на верхней обкладке превысит пробойное. Отрицательный импульс напряжения поступит на S -вход триггера через C_3 и триггер перебрасывается. На его выходе возникает отрицательное напряжение, которое открывает VT_1 . Конденсатор C_4 прекращает заряжаться, так как теперь ток проходит по цепи $R_3 - VT_1$ - земля. Но теперь C_4 оказывается соединённым параллельно с C_5 и C_4 разряжается на C_5 по цепи: C_4 - земля - VT_1 - VD_4 - C_5 . Значение величины $C_5 \gg C_4$, поэтому C_4 разряжается практически полностью, а C_5 получает некоторую дозу заряда и на его обкладках появляется небольшое напряжение.

Следующий импульс вызывает повторение всего процесса. Конденсатор C_5 снова получает дополнительную дозу заряда. С каждым следующим импульсом напряжение на C_5 растёт. Но вместе с этим идет разрядка C_5 через резистор R_5 , причём разрядный ток постоянно возрастает. Через несколько циклов наступает установившееся состояние: заряд, приобретённый C_5 за один цикл, равен разряду за один цикл. Нетрудно видеть, что в этом состоянии напряжение на C_5 зависит от частоты импульсов, т.е. от скорости ветра. Оно измеряется стрелочным или цифровым прибором.

Максимальная скорость ветра измеряется пассивной стрелкой. Она вмонтирована в стрелочный прибор и прикреплена справа к стрелке, отвечающей за показания мгновенной скорости ветра специальным поводком. При возрастании скорости ветра положение стрелки мгновенной скорости меняется в сторону увеличения значений и, двигаясь по шкале слева направо, она увлекает за собой пассивную стрелку. При уменьшении скорости поводок, соединяющий две стрелки, отходит. Так как стрелка пассивна и лишена возвратной пружины, то она остаётся на месте, удерживаемая силой трения. Следовательно, она показывает максимальное значение

мгновенной скорости между сроками наблюдений. Сброс показаний максимальной скорости ветра осуществляется вручную наблюдателем после снятия отсчета.

Шкала прибора имеет деления от 0 до 60 м/с. Но, поскольку скорость ветра обычно не превышает 10 - 20 м/с, предусмотрена вторая шкала - от 0 до 30 м/с. Для того чтобы воспользоваться этой шкалой, наблюдатель нажимает кнопку “0-30”, при этом в канал поступают импульсы как основной, так и сдвинутой серии. Поскольку сдвиг фаз между ними составляет 180° , общая частота импульсов увеличивается в два раза. Следовательно, угол отклонения стрелки прибора также увеличивается вдвое и показания должны сниматься по другой шкале.

Для проверки прибора в полевых условиях в пульт вмонтирован специальный блок контроля. Это генератор импульсов определенной частоты. При включении блока контроля все импульсаторы отключаются от схемы и в оба канала (как в канал средней скорости, так и в канал мгновенной скорости) поступают импульсы заданной частоты. Поскольку частота импульсов во время проверки постоянна, то показания по обоим каналам должны совпадать. Если же они не совпадают, то регулируется резистор R_6 в канале мгновенной скорости (рис. 7.30). При этом регулируется потенциал нижнего электрода стабилитрона VD_5 . Следовательно, изменяется и потенциал верхнего электрода в момент пробоя, а значит, и доза заряда на C_4 . Следовательно, меняется и напряжение на C_5 в установившемся состоянии, а значит, и показания прибора.

Канал измерения направления ветра. Как уже было сказано, для измерения направления ветра необходимо измерить фазовый сдвиг между опорной и основной (ОП-ОС) или между опорной и сдвинутой (ОП-СД) сериями. Схема измерительного канала показана на рис. 7.32.

Предположим, ключ K_1 находится в верхнем положении. Тогда импульсы опорной серии поступают на S -вход триггера с формирователя $\Phi_{оп}$, а импульсы основной серии - на R -вход триггера с формирователя $\Phi_{ос}$. Поступивший импульс опорной серии переводит триггер в такое состояние, что на его выходе появляется положительное напряжение. Оно запирает транзистор VT . Через некоторое время, определяемое фазовым сдвигом, на R -вход приходит импульс основной серии и перебрасывает триггер. VT при этом открывается. Следовательно, транзистор VT заперт только в течение времени между импульсами. В течение этого времени заряжается конденсатор C . Его ёмкость довольно велика, и зарядка происходит медленно. В течение одного цикла он не успевает зарядиться полностью. Вместе с тем

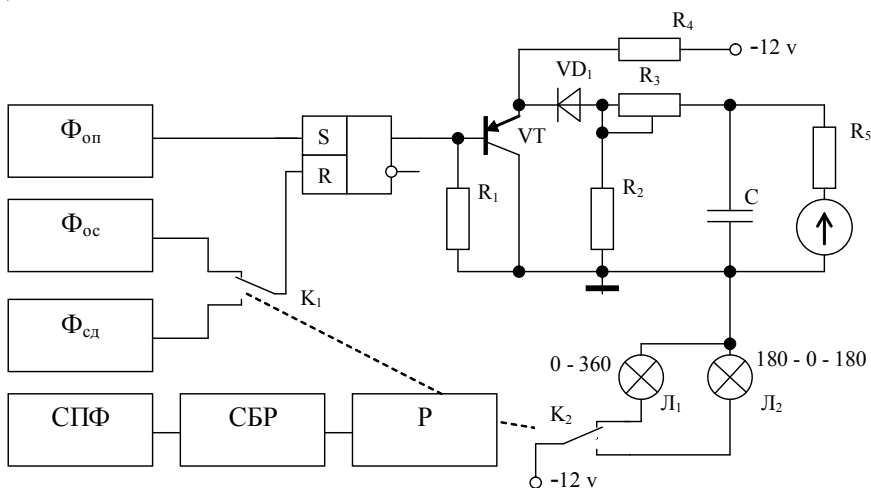


Рис. 7.32. Канал измерения направления ветра

идёт разрядка конденсатора через резистор R_2 . Через несколько циклов достигается установившееся состояние, когда заряд равен разряду. Напряжение на конденсаторе стабилизируется. Легко понять, что оно однозначно связано со временем зарядки конденсатора в течение одного цикла, т.е. с фазовым сдвигом. Схема имеет то преимущество, что большая ёмкость конденсатора осредняет флуктуации направления ветра.

Однако необходимо предусмотреть следующее обстоятельство.

При флуктуациях положения флюгарки вокруг северного направления время зарядки конденсатора будет изменяться: то очень малое, то очень большое. Поэтому осредненное значение направления будет сильно отличаться от истинного - южное вместо северного! Для того чтобы избежать такой ошибки, воспользуемся другой парой импульсов - ОП-СД. Тогда фазовый сдвиг изменится на 180° , и соответственно, необходимо пользоваться другой шкалой: $180^\circ - 0 - 180^\circ$. Колебания положения флюгарки теперь приводят к колебанию положения стрелки в центре шкалы, что успешно осредняется ёмкостью конденсатора.

Для переключения рабочей пары импульсов ключ K_1 должен быть переведён в нижнее положение. Это делает реле (Р), которое получает сигнал в виде напряжения с сигнализатора положения флюгарки (СПФ). СПФ представляет собой два геркона (глава 3, раздел 3.3), укрепленных в неподвижной части датчика (6 и 6', рис. 7.24). На колонке флюгарки вращается магнит (7, рис. 7.24). Когда магнит замыкает один из герконов,

на реле поступает напряжение и реле переводит исполнительные контакты K_1 и K_2 в нижнее положение. При замыкании второго геркона на реле поступает нулевое напряжение и оно возвращает K_1 и K_2 в верхнее положение. Любое положение блокируется схемой блокировки реле (СБР) до замыкания другого геркона.

Исполнительный контакт K_2 стоит в цепи питания одной из лампочек L_1 или L_2 , по которым наблюдатель определяет, по какой шкале следует измерять направление ветра.

Для проверки канала в полевых условиях включается блок контроля. При этом на S -вход триггера поступает постоянное напряжение. Таким образом, триггер всегда находится в одном состоянии и транзистор VT всегда открыт. Конденсатор C заряжается постоянно, что соответствует максимальным показаниям прибора, т.е. 360° по верхней шкале 0-360. Если прибор показывает иное значение, проводится его подстройка резистором R_3 . При этом изменяется ток заряда конденсатора C и, следовательно, показания прибора в установившемся состоянии.

7.9. Пульт цифрового анеморумбометра MB1-2-M1

В анеморумбометре с пультом MB1-2-M1 используется такой же датчик, как и в аналоговом анеморумбометре. Однако вместо импульсаторов применены герконы, а ферритовые стержни заменены магнитами. При этом по-прежнему выходными сигналами датчика являются последовательности импульсов напряжения: опорная (ОП), основная (ОС) и сдвинутая (СС) серии, частоты следования которых одинаковы. Частоты входных импульсов прямо пропорциональны скорости ветра. Фазовый сдвиг между импульсами опорной и основной серией равен направлению ветра. Фазовый сдвиг между импульсами основной и сдвинутой серии 180° .

Пульт MB1-2-M1, используемый в цифровом анеморумбометре, предназначен для преобразования частоты и фазового сдвига между последовательностями импульсов, значения которых пропорциональны скорости и направлению ветра, в цифровые значения скорости и направления ветра, выдаваемые на табло оператору, а также в аналоговые сигналы (ток и напряжение) выдаваемые на репитеры. Репитеры необходимы для дублирования индикации сигналов.

Основные узлы, входящие в состав пульта MB1-2-M1, представлены на структурной схеме (рис. 7.33). С помощью блока питания осуществляется питание пульта как от сети переменного тока, так и от аккумулятора.

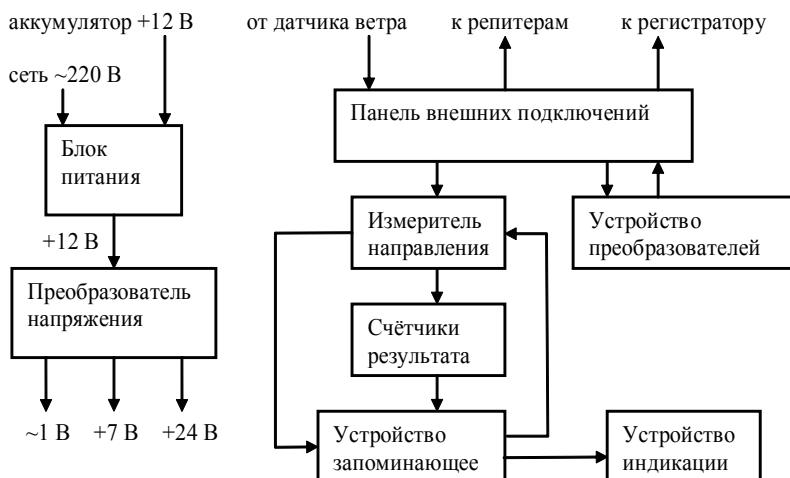


Рис. 7.33. Блок-схема пульта MB1-2-M1

На панели внешних подключений расположена схема согласования, нормирующая сигналы, поступающие от датчика, по амплитуде и длительности, а также разъёмы для подключения внешних устройств. Устройство согласования, измеритель направления, счётчики результата и запоминающее устройство составляют цифровые измерители скоростей и направления ветра. Устройство индикации преобразует информацию о скоростях и направлении ветра в цифровую форму. Далее сигналы подаются на цифровые индикаторы, которые, также как и органы управления прибором, расположены на лицевой панели пульта.

С помощью устройства преобразователей осуществляется представление информации об измеренной мгновенной скорости и направлении ветра в виде аналоговых сигналов, подаваемых далее на репитеры. В некоторых комплектациях прибора устройство согласования может отсутствовать. Рассмотрим теперь отдельные каналы преобразования сигналов MB1-2-M1.

Канал измерения средней скорости ветра (рис. 7.34). Средняя скорость ветра определяется как результат подсчёта числа импульсов опорной серии за 2 мин. (122 с) или за 10 мин. (600 с). Импульсы опорной серии от датчика через схему согласования поступают на масштабный делитель «DIV», коэффициент деления которого устанавливается в зависимости от интервала осреднения. При осреднении за 122 с масштабный коэффициент $K_d = 11$, при осреднении за 600 с $K_d = 54$. В момент нажатия

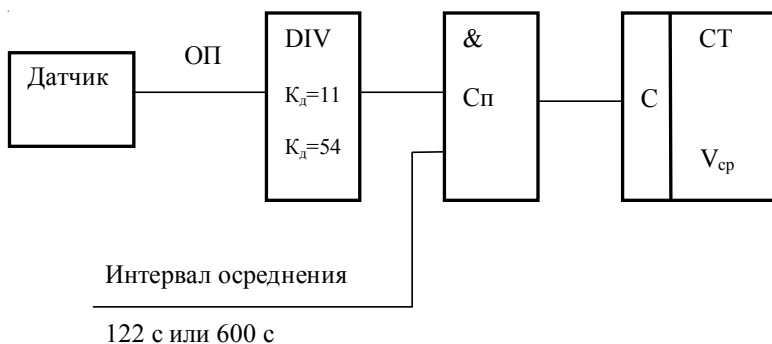


Рис. 7.34. Блок-схема канала измерения средней скорости ветра

кнопки «ПУСК» на лицевой панели прибора на второй вход схемы «И» начинает поступать логическая единица. Она сохраняется в течение интервала осреднения, который формируется специальной схемой. Если установлено упреждение, то логическая единица поступит на схему «И» по окончании времени упреждения.

Поскольку на нижнем входе схемы «И» сохраняется логическая единица, то импульсы с масштабного делителя поступают на счётчик средней скорости «СТ», который их считает. Масштабный коэффициент подобран так, что двоичное число импульсов, подсчитанное счётчиком за интервал осреднения соответствует средней скорости ветра с точностью до 0,1 м/с.

По окончании счёта значения из счётчика переносятся в запоминающее устройство и счётчик обнуляется. Запоминающее устройство посылает сигнал на цифровые индикаторы.

В качестве масштабного делителя применяется двоично-десятичный реверсивный счётчик «СТ 2/10» с предустановкой. Рассмотрим его работу (рис. 7.35).

Входы D1 – D4 служат для установки необходимого коэффициента деления K_d . Они называются информационными входами и служат для записи в счётчик какого-либо числа в двоичной форме. Это число отображается на его выходах, и от него будет производиться начало отсчёта.

Вход PE служит для разрешения записи кода по входам D1 – D4, или, как говорят, разрешения предустановки. Предварительная запись в счётчик производится при подаче сигнала раз-

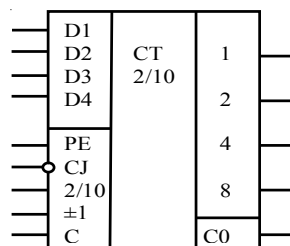


Рис. 7.35. Двоично-десятичный счетчик СТ 2/10

решения записи в момент прихода импульса на вход С. Вход С – тактовый. Сюда, собственно, и подаются импульсы с датчика, которые необходимо сосчитать. Вход С1 называется входом переноса. Если на вход переноса С1 подать логическую единицу, то счётный режим запрещается. Выход С0 называется выходом переноса. На этом выходе формируется сигнал при переполнении счетчика (когда на всех выходах устанавливается логическая единица).

Таким образом, счётчик, конструкция которого позволяет сосчитать только определенное количество импульсов, формирует единичный сигнал на выходе С0, следовательно, счетчик делит количество поступающих импульсов в определенное количество раз. Далее сигнал с выхода С0 можно подать на вход С следующего счётчика. Он работает так же, как и первый, следовательно, ещё раз разделит количество импульсов. Несколько последовательно соединённых счётчиков обеспечивают необходимый коэффициент деления количества импульсов. На выходах 1, 2, 4, 8 каждого счётчика формируется двоичный код, соответствующий числу поступивших на вход счётчика импульсов. Вход 2/10 - вход переключения модуля счёта. При логической единице на этом входе счётчик производит двоичный счет, при логическом нуле - двоично-десятичный.

На вход ± 1 может подаваться логическая единица или логический нуль. Если на входе ± 1 логическая единица, то по каждому спаду входного импульса, поступающему на вход С, состояние счётчика будет увеличиваться на единицу. При логическом нуле на входе ± 1 счётчик переключается в режим вычитания - по каждому спаду импульса на входе С состояние счётчика уменьшается на единицу. Если выводы с кружочками, значит они инверсные, т. е. для работы вместо логической единицы подаётся логический нуль и наоборот.

Работа масштабного делителя происходит следующим образом. На входы D1 – D4 подаётся двоичный код необходимого коэффициента деления K_d . В момент подачи логической единицы на вход PE это число записывается в счётчик, который находится в режиме вычитания. Счётные импульсы, подаваемые на вход С, вызывают уменьшение числа записанного в счётчик.

Когда оно станет равно 0, то на выходе С0 возникнет импульс, который пойдёт дальше. Одновременно с этим импульсом в счётчик опять запишется коэффициент деления и работа его продолжится. В результате число импульсов на выходе реверсивного счётчика будет в K_d раз меньше, чем их поступило на вход.

Канал измерения мгновенной и максимальной скорости ветра (рис. 7.36). Мгновенная скорость определяется как результат подсчёта числа импульсов основной и сдвинутой серий за 2,78 с. Иначе говоря, мгновенная скорость ветра принимается равной средней скорости за это время. Для обеспечения измерений с дискретностью 0,1 м/с количество входных импульсов предварительно умножается на 4 схемой умножения «MRL». Это реализуется использованием сначала импульсов основной и сдвинутой серий, сдвинутых одна относительно другой на 180°, а затем передних и задних фронтов импульсов этих серий. В период действия логической единицы на втором входе схемы «И» через схему «Сп1» импульсы поступают на счётчик мгновенной скорости «СТ $V_{\text{мгн}}$ » и производится их счёт. Результаты выводятся на цифровой индикатор мгновенной скорости ветра.

Эти же импульсы будут считываться счётчиком максимальной скорости «СТ $V_{\text{макс}}$ ». Для того чтобы импульсы проходили на этот счётчик, на верхнем входе схемы «И» Сп2 должна быть единица. Эта логическая единица подаётся со схемы сравнения « $=$ », но только в том случае, если содержимое счётчика мгновенной скорости равно содержимому счётчика максимальной скорости. В начальный момент счёта это – соот-

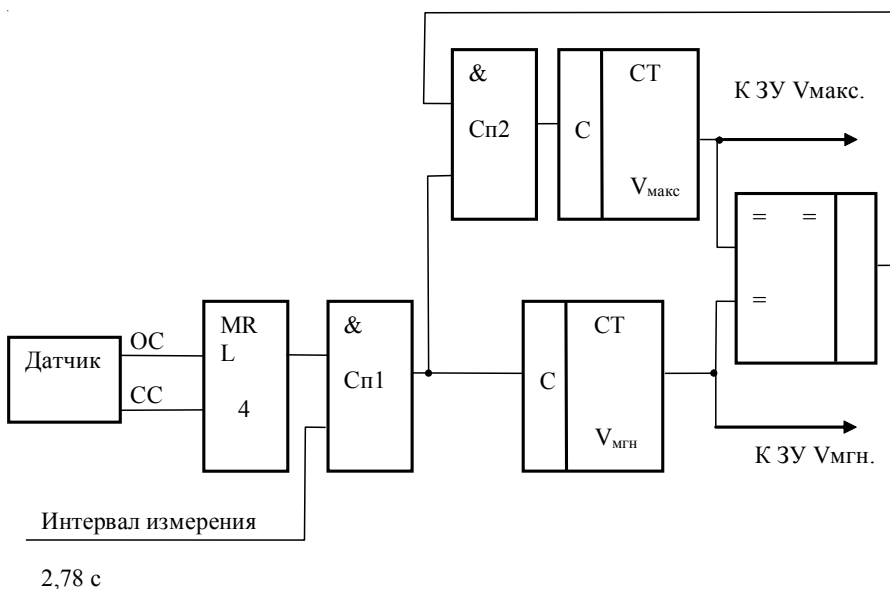


Рис. 7.36. Блок-схема канала измерения мгновенной и максимальной скорости ветра

ношение обеспечивается всегда, потому что содержимое счетчиков мгновенной и максимальной скорости - нуль.

Следовательно, импульсы проходят на счётчик максимальной скорости ветра. В следующий период измерения (2,78 с) логическая единица на схему «И» Сп2 будет подана только в том случае, если содержимое счётчика (т.е. мгновенная скорость за предыдущий период измерения) будет больше содержимого счетчика максимальной скорости. В противном случае на вход схемы «И» Сп2 будет подан логический нуль, импульсы не будут проходить на счётчик максимальной скорости и содержимое счётчика максимальной скорости останется неизменным. Таким образом, содержание счетчика СТ $V_{\text{макс}}$ может только возрастать. Значит, в каждый момент времени счетчик сохраняет наибольшее за всё время наблюдений значение скорости ветра. По окончании интервала измерения измеренные значения мгновенной и максимальной скорости из счётчиков, переносятся в запоминающее устройство (ЗУ), и содержимое счётчика мгновенной скорости сбрасывается. Сброс счётчика максимальной скорости происходит при нажатии кнопки « $V_{\text{макс}}$ СБРОС», находящейся на лицевой панели пульта.

Канал измерения направления ветра. Направление ветра φ определяется по фазовому сдвигу между импульсами основной и опорной серий (ψ_1) или сдвинутой и опорной серий (ψ_2), поступающих с датчика ветра:

$$\psi_1 = \varphi ;$$

$$\psi_2 = \varphi + 180^\circ, \text{ если } 0^\circ < \varphi < 180^\circ ;$$

$$\psi_2 = \varphi - 180^\circ, \text{ если } 180^\circ < \varphi < 360^\circ ,$$

где φ – измеряемое направление ветра в градусах.

Поясним измерение направления ветра на примере измерения фазового сдвига «опорная – основная серия» (рис. 7.37). Импульсы основной (а) и опорной (б) серий преобразуются в фазовые импульсы (в). Отношение времени фазового импульса к периоду импульсов основной или опорной серии равно фазовому сдвигу, т. е. направлению ветра. Следовательно, его-то и необходимо измерить.

Тактовый генератор создаёт импульсы, количество которых равно 360 за период осреднения – 16 с (рис. 7.37, г). На счётчик подаются только те тактовые импульсы, которые совпадают по времени с фазовыми импульсами (рис. 7.37, д). Счётчик их считает. Понятно, что количество этих импульсов численно равно направлению ветра в градусах, ведь максимальное возможное значение количества импульсов равно 360, а минимальное – 0.

Рассмотрим схему канала измерения направления ветра (рис. 7.38).

В состав измерителя направления входят:

- триггеры «Тг1» и «Тг2», преобразующие фазовый сдвиг между основной и опорной сериями и сдвинутой и опорной сериями в фазовые импульсы, длительность которых пропорциональна фазовому сдвигу;
- генератор модулирующих импульсов «GN» с частотами $f_1=2048$ Гц и $f_2=1024$ Гц, сдвинутых по начальной фазе на 180° ;

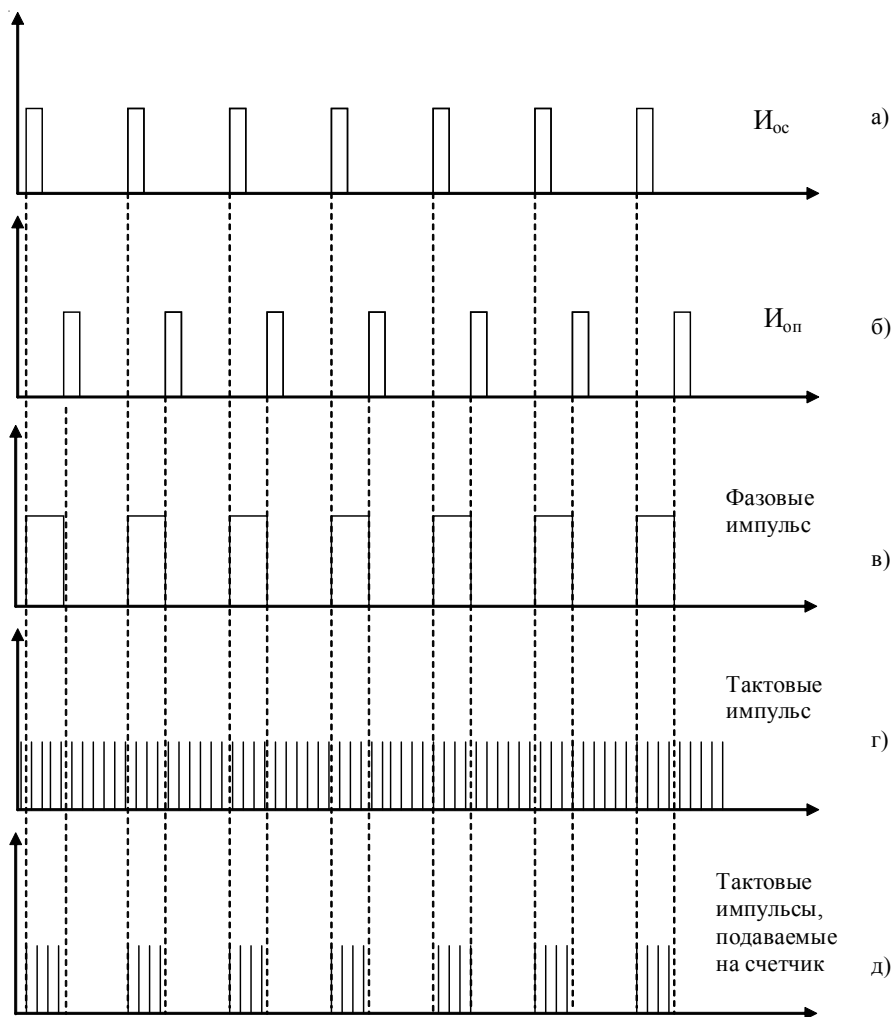


Рис. 7.37. Пояснение принципа измерения направления ветра

- логические схемы «Сп1», «Сп2», «Сб1» подключающие к модулятору «М» импульсы напряжений с триггеров «Тг1» или «Тг2»;
- масштабные делители «DIV1» и «DIV2» с коэффициентом деления $K_d = 91$, осуществляющие деление модулирующих импульсов;
- реверсивный счётчик результата «Сч1»;
- триггер «Тг4», управляющий реверсом счётчика результата;
- анализатор положения флюгарки датчика ветра «А»;
- формирователь временного интервала $\tau_u = 16$ с, задающий время измерения направления ветра «DIV3».

Выбор угла в процессе измерения осуществляется по сигналу «Признак», поступающему с датчика. Если флюгарка расположена вблизи 0° , то на вход «Признак» с датчика поступает сигнал логической единицы. В этом случае производится измерение угла ψ_2 . Если флюгарка датчика расположена вблизи 180° , то по входу «Признак» поступает логический ноль и производится измерение угла ψ_1 .

Определение сдвига фаз между сериями производится по количеству модулирующих импульсов, прошедших за время измерения направления ветра, один импульс соответствует сдвигу фаз в 1° . Величины τ_u, f_1, f_2 и K_d выбраны таким образом что:

$$\tau_u \times \frac{f_1}{K_d} = 16 \times \frac{2048}{91} \approx 360, \quad \tau_u \times \frac{f_2}{K_d} = 16 \times \frac{1024}{91} \approx 180.$$

По команде «Начало измерения» производится анализ положения флюгарки. Если измеряемый угол лежит в пределах $180-360^\circ$, то сигнал с выхода анализатора «А» запрещает прохождение сигнала через схему «Сп3», к модулятору «М» подключаются импульсы длительность которых пропорциональна ψ_2 и разрешается работа счётчика «Сч1». За время измерения на вход счётчика «Сч1» с выхода масштабного делителя «DIV1» поступит $N = (\psi_2 \tau_u f_1) / 360 K_d$ импульсов. В этом случае $N = \psi_2 = \varphi - 180^\circ$. Одновременно с выхода масштабного делителя «DIV2» через схему «Сб2» в счётчик «Сч1» дополнительно поступит 180 импульсов, и в счётчике «Сч1» будет записано число импульсов: $N = \psi_2 + 180 = \varphi - 180 + 180 = \varphi$.

После окончания измерения содержимое счётчика «Сч1» переписывается в память, расположенную в запоминающем устройстве, выводится на табло и начинается новый цикл измерения.

Если с датчика перед началом измерения вырабатывается сигнал «Переход через 180° », то триггер «Тг3» изменяет своё состояние и на вход



модулятора «М» поступают импульсы с выхода триггера «Тг1», длительность которых пропорциональна ψ_1 , запрещается работа масштабного делителя «DIV2», на вход счётчика «Сч1» поступают только импульсы с масштабного делителя «DIV1» и за время измерения в счётчик «Сч1» поступит $N = \psi_1 = \varphi$ импульсов.

Если в результате анализа положения флюгарки выявляется что измеряемый угол лежит в пределах $0-180^\circ$, то сигнал с выхода анализатора «А» разрешает прохождение импульсов через схему «Сп3» и к модулятору «М» подключаются импульсы, длительность которых пропорциональна ψ_2 . В этом случае каждый импульс с выхода масштабного делителя «DIV1» устанавливает триггер «Тг4» в такое состояние, чтобы обеспечивался режим суммирования, и на вход счётчика «Сч1» через схему «Сб2» поступят $N = \psi_2 = \varphi + 180$ импульсов. Каждый импульс с масштабного делителя «DIV2» переключает триггер «Тг4» и устанавливает счётчик «Сч1» в режим вычитания, одновременно поступая на его вход. Осуществляется вычитание 180 импульсов из содержимого счётчика «Сч1», и в нём будет записано $N = \varphi + 180 - 180 = \varphi$ импульсов. Таким образом, в любом случае в счётчике «Сч1» записывается число, равное измеряемому углу.

По команде «Начало измерения» определяется направление по импульсам сдвинутой и опорной серий. Если после начала измерения появится сигнал «Переход через 0° », то измеритель на него не реагирует. Если появится сигнал «Переход через 180° », то измерение продолжается по импульсам основной и опорной серий и число в «Сч1» будет равно среднему значению угла за время измерения. Если после сигнала признака перехода через 180° в течение того же интервала измерения появится сигнал признака перехода через 0° , т. е. в течение 16 с направление ветра меняется более чем на 180° , то в счётчике «Сч1» накапливается неправильный результат. Триггер «Тг3» перебрасывается и формирует сигнал «Гашение», индикаторы направления на лицевой панели гаснут и начинается новый цикл измерения направления ветра. Измерение направления осуществляется непрерывно. Результаты на табло обновляются через каждые 16 с.

7.10. Измерение радиоактивного фона и радиоактивного загрязнения местности

Перед тем как обсуждать измерение радиоактивного фона, скажем о единицах измерения радиоактивности. Радиоактивное излучение возникает при распаде ядер. Жесткая радиация облучает тела, вызывая измене-

ния в веществе, из которого они состоят. Поэтому есть несколько величин, описывающих радиоактивное излучение. Некоторые из них относятся к собственно радиоактивным материалам, другие описывают изменения в облучаемом веществе. Перечислим их.

1. *Радиоактивность (A)*. Это количество ядерных распадов, происходящих в образце радиоактивного вещества за одну секунду. Разумеется, величина A зависит от природы радиоактивного вещества и от его количества. Радиоактивность измеряется в *беккерелях* (Бк):

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Бк - единица СИ, но для практического использования она слишком мала. Обычно пользуются другой единицей, называемой *кюри* (Ки). Один кюри - это радиоактивность одного грамма радия. Известно, что за одну секунду в одном грамме радия происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ ядерных распадов. Следовательно, можно установить соотношение:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Когда исследуется радиоактивное заражение местности, используется такая единица, как кюри на квадратный километр (Ки/км²).

2. *Поглощённая доза (D)*. Это отношение энергии (W), поглощённой облучаемым телом, к массе этого тела (m):

$$D = W / m.$$

Разумеется, поглощенная доза измеряется в джоулях на килограмм. Такая единица получила название *грей* (Гр):

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Однако эта единица слишком велика для практического использования. Поэтому используется другая единица, *рад* (рад):

$$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}.$$

Когда говорят о радиоактивном облучении, используют единицы: 1 рад/год, 1 рад/час, 1 рад/с (рад в год, рад в час, рад в секунду).

3. *Экспозиционная доза (J)*. Это отношение заряда (Q), образующегося в сухом воздухе при облучении, к массе сухого воздуха (m):

$$J = Q / m.$$

Экспозиционная доза измеряется в кулонах на килограмм, или в рентгенах (Р):

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

(Множитель $2,58 \cdot 10^{-4}$ появляется при переводе единиц заряда в систему СИ и объёма воздуха в массу).

Можно легко установить следующие соотношения:

$$1 \text{ Р} = 8,77 \cdot 10^{-3} \text{ Гр} = 0,877 \text{ рад}$$

$$1 \text{ рад} = 1,14 \text{ Р.}$$

Обычно используют такие единицы, как рентген в час (миллирентген в час, микрорентген в час).

4. *Мощность дозы ($D\bullet$)*. Это отношение поглощенной дозы ко времени поглощения (τ):

$$D\bullet = \frac{dD}{d\tau}.$$

Можно связать мощность дозы с радиоактивностью:

$$D\bullet = K \cdot \frac{A}{r},$$

где r - расстояние между облучающим радиоактивным веществом и облучаемым телом;

K - *ионизационная постоянная*, коэффициент, характеризующий радиоактивное вещество.

Значение величины K для некоторых изотопов приведено в табл. 7.2. При исследовании радиоактивного заражения местности по принятому стандарту измерения проводятся на высоте 1,5 м от земной поверхности. Тогда:

$$D\bullet = \frac{K \cdot A}{2,25}.$$

Однако наиболее важным является воздействие радиации на организм человека. Поэтому введена еще одна, пятая единица.

Таблица 7.2

Значение ионизационной постоянной K для некоторых изотопов

Изотоп	Co ₆₀	J ₁₃₇	Cs ₁₃₄	U ₂₃₈
$K, \text{ Дж}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$	$1\cdot 10^{-16}$	$1,71\cdot 10^{-17}$	$6,8\cdot 10^{-17}$	$6,9\cdot 10^{-19}$

5. *Эквивалентная доза* (D_e). Это поглощенная доза, умноженная на коэффициент (k_e), зависящий от вида излучения. Соответствующая единица получила название *зиверт* (Зв):

$$D_e = k_e \cdot D.$$

Значение коэффициента k_e приведено в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Значение k_e для некоторых видов излучения

Вид излучения	Рентгеновское, излучение γ – лучи, β – лучи	Быстрые нейтроны, α – лучи	Осколки деления ядер
k_e Зв/Гр	1	10	20

Как видно из таблицы, наиболее опасными являются осколки деления ядер.

Для описания радиоактивности местности используются дольные единицы - миллизиверт (мЗв), микрозиверт (мкЗв), а для определения мощности дозы - миллизиверт в час (мЗв/ч), микрозиверт в час (мкЗв/ч). Можно легко установить соотношение:

$$100 \text{ мкР/ч} = 1 \text{ мкЗв/ч},$$

$$100 \text{ мР/ч} = 1 \text{ мЗв/ч}.$$

Теперь рассмотрим существующие нормы по основным единицам радиоактивности. По отношению к радиоактивному облучению население делится на три следующие группы.

1. Специалисты - люди, работающие с радиоактивными веществами и проходящие частый медицинский контроль.

2. Люди, иногда работающие с радиоактивными веществами.

3. Всё остальное население.

Нормы для этих групп населения различны. Поскольку первая группа проходит частый медицинский осмотр, причём у врачей существует по отношению к ним *радиационная настороженность*, то для этой группы нормы самые высокие. Для второй группы нормы приняты в десять раз меньше, для третьей – в сто раз меньше, чем для первой. В табл. 7.4 приведены нормы для этих трёх групп.

Допустимые нормы для трёх групп населения

Группа населения	A, Ки/км ²	D%, мкР/ч	D _е , мкЗв/ч
1	100	32500	325
2	10 - 20	3250	32
3	1 - 2	325	3
Естественный фон	0,1 ÷ 0,02	10 ÷ 20	~ 0,1 ÷ 0,2

Также в табл. 7.4 приведены величины естественного радиационного фона. Он может быть различным в разных районах. Так например, скальные породы (мрамор, гранит и т.д.) содержат радиоактивные изотопы, поэтому радиоактивный фон в скалистой местности несколько повышенный, до 0,3 - 0,4 мкЗв/ч. Это не является опасным. Однако если мощность дозы превышает 60 мкР/ч, метеоролог-наблюдатель обязан известить об этом органы власти.

Примерное значение удельной активности для пищевых продуктов составляет 100 - 200 Бк/кг. Не допускается применение пищевых продуктов с удельной активностью более 1 КБк/кг по β -излучению и 0,1 КБк/кг по α -излучению. Для строительных материалов (песок, щебень и т.д.) допустимые значения составляют не более 4 КБк/кг.

Теперь рассмотрим способы измерения радиоактивности. В настоящее время применяются четыре основных способа.

1. *Счётчики Гейгера*. Основной частью счётчика является газоразрядная трубка, содержащая газ при пониженном давлении (рис. 7.39, а и б).

Когда частица (нейтрон, α -частица и пр.) влетает в трубку, происходит ионизация молекул газа. Образовавшиеся ионы летят к заряженным электродам трубки – аноду и катоду. На своём пути они встречаются с другими молекулами газа. Длина свободного пробега (т.е. расстояние между молекулами) такова, что ионы успевают набрать скорость, достаточную для ионизации встретившейся молекулы. Тогда образуется новая пара ионов, которые также летят к электродам, ионизуют другие молекулы и т.д. Возникает лавинообразный процесс ионизации всех молекул газа в трубке. Трубка вспыхивает. Сопротивление трубки $R_{тр}$ резко падает. Наличие гасящего сопротивления $R_r \sim 10^7$ Ом приводит к тому, что при $R_{тр} \ll R_r$ напряжение анод-катод также резко падает и трубка гаснет моментально. При этом на выходе появляется импульс напряжения. Ясно, что число таких импульсов за фиксированный промежуток времени характеризует поток частиц,

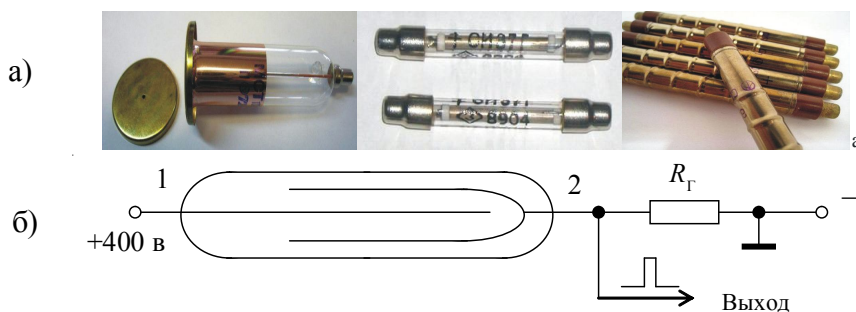


Рис. 7.39. Газоразрядная трубка. а) внешний вид; б) схема

т.е. уровень радиации. Оно может быть подсчитано счётчиками (описание цифрового счетчика дано ниже).

В дозиметре ДРГБ-01 используется цифровой счётчик, подсчитывающий количество импульсов за определённый интервал времени. Число, соответствующее подсчитанному количеству импульсов, представляется на цифровом индикаторе. Параметры прибора подобраны так, что это число равно активности, измеренной в микрозивертах в час или в килобеккерелях на килограмм.

2. *Пропорциональные счётчики.* Основной частью является та же трубка, но анодное напряжение выбирается значительно меньше, а давление газа больше. Из-за этого ускорение ионов слишком мало и лавинный процесс не возникает. В трубке присутствуют лишь отдельные ионы, образовавшиеся в результате ионизации потоком частиц. Возникает слабый ионный ток, величина которого пропорциональна уровню радиации. Для измерения тока применяются стрелочные или цифровые приборы, включённые последовательно с трубкой. Гасящее сопротивление в этом случае не ставится.

3. *Сцинтилляционные счётчики.* В этих приборах используется свойство некоторых веществ светиться при радиоактивном облучении (сцинтилляция). Образец сцинтиллятора помещается рядом с катодом ФЭУ. Частота возникающих при попадании частиц на сцинтиллятор световых вспышек фиксируется ФЭУ (глава 1, раздел 1.10) и может быть измерена счётчиком или частотомером. Сцинтилляционные счетчики являются самыми чувствительными.

4. *Радиофотолуминесцентный метод.* Радиофотолуминесцентный метод заключается в том, что в облучающий поток ионизирующего излучения вносится образец стекла на основе четырехоксида фосфора PO_4 . Под

действием излучения происходит перестройка кристаллической структуры стекла с образованием центров люминисценции. Более длительное пребывание в потоке излучения приводит к образованию большего количества центров. С другой стороны, более интенсивный поток излучения также способствует образованию большего количества центров. Таким образом, количество образовавшихся центров пропорционально поглощенной образцом дозе радиации. Затем образец облучается ультрафиолетовым световым потоком. Если в образце присутствуют центры люминисценции, то образец начинает светиться в видимой части спектра. Легко понять, что интенсивность возникающего видимого свечения зависит от поглощенной образцом дозы. Интенсивность свечения легко измерить с помощью ФЭУ.

Такие измерения проводятся в тех случаях, когда необходимо определить интегральную величину поглощенной дозы за достаточно большой временной интервал – например, за сутки, неделю, месяц или более длительный срок.

Рассмотрим теперь схему цифрового счётчика для подсчёта импульсов за фиксированное время (рис. 7.40). Работа счётчика начинается с подачи импульса на вход запуска (обычно нажатием кнопки). Триггер перебрасывается и на его выходе возникает логическая единица, поступающая на две схемы “И”.

Через верхнюю схему “И” на счётчик (C_1) проходят импульсы с трубки, количество которых подсчитывается счётчиком. Таким образом, на его выходе возникает число в двоичном коде, которое вырастает по мере поступления импульсов. Преобразователь (X/Y) переводит двоичный код в код управления световыми индикаторами, отображающими результат подсчёта.

Нижняя часть схемы представляет собой таймер – устройство для определения промежутка времени счёта. Через нижнюю схему “И” на счётчик C_2 проходят импульсы фиксированной частоты с генератора (G). Результат подсчёта (в двоичном коде) переводится в напряжение с помощью ЦАП. Так как этот результат все время возрастает, то напряжение $U_{\text{цап}}$ также растёт. При превышении величины $U_{\text{оп}}$ ($U_{\text{цап}} > U_{\text{оп}}$) на выходе компаратора (K) возникает логическая единица, поступающая на R-вход триггера и перебрасывающая триггер. Возникающий на выходе триггера логический ноль запирает обе схемы “И”, подсчёт импульсов прекращается и число на индикаторах перестаёт изменяться.

При правильном подборе величины $U_{\text{оп}}$ это число отражает уровень радиации в заданных единицах (мР/ч, мкР/ч, и т.д.). Величину опорного

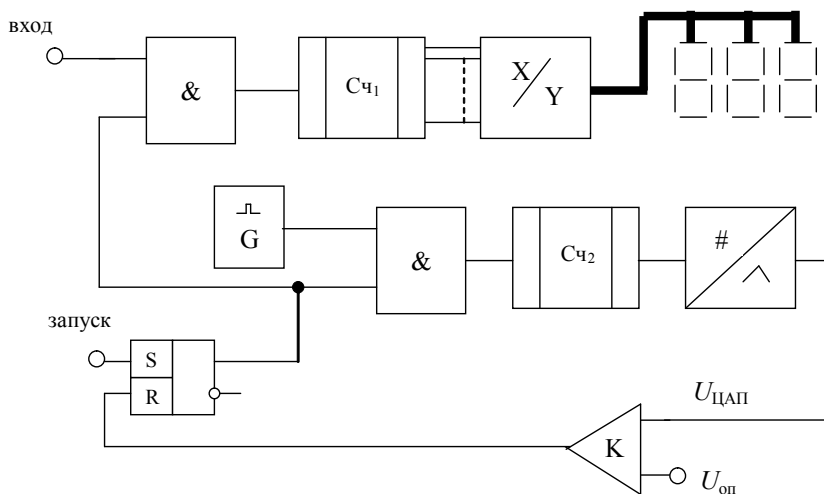


Рис. 7.40. Схема цифрового счетчика Гейгера

напряжения $U_{оп}$ можно регулировать с помощью потенциометра (на схеме он не показан). Такая регулировка проводится при настройке прибора перед измерением. Внешний вид цифрового счётчика Гейгера (дозиметра) представлен на рис. 7.41.



Рис. 7.41. Дозиметр

Глава 8. КОМПЛЕКСНАЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ АЭРОДРОМНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ КРАМС-2

Станция КРАМС-2 размещается на аэродромах и предназначена для измерения всех метеопараметров, необходимых для обеспечения безопасности полетов. С помощью КРАМС-2 измеряются следующие метеовеличины:

1. Атмосферное давление - давление в точке расположения датчика и приведенное к уровню моря (последняя величина вычисляется);
2. Температура воздуха;
3. Относительная влажность воздуха;
4. Параметры ветра:
 - средняя скорость ветра за 2 мин,
 - максимальная скорость ветра за 10 мин,
 - максимальная скорость ветра за 10 мин в направлении, перпендикулярном взлетно-посадочной полосе (ВПП),
 - направление ветра;
5. Метеорологическая дальность видимости по трем датчикам, установленным в начале, в середине и в конце ВПП;
6. Высота нижней границы облачности по двум датчикам (в начале и в конце ВПП);
7. Наличие близких гроз.

Станция КРАМС-2 полностью автоматизирована. Все данные представляются потребителю на специальном световом табло и в виде телеграмм, отпечатанных на рулоне телетайпа в разных форматах. Все телеграммы передаются по линиям связи на другие аэродромы.

Рассмотрим блок-схему станции КРАМС-2 (рис. 8.1). В левой колонке изображены датчики станции. Их можно разделить на три группы.

1. Датчик, установленный в помещении - датчик давления (ДД).
2. Датчики, установленные на метеоплощадке. Их несколько:
 - датчик параметров ветра (ДПВ);
 - блок датчиков температуры и влажности (БДТВ);
 - датчик близких гроз (ДГ).
3. Датчики, расположенные около ВПП:
 - второй датчик параметров ветра (ДПВ);
 - датчики метеорологической дальности видимости ФИ-1;
 - датчики высоты нижней границы облаков РВО-2м.

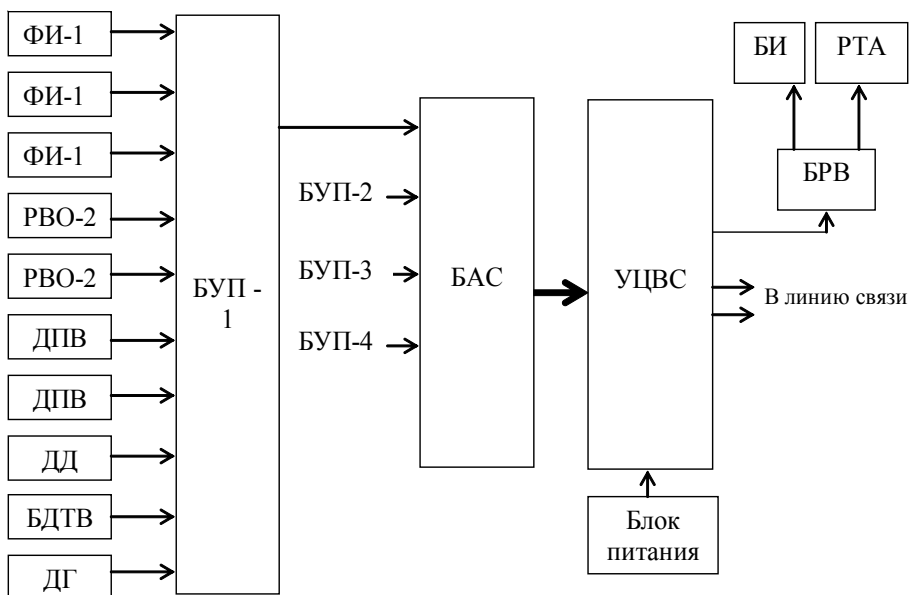


Рис. 8.1. Блок-схема станции КРАМС-2

Все датчики соединены с *блоком управления и преобразования* (БУП) с помощью кабелей.

Станция КРАМС-2 может комплектоваться несколькими БУП (блок управления и преобразования), по одному на каждый рабочий старт. Первый (БУП-1) считается главным, к нему подключены все перечисленные датчики. К остальным БУП подключены только датчики, расположенные на других ВПП аэродрома. Перечислим функции, выполняемые БУП.

1. Коммутация сигналов датчиков. БУП по очереди подключает каждый датчик и регистрирует сигналы, приходящие от них.

2. Первичная обработка сигналов - перевод в цифровую форму и вычисление метеопараметров.

3. БУП содержит программу работы, записанную в ячейках постоянных запоминающих устройств (ПЗУ).

4. БУП даёт возможность пошагового выполнения всей программы с помощью клавиатуры. Таким образом, можно найти ошибки в программе.

Затем сигналы с БУП подаются в *блок автономной связи* (БАС).

Он выполняет следующие функции.

1. Индикация всех метеопараметров на световых индикаторных элементах в строке на передней панели БАС.

2. Индикация подключения датчиков к БУПу в данный момент.
3. Индикация исправности датчиков.

Таким образом, с помощью БАС можно узнать все измеряемые метеопараметры.

После прохождения БАС сигналы поступают в УЦВС – *устройство специальное вычислительное специализированное*. Его функции следующие.

1. УЦВС содержит программу работы всей станции.
2. УЦВС коммутирует сигналы с БУПов.
3. УЦВС содержит клавиатуру, позволяющую ввести вручную любой метеопараметр, если один или несколько датчиков неисправны.
4. Клавиатура УЦВС даёт возможность пошагового выполнения всей программы работы станции.
5. С помощью УЦВС вводятся все необходимые для работы станции числовые данные (курс ВПП в градусах, время, дата, ступень огня высокой интенсивности, периодичность выдачи телеграмм).
6. С помощью УЦВС вводятся те метеопараметры, которые не могут быть измерены датчиками станции, а наблюдаются оператором: количество и форма облачности, особые явления погоды (по коду КН-01).
7. УЦВС осуществляет окончательную обработку сигналов и составление телеграмм в различных кодах (МЕТАР, КН-01, БИ, ШТОРМ).
8. УЦВС даёт возможность запросить новые данные в промежутках между подачей телеграмм.

Сигналы с УЦВС в форме телеграмм посылаются по линиям связи в другие аэропорты. Эти же телеграммы поступают в *автономное индикаторное устройство* (АИУ), где телеграммы записываются *рулонным телеграфным аппаратом* (РТА) и таким образом составляется банк данных. АИУ содержит также *индикаторное устройство* (ИУ), где все метеопараметры высвечиваются на табло. Это табло обычно вывешивается на стену. КРАМС-2 комплектуется пятью такими табло, которые могут быть размещены в разных помещениях.

Клавиатура телетайпа даёт возможность добавить несколько коротких слов в каждый формат телеграммы (например: “погода без изменений”, “ВПП мокрая” и т.п.). Телеграммы с этими добавлениями передаются по линиям связи.

Блок ручного ввода (БРВ) предназначен для ручного ввода метеопараметров в случае отказа БАС или УЦВС. При вводе данных с БРВ метеопараметры высвечиваются на цифровом табло, но телеграммы в ли-

нию связи не передаются. Поэтому предпочтительнее вводить данные с помощью УЦВС.

Дальнейшее изучение станции КРАМС-2 будет заключаться в достаточно подробном изучении датчиков станции. Конструкция электронных блоков (БУП, БАС, УЦВС и пр.) в рамках нашего учебника изучаться не будет.

8.1. Датчик атмосферного давления станции КРАМС-2

Датчик станции КРАМС-2 может измерять атмосферное давление в диапазоне 570 - 1090 гПа. Конструкция датчика показана на рис. 8.2.

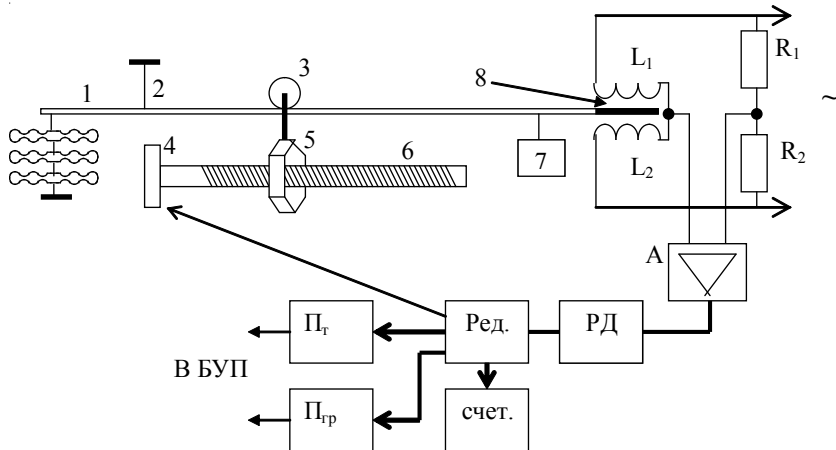


Рис. 8.2. Датчик давления КРАМС-2 (блок-схема)

Чувствительным элементом датчика является сильфон (рис. 8.2). Его нижняя часть укреплена неподвижно, а верхняя соединена с коротким плечом рычага (1), подвешенного в точке (2). Длинное плечо рычага нагружено двумя грузами: подвижным (3) и неподвижным (7). Рычаг имеет ферритовый наконечник (8). Если атмосферное давление (и связанная с ним сила воздействия сильфона на рычаг) уравновешено грузами, то наконечник рычага находится в положении, которое мы будем называть *нулевым*. Если же давление изменяется, наконечник передвигается вверх или вниз от нулевого положения. Чтобы снова уравновесить рычаг, достаточно передвинуть груз (3) вправо или влево. Если это делать при каждом изменении давления, то можно сказать, что положение груза (3) однозначно связано с давлением. Определив положение груза, можно изме-

ритель давление. В определенном смысле датчик давления весьма схож с весами для взвешивания тела. Но для автоматизации измерений необходимо решить следующие задачи:

1. Каким образом отслеживать положение наконечника (8)?
2. Как обеспечить автоматическое передвижение груза (3) в нужную сторону при выходе рычага из равновесия?
3. Как сформировать электрический сигнал, величина которого связана с давлением?

Будем рассматривать эти задачи по очереди.

Для отслеживания положения наконечника применяется мостовая схема нуль-индикатора, состоящая из четырех плеч - L_1 , L_2 , R_1 и R_2 . В этой схеме вместо резисторов в двух плечах применены катушки. Но обратим внимание на то, что схема питается переменным током и следовательно, катушки обладают реактивным сопротивлением X_L :

$$X_L = \omega \cdot L,$$

где ω - угловая частота переменного тока;

L - индуктивность катушки.

С другой стороны, индуктивность катушки зависит от близости к ней ферритового наконечника. Она увеличивается при приближении наконечника к катушке. Если $L_1 = L_2$, схема уравновешена, сигнал в измерительной диагонали равен нулю. Но при изменении давления наконечник выходит из нулевого положения, изменяются реактивные сопротивления L_1 и L_2 , и появляется сигнал разбаланса - переменное напряжение. Его амплитуда зависит от того, насколько далеко отошел наконечник из нулевого положения, а фаза определяется тем, в какую сторону изменяется давление, т.е. увеличивается оно или уменьшается.

Усилитель (А) усиливает сигнал разбаланса. Затем сигнал подается на реверсивный двигатель РД. Реверсивный двигатель начинает вращаться, причём направление его вращения определяется разностью фаз между сигналом разбаланса и опорным напряжением. В конечном счёте, эта разность фаз зависит от направления изменения давления.

Реверсивный двигатель вращает редуктор (РЕД). Его последняя шестерня (4) соединена с винтом (6), который тоже вращается. На винте находится гайка (5). Она не вращается. Но при вращении винта гайка перемещается вправо или влево и передвигает груз (3), с которым она соединена. Таким образом уравновешивается рычаг. Когда наконечник снова оказывается в нулевом положении, сигнал разбаланса исчезает и реверсивный двигатель останавливается.

Обратим внимание, что датчик давления КРАМСа является уже знакомой нам следящей системой. В результате сильфон не изменяет своей формы, так как любое её изменение сразу же компенсируется. Такой метод измерения получил название *нулевого*, или *силокомпенсационного* метода. Его преимущество заключается в том, что исчезает упругий гистерезис сильфона - один из основных источников погрешности.

Теперь решим третью из поставленных задач - формирование электрического сигнала. Для этого предусмотрены два потенциометра: грубый ($\Pi_{гр}$) и точный ($\Pi_{т}$). Ползунки потенциометров вращаются вместе с винтом, но грубый и точный потенциометры вращаются с разной скоростью. Грубый потенциометр делает только один оборот при изменении давления во всем измеряемом диапазоне, точный потенциометр делает много оборотов. Таким образом, по напряжениям, снимаемым с точного и грубого потенциометров, можно определить давление с большой точностью. Точный и грубый потенциометры можно сравнить с минутной и часовой стрелкой часов, по которым можно точно определить время. Сигналы с потенциометров подаются в БУП.

Для определения давления непосредственно по датчику предусмотрен механический счётчик (СЧЁТ), показывающий давление с точностью до 0,1 ГПа. На индикаторном устройстве давление показывается с точностью до 1 ГПа. Напомним, что на индикаторном устройстве показывается приведенное давление, поэтому эта величина несколько выше показаний по счетчику. Настройка датчика осуществляют перемещением груза (7) в небольших пределах.

8.2. Датчик температуры и влажности КРАМС-2

Для измерения относительной влажности в станции КРАМС-2 применяется психометрический метод. Как известно, для этого необходимы два термометра: сухой и смоченный. Поэтому можно сказать, что измерение температуры и влажности осуществляется одним датчиком. Разумеется, термометры должны быть дистанционными, например, терморезисторами. Однако для осуществления этого способа необходимо решить по меньшей мере две следующие задачи.

1. Осуществить автоматическое смачивание терморезистора.
2. Как измерить влажность в холодное время года, когда вода, смачивающая терморезистор, замерзает?

Для решения первой задачи собрана конструкция, показанная на рис. 8.3.

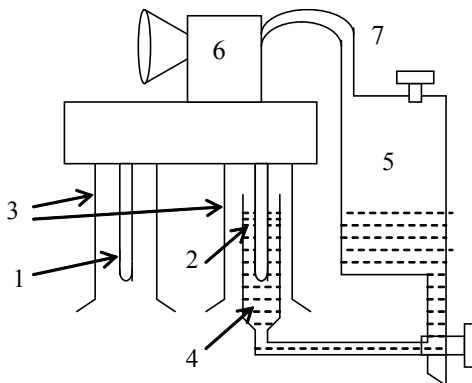


Рис. 8.3. Датчик температуры и влажности

Терморезисторы (1) и (2) помещены в металлические трубки (3). Смоченный терморезистор (2) находится также внутри узкой трубки (4), соединённой с сосудом (5). В сосуде находится вода. Уровень воды в сосуде (5) и в трубке (4) одинаковый. Таким образом, в промежутках между измерениями терморезистор (2) покрыт водой. За пять минут до измерений включается вентилятор (6) и начинается аспирация терморезисторов. Вместе с тем вентилятор откачивает воздух из сосуда (5) по трубке (7). Давление в сосуде понижается и вода из трубки (4) всасывается в сосуд. Смоченный терморезистор оказывается в потоке воздуха. Через пять минут, когда температура обоих терморезисторов стабилизируется, снимаются показания их температуры, и вентилятор выключается. Включение и выключение вентилятора, снятие показаний осуществляется автоматически по программе, записанной в БУПе.

Электрическая схема датчика показана на рис. 8.4. Она представляет собой неуравновешенный термометр сопротивления.

Когда ключи K_1 и K_2 находятся в верхнем положении, мостовая схема состоит из резисторов $R_2 - (R_4 + R_C) - R_6 - R_5$, где R_C - сухой терморезистор. Сигнал с измерительной диагонали подается в БУП. Затем ключи переключаются в нижнее положение и мостовая схема включает в себя резисторы $R_1 - (R_{CM} + R_3) - R_6 - R_5$, где R_{CM} - смоченный терморезистор. Сигнал, подаваемый в БУП, зависит теперь от температуры смоченного терморезистора.

Малоомные переменные резисторы R_3 и R_4 являются настроечными и регулируются при настройке датчика.

Этот метод используется для измерения влажности при положитель-

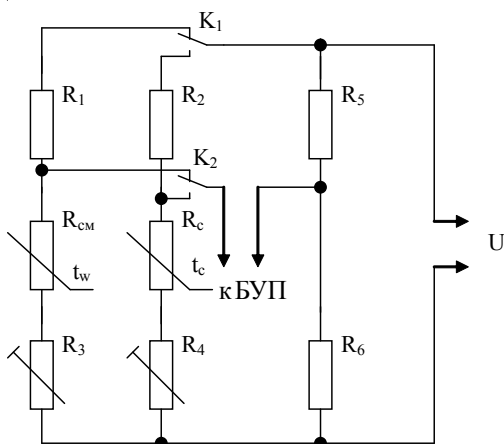


Рис. 8.4. Электрическая схема ДТВ КРАМС-2

ной температуре. При слабых заморозках, когда температура не ниже -4° , воду разбавляют спиртом до 4%, чтобы предотвратить замерзание.

Для решения второй задачи, при температуре ниже -4° , применяется волосной гигрометр, конструкция которого показана на рис. 8.5. Чувствительным элементом датчика является волосная гитара (1), нижний конец которой закреплён неподвижно. Верхний конец гитары может двигаться вверх или вниз в зависимости от влажности. Вместе с ним передвигается система рычагов (2), которая поворачивает ось (3). Пружина (4) оттягивает верхний конец гитары. Таким образом, угол поворота оси зависит от влажности. Стрелка (5) показывает значение влажности по шкале.

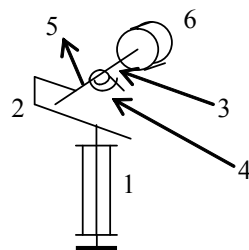


Рис. 8.5. Волосной гигрометр ДТВ

Для преобразования значения влажности в электрический сигнал применяется *преобразователь угла поворота в напряжение* (6). Схема этого блока приведена на рис. 8.6. Ротор с железным сердечником поворачивается вместе с осью. На обмотку L_1 подаётся переменный ток. Его

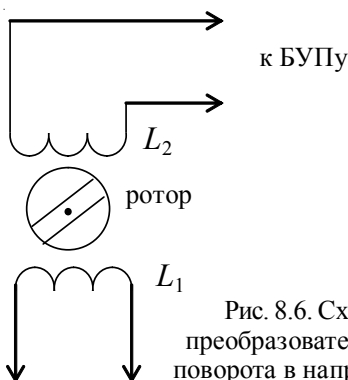


Рис. 8.6. Схема преобразователя угла поворота в напряжение

амплитуда стабилизирована. Обмотка L_2 связана с L_1 трансформаторной связью. Переменное напряжение, снимаемое с обмотки L_2 , зависит от положения ротора, т.е. от влажности. В дальнейшем оно выпрямляется и подаётся в БУП. Точность измерения влажности составляет 5% по психрометру и 10% по гигрометру. Температура измеряется в пределах от -60° до $+50^{\circ}$ с точностью до $0,2^{\circ}$.

Напомним, что УЦВС вычисляет температуру точки росы по измеренным значениям температуры и влажности.

8.3. Датчик близких гроз

Для получения информации о наличии близких гроз воспользуемся тем, что при молниевых разрядах электрическое поле резко изменяется. Чувствительный элемент датчика - электростатическая антенна представляет собой довольно большую пластину, помещённую на семиметровую мачту (рис. 8.7).

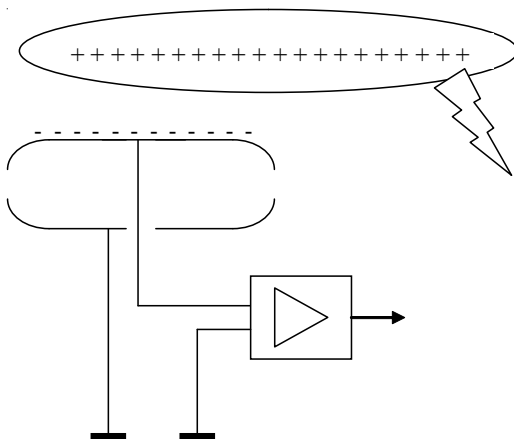


Рис. 8.7. Антенна датчика близких гроз

Когда заряженное грозовое облако находится непосредственно над датчиком или в ближней зоне аэродрома, на антенну приходят заряды противоположного знака. Они приходят с земли через входное сопротивление усилителя. Значение этого сопротивления достаточно велико (порядка 10^6 Ом). При молниевом разряде облако частично разряжается и часть зарядов с антенны уходят в землю. На входе усилителя появляется слабый импульс тока, который мы будем называть *грозовым импульсом*.

Именно наличие или отсутствие грозовых импульсов служит сигналом о наличии или отсутствии гроз.

Блок-схема дальнейших каскадов датчика показана на рис. 8.8.

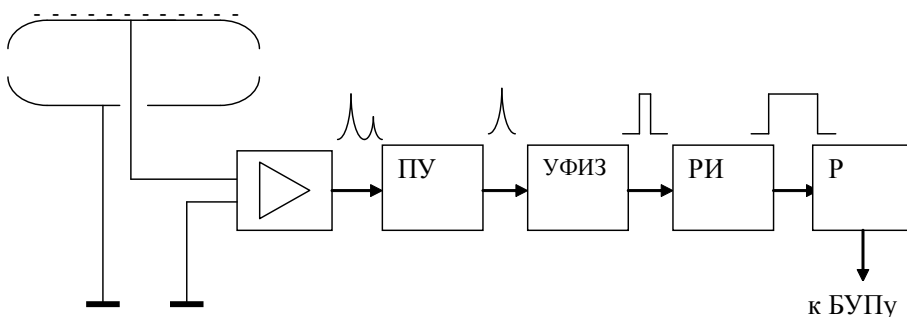


Рис. 8.8. Блок-схема датчика близких гроз КРАМС-2

Усиленные грозовые импульсы приходят на *пороговое устройство* (ПУ). Пороговое устройство пропускает импульсы с большой амплитудой (от близких гроз) и не пропускает слабые импульсы от дальних гроз. Амплитудный порог может регулироваться.

Таким образом, следовательно, регулируется радиус действия датчика. Далее импульс поступает на *усилитель-формирователь импульсов запуска* (УФИЗ). Этот блок генерирует прямоугольные импульсы при поступлении на него грозовых импульсов.

Следующий блок – *расширитель импульсов* увеличивает длительность прямоугольных импульсов до величины, позволяющей электромагнитному реле (Р) сработать и замкнуть контакты, через которые в БУП поступает токовый сигнал. По получении такого сигнала станция КРАМС переходит в штормовой режим (показания снимаются через 15 с).

Если в течение 15 мин не поступает следующий грозовой импульс, грозовая ситуация считается закончившейся и станция переходит в срочный режим работы.

8.4. Датчик параметров ветра КРАМС-2

Датчик параметров ветра КРАМС-2 представляет собой устройство, аналогичное датчику анеморумбометра М-63м (глава 7, раздел 7.8). Единственным отличием является применение герконов вместо импульсаторов.

8.5. Датчик метеорологической дальности видимости КРАМС-2

Датчиком метеорологической дальности видимости КРАМС-2 является импульсный фотометр ФИ-1 (глава 7, раздел 7.6), непосредственно подключенный к БУПу.

8.6. Датчик высоты нижней границы облачности КРАМС-2

В датчике высоты нижней границы облачности КРАМС-2 применены приёмник и передатчик прибора РВО-2м. Они соединены со специальным блоком, называемом “датчик высоты облаков”, ДВО (рис. 8.9). Этот блок ДВО соединён с БУПом. Блок ДВО размещается в помещении непосредственно рядом с БУПом, БАСом и УЦВС.

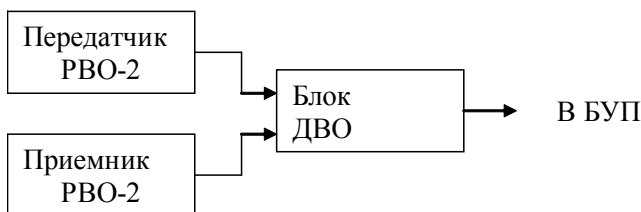


Рис. 8.9. Схема соединений датчика высоты нижней границы облачности

Блок ДВО выполняет следующих функций:

1. Генерирует сигналы с частотой 1 Гц для зажигания импульсной лампы передатчика.
2. ДВО измеряет временной промежуток с момента зажигания импульсной лампы до момента прихода облачного импульса.
3. Переводит аналоговый сигнал в цифровую форму.
4. ДВО анализирует сигнал: осредняет результаты по 8 измерениям и отбрасывает ложные сигналы (не более двух из восьми), если в безоблачном небе появляются сигналы от случайных объектов или при случайных просветах в облаках.

Глава 9. СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

9.1. Принцип передачи неподвижных изображений

Рассмотрим, каким образом изображение может быть передано с помощью электрического сигнала. Передать изображение по радио или проводной связи - значит передать информацию о яркости каждой точки изображения.

Поскольку, однако, точек бесконечное множество, то речь идёт о малых участках площади изображения. Какие-либо детали внутри такого участка различить при этом невозможно, поэтому площадь элементарных участков выбирается столь малой, чтобы человеческий глаз с некоторого расстояния воспринимал бы изображение, как слитное.

Если изображение рассматривается с расстояния 30-35 см (как, например, при чтении книги), то минимальный размер рассматриваемых деталей составляет 0,2 - 0,3 мм. Следовательно, если размер элементарной площадки составляет 0,2 - 0,3 мм, то этого вполне достаточно для передачи метеорологических карт, изображения облаков и земной поверхности на экран монитора.

Любая система передачи изображений характеризуется *разрешающей способностью*, численно равной количеству элементов (линий), которые могут быть различимы на участке изображения длиной 1 мм. Ясно, что если размер элементарной площадки $0,2 \times 0,2$ мм, то разрешающая способность системы не может быть более чем 5 линий на миллиметр (лин/мм).

Итак, изображение, подлежащее передаче, разбивается на множество элементарных площадок, и в линию связи (связь может быть проводной или по радио) последовательно передаются импульсы, амплитуда которых пропорциональна яркости площадки (амплитудная модуляция). В белых местах амплитуда велика, в темных – мала. В системах передачи изображений с метеорологических ИСЗ яркость элементарных площадок кодируется изменением частоты сигнала по определенному закону (частотная модуляция).

В каком же порядке передаются импульсы? Для установления очерёдности передачи принято *правило строчной развертки* (рис. 9.1). Согласно этому правилу, первым передается импульс от левой верхней площадки, вторым - от той, которая лежит справа от неё, и так далее до

правого края изображения. Таким образом передается одна строка. Затем в том же порядке (слева направо) передается следующая строка - вторая сверху. Так передаются все строки до самой нижней. Вся последовательность передаваемых строк называется *растром*. Время передачи всего растра может быть различным: в телевизионных системах это сотые доли секунды, в факсимильных аппаратах (при передаче метеорологических карт) - десятки минут. При передаче изображения со спутника время передачи всего растра составляет 3,5 мин. Заметим, что при приеме спутниковых фотографий первой передается нижняя строка (справа налево), а последней - верхняя строка снимка. Это связано с техническими особенностями приемной и передающей аппаратуры.

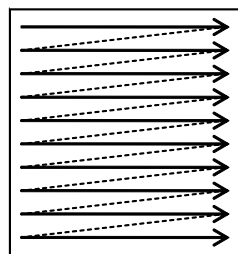


Рис. 9.1. Правило строчной развертки

Введём определения некоторых терминов, которыми будем пользоваться в дальнейшем.

Шаг развертки - расстояние между соседними строками по вертикали (обычно в миллиметрах).

Скорость передачи - количество строк, передаваемых в единицу времени (обычно в минуту).

Очень важно синхронизовать приём и передачу сигнала. Иначе говоря, это означает, что сканирование по изображению-оригиналу должно осуществляться с точно такой же скоростью, как и сканирование записывающего устройства при построении копии. Более того, если в данный момент времени передается элемент, находящийся на определенном месте строки, то запись его должна осуществляться точно в том же месте строки. Это требование будем называть *фазированием*. Ясно, что для получения хорошей копии должны соблюдаться требования синхронизации и фазирования.

9.2. Принцип действия факсимильных аппаратов

Факсимильные аппараты предназначены для передачи изображения с помощью проводной или радиосвязи. В метеорологии они используются для передачи и приёма метеорологических карт. Рассмотрим теперь блок-схему факсимильного аппарата (рис. 9.2).

Главной системой в передающем аппарате является *оптическая система*. Она содержит источник света и другие оптические элементы, соз-

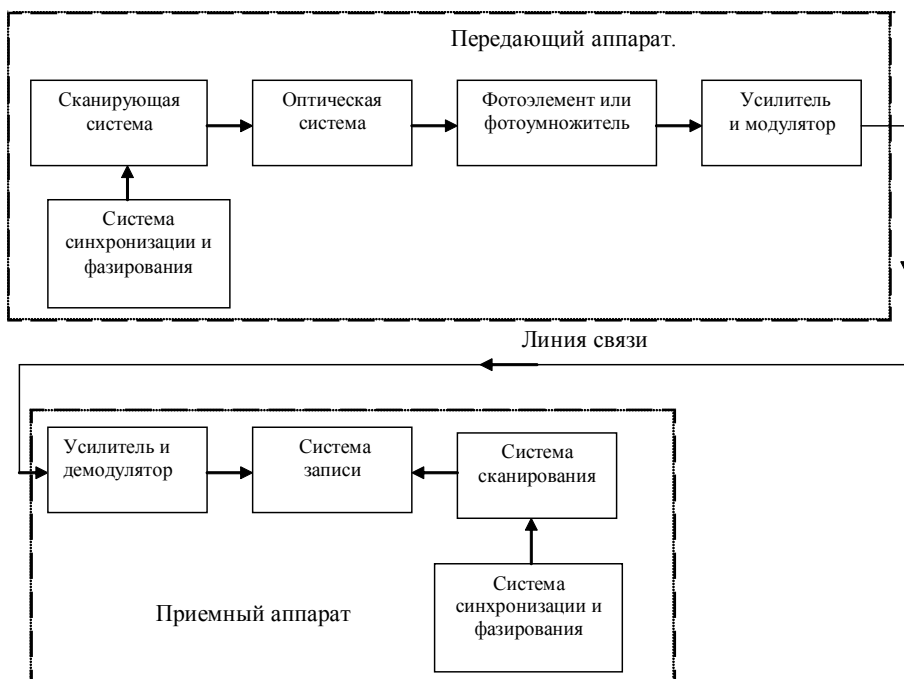


Рис. 9.2. Блок-схема факсимильного аппарата

дающие световой пучок, освещающий элементарный участок изображения-оригинала. Отраженный от оригинала пучок света направляется на *фотоэлемент* или *фотоумножитель*. Система сканирования предназначена для обеспечения движения светового пятна или записывающего устройства по бумаге согласно закону строчной развертки (рис. 9.1).

Система синхронизации и фазирования передающего устройства генерирует специальные импульсы в конце строки. Эти импульсы являются сигналами для приёмного аппарата. Согласно им проводится фазирование работы аппарата, т. е. «подгонка» начала и конца строк к левому и правому краю бумаги, на которой производится запись. Длительность фазизирующих импульсов равна $1/18$ от длительности строки.

ФЭУ преобразует оптический сигнал в электрический. Значит, от белых участков изображения сигнал максимальный, от чёрных – минимальный или равен нулю. В дальнейшем электроусилительный тракт, содержащий усилитель и модулятор, преобразует сигнал в *частотно-модулированный*, т. е. чёрным участкам соответствует максимальная частота синусоидального сигнала, а белым – минимальная. В действительности исполь-

зуется ещё более сложный вид модуляции – *амплитудно-частотно-модулированный сигнал*, однако рассмотрение этого вида модуляции выходит за рамки данного курса.

Модулированный сигнал подаётся в *линию связи*. Это может быть проводная связь (например, телефонная) или радиосвязь. В последнем случае в блок-схему, изображённую на рис. 9.2, следует добавить радиопередатчик и радиоприёмник. В приёмном аппарате сигнал снова усиливается и подвергается *демодуляции*, т. е. преобразуется в постоянное напряжение. Это напряжение имеет два возможных уровня: высокий уровень, соответствующий чёрным участкам, и низкий (или нулевой) уровень, соответствующий белым участкам. Разумеется, фазирующие импульсы проходят те же преобразования, уровень сигнала в них соответствует уровню черного. Далее сигнал идет на систему записи.

Применяются различные системы записи. В настоящее время большое распространение получила запись в память компьютера с последующей распечаткой на струйном или лазерном принтере.

В заключение приведём параметры применяющихся в России метеорологических факсимильных аппаратов.

Скорость передачи составляет 60, 90, 120 и 240 строк в минуту. Поскольку высокая скорость передачи ухудшает качество изображения, то наиболее важные карты передаются малой скоростью (например, «Анализ приземный»).

Шаг развёртки – 0,53 или 0,265 мм. Шаг развёртки непосредственно связан с разрешающей способностью. Для получения изображения высокого качества применяется малый шаг развёртки.

Разрешающая способность зависит от перечисленных выше параметров. Наиболее высокая разрешающая способность может быть получена при печати карты на принтерах.

9.3. Устройство метеорологических спутников. Системы ориентации

Зондирование атмосферы с искусственных спутников Земли (ИСЗ) и прежде всего, фотографирование земной поверхности является важным источником информации для анализа и прогноза метеорологической ситуации. Рассмотрим блок-схему основной аппаратуры, помещаемой на МСЗ (рис. 9.3). Она состоит из четырех основных систем: система электропитания (4), система ориентации спутника (3), система управления

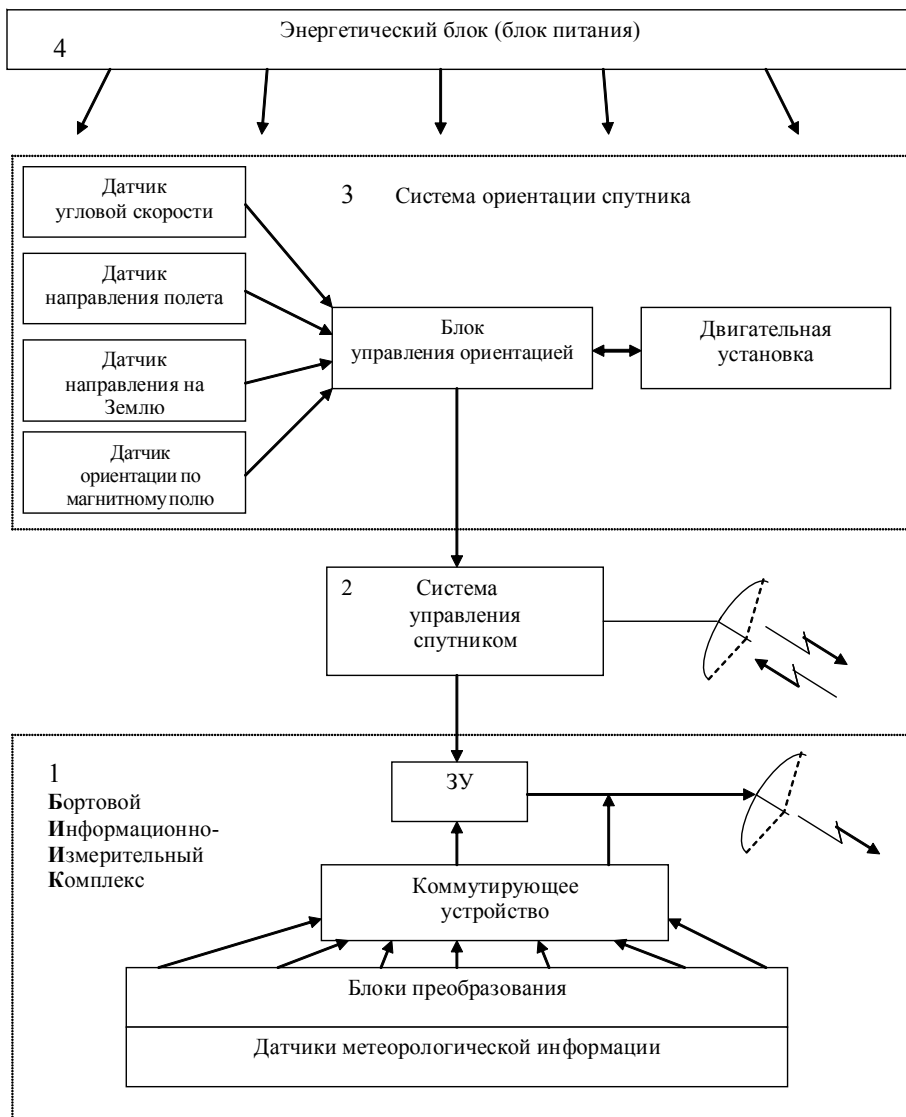


Рис. 9.3. Основные блоки метеорологического искусственного спутника Земли

спутником (2) и бортовой информационно-измерительный комплекс (БИИК) (1). Разумеется, для метеоизмерений представляет интерес именно этот последний комплекс. Тем не менее, рассмотрим коротко и другие блоки.

Энергетический блок - это, чаще всего, солнечные батареи с аккумулятором.

Блок управления ориентацией имеет несколько датчиков: датчик угловой скорости, датчик направления полета, датчик направления на Землю и датчик магнитного поля. Последний датчик представляет наибольший интерес, так как даёт возможность измерить составляющие магнитного поля Земли, что само по себе является важной исследовательской задачей.

Следующим является блок управления. Этот блок снабжен антенной для приёма и передачи сигналов на Землю. Управление спутником осуществляется, как правило, из ЦУПа и включает в себя корректировку орбиты спутника, корректировку его положения в пространстве и скорости полёта.

Теперь рассмотрим более подробно систему ориентации спутника. Ориентация спутника может быть *пассивной* (это понятие включает в себя только получение информации о положении спутника в пространстве) или *активной* (получение информации и корректировка положения спутника). В настоящее время все спутники снабжаются системой активной ориентации. Для корректировки положения спутника в пространстве используются двигательные установки.

Активная система ориентации представляет собой пример следящей системы с отрицательной обратной связью. Действительно, при отклонении положения спутника от желаемого система генерирует сигнал разбаланса, который после усиления подается на двигательную установку и таким образом положение спутника в пространстве корректируется. Сигнал разбаланса при этом исчезает.

Итак, самое главное - получение информации о положении спутника в пространстве. В связи с этим рассмотрим более подробно систему магнитной ориентации спутника. Она представляет собой своеобразный “космический компас” и состоит из трех взаимно перпендикулярных датчиков магнитного поля. Векторное сложение составляющих магнитного поля даёт величину и направление общего магнитного поля.

Теперь рассмотрим в общих чертах устройство бортового информационно-измерительного комплекса (БИИК). Он снабжен запоминающим устройством (ЗУ), которое записывает всю информацию, поступающую с датчиков. Затем информация передается на Землю.

Коммутирующее устройство подключает датчики к запоминающему устройству поочередно. Предусмотрена возможность непосредственной

передачи на Землю сигналов с датчиков, без записи в ЗУ. Перед передачей на Землю или записью в ЗУ сигналы с датчиков преобразуются к виду, удобному для записи. Это делают блоки преобразования.

Основная информация, даваемая метеорологическими спутниками - получение изображения земной поверхности. На основании телевизионного изображения можно наглядно представить себе метеорологическую ситуацию в обширном регионе. Тем не менее, спутники оснащены и другими датчиками: инфракрасными радиометрами, актинометрическим датчиками и т.п.

9.4. Параметры орбит искусственных спутников Земли

При решении практических задач, связанных с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ) требуется знать положение спутника в пространстве в любой момент времени. Положение спутника в пространстве в любой момент времени задается с помощью шести величин, они называются элементами орбиты спутника. Координатная система, в которой задается плоскость орбиты, выбрана так, чтобы суточное и годовое вращение Земли вызывало наименьшее изменение координат этой плоскости.

В качестве точки отсчёта, в астрономических задачах, выбирается точка, где находится Солнце в момент перехода через экватор из южного полушария в северное в день весеннего равноденствия. Эта точка называется точкой Овна Υ (рис. 9.4). $P_N P_S$ – ось мира, относительно которой построена небесная сфера, где показаны экватор и точка Овна. Плоскость эллиптической орбиты проходит через центр сферы O так, что один из её фокусов попадает в точку O . Точка A_O называется апогей, это наиболее удалённая точка орбиты от Земли, а точка P_O – перигей, это самая близкая к Земле точка орбиты. Точки пересечения проекции орбиты на небесную сферу с экватором U_B и U_H называются узлами орбиты – восходящим и нисходящим, а линия $U_B U_H$ – *линией узлов*. Апогей и перигей проецируются на небесную сферу в точки A и P , линия соединяющая их называется *линией апсид*.

Положение плоскости орбиты в пространстве задаётся двумя элементами: прямым восхождением восходящего узла Ω и наклонением орбиты i . Прямое восхождение - это угол между направлением в точку весеннего равноденствия Υ и восходящим узлом U_B , а наклонение – угол между плоскостью экватора и плоскостью орбиты. Ориентация эл-

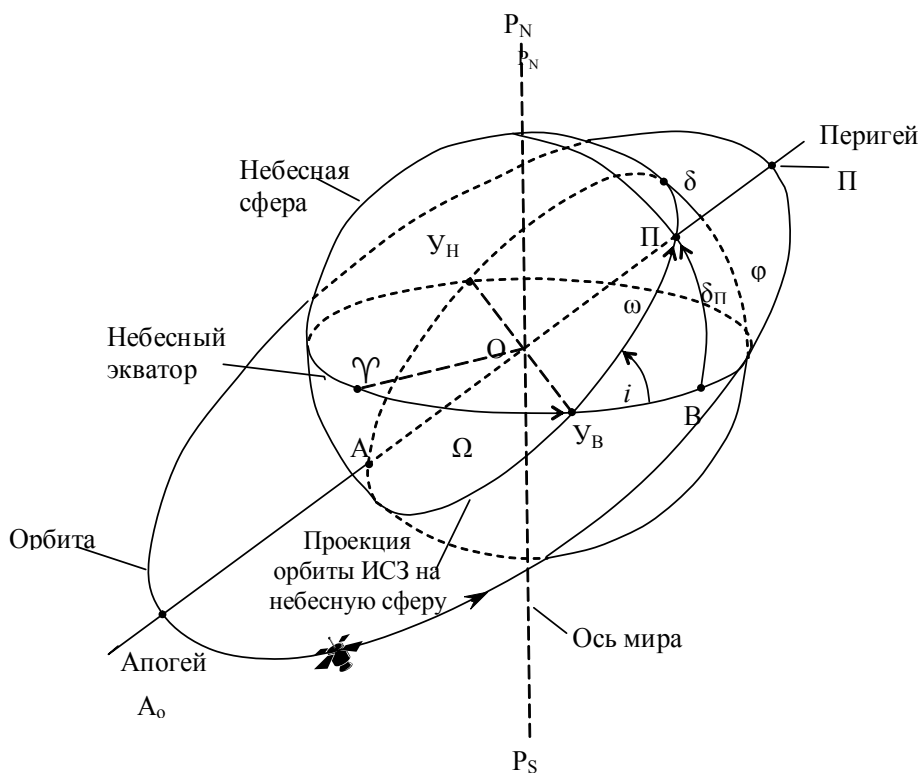


Рис. 9.4. Элементы орбиты спутника

липса в плоскости орбиты определяется или склонением перигея δ_{Π} , или угловым расстоянием от восходящего узла ω . Размеры орбиты задаются значением большой полуоси эллипса $a = A_0 \Pi_0 / 2$. Форма эллипса характеризуется эксцентриситетом $e = c/a$, где c – расстояние между центром и фокусом эллипса. Положение ИСЗ на его орбите задают временем t_0 , истекшим от момента прохождения спутника через восходящий узел. Таким образом, положение ИСЗ в пространстве в любой момент времени определяется заданием его шести параметров: Ω , e , δ_{Π} (или ω), a , i , t_0 .

Орбиты ИСЗ разделяются на характерные типы по нескольким основным признакам. В качестве таких признаков приняты значения эксцентриситета e , наклонения орбиты i , периода обращения T и высоты H .

Эксцентриситет e (отношение расстояния между центром и фокусом эллипса к значению его большой полуоси) определяет форму орбиты: $e = 0$ – круговая орбита, $e < 1$ – эллиптическая, $e = 1$ – параболическая, $e > 1$ –

гиперболическая орбита. Метеорологические спутники двигаются по круговым орбитам.

В соответствии со значением наклонения орбиты (угол между плоскостью экватора и плоскостью орбиты) спутники делятся на экваториальные, наклонные и полярные (рис. 9.5). У экваториальных $i = 0^\circ$, у полярных $i = 90^\circ$, у наклонных $0^\circ < i < 90^\circ$.

Экваториальный спутник будет всегда летать над экватором. При высоте орбиты $H = 35810$ км и $i = 0^\circ$ период обращения ИСЗ сравняется с периодом оборота Земли. Спутник будет вращаться с такой же угловой скоростью, что и Земля, и, перемещаясь по орбите в направлении совпадающим с направлением вращения Земли, будет всё время находиться над одним и тем же наземным пунктом. Такой ИСЗ называется геостационарным. Витки полярного ИСЗ при каждом новом обороте ввиду вращения Земли будут смещаться к западу. Такие спутники будут наблюдаться в любом пункте земной поверхности в то или иное время.

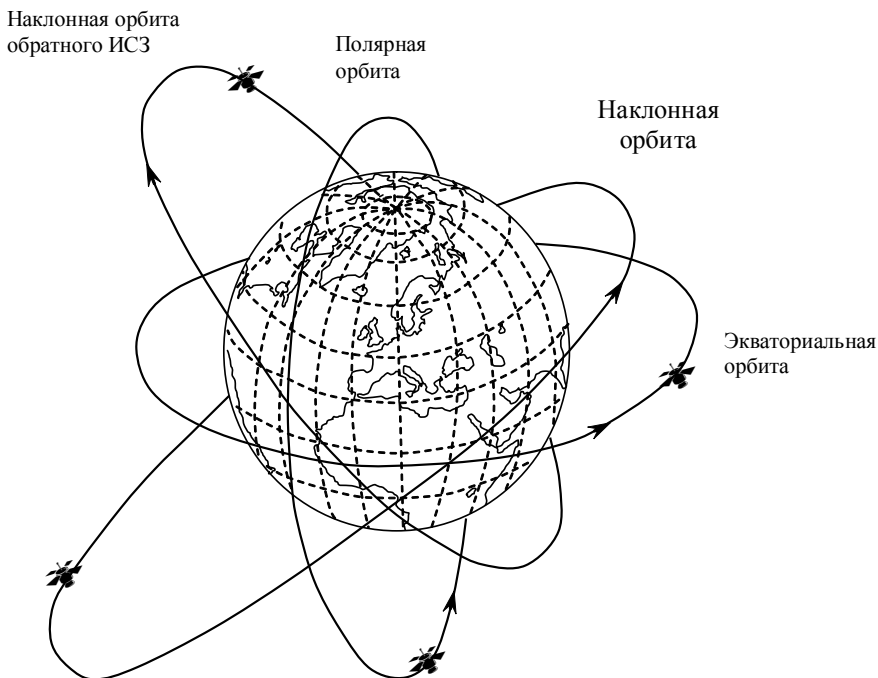


Рис. 9.5. Основные типы орбит ИСЗ

Орбита наклонных ИСЗ проектируются на поверхность Земли только в пределах широт $D_j = \pm i$.

Все ИСЗ могут разделяться на прямые и обратные. Прямые движутся в направлении вращения Земли с запада на восток, для них $0 < i < 90^\circ$; обратные – с востока на запад и для них $90^\circ < i < 180^\circ$. Прямые спутники запускать легче, так как при их выводе на орбиту к скорости ракеты добавляется линейная скорость вращения Земли. При запуске обратных спутников линейная скорость вращения Земли вычитается из скорости ракеты.

ИСЗ разделяются также на периодические и непериодические. Период вращения первых кратен периоду обращения Земли, поэтому положение спутника относительно поверхности Земли каждые сутки повторяется. Непериодические спутники таким свойством не обладают.

По высоте орбиты ИСЗ могут быть разделены на три группы: низкоорбитальные, среднеорбитальные и высокоорбитальные. В первую группу включены спутники, запускаемые на высоты 200-500 км. К ним относятся пилотируемые космические корабли, орбитальные космические станции и отдельные спутники. Вторая группа представлена спутниками, запускаемыми на высоты от 500 км до нескольких тысяч километров. На этих высотах летают спутники метеорологического, геодезического назначения, а также другие ИСЗ. К третьей группе относятся спутники с высотой полета в десятки тысяч километров. Эти высоты используются для запуска метеорологических геостационарных спутников и спутников связи.

Для метеорологических спутников выбор орбиты имеет важное значение. В связи с этим к орбитам метеорологических искусственных спутников Земли (МИСЗ) предъявляются определенные требования:

- 1) обеспечение широкой полосы обзора со спутника;
- 2) предоставление возможности получения изображений объектов атмосферы и земной поверхности высокого разрешения;
- 3) обеспечение требуемой для метеорологических наблюдений периодичности;
- 4) получение метеорологических данных над конкретным географическим районом в определенное время.

Эти требования могут быть удовлетворены путём выбора высоты, формы, наклонения орбиты и определения оптимального времени запуска МИСЗ.

Для максимального охвата земной поверхности наблюдениями обзорной аппаратуры применяются полярные орбиты. Для метеорологических наблюдений используются круговые или близкие к ним орбиты. Они обес-

печивают упрощение географической привязки, обработки и анализа спутниковой информации.

Большое значение при метеорологических наблюдениях с МИСЗ имеет детальность наблюдений, т.е. различие необходимых деталей при заданной полосе обзора. Это обстоятельство определяет выбор высоты орбиты МИСЗ. С увеличением высоты полёта полоса обзора увеличивается, а детальность наблюдений ухудшается. Поэтому при необходимости получения повышенной детальности изображений чаще используются среднеорбитальные МИСЗ с высотой полета 600-1500 км, для сбора обобщенной информации с большой площади обычно используются спутники, имеющие высоту орбиты около 36000 км.

При выборе орбит спутников учитывается, что глобальные метеорологические наблюдения должны выполняться по крайней мере 2 раза в сутки. Время запуска определяется таким образом, чтобы обеспечить сбор максимальной информации над тем или иным районом, при этом время пытаются состыковать со сроками наземных наблюдений с целью синхронного совместного анализа данных.

Фотографирование земной поверхности с искусственных спутников Земли (ИСЗ) является важным источником информации для анализа и прогноза метеорологической ситуации. Научная аппаратура метеорологических спутников работает в двух режимах: в режиме запоминания информации и режиме непосредственной передачи.

Режим запоминания предназначен для получения глобальной информации. Для этого на борту МИСЗ имеется специальное бортовое запоминающее устройство, которое позволяет накапливать научную информацию. Полученная информация передается на Землю только при пролете спутника в зоне специальных центров по приёму информации. Во время полёта в зоне радиовидимости Центра управления полетом (ЦУП) вся накопленная информация по сигналу ЦУПа передается на Землю. Таким образом, сразу принимается целая серия фотоснимков. Недостатком такого способа является невозможность получения информации любыми адресатами, кроме ЦУПа. В этом режиме работает весь комплекс научной аппаратуры.

В режиме непосредственной передачи работает аппаратура для получения региональных изображений облачности и подстилающей поверхности, т.е. изображений непосредственно того района, где в данный момент пролетает спутник. Недостатком такого способа является то обстоятельство, что при полете над малонаселенными регионами передава-

емая с ИСЗ информация пропадает из-за отсутствия адресатов (приёмников).

Геостационарные ИСЗ часто используются в системе связи для ретрансляции радио- и телепередач. Если ИС неподвижно “висит” над районом расположения адресата, то такой режим является одним из самых выгодных. Во-первых, ИСЗ может достаточно часто передавать фотографии района расположения адресата, что необходимо, например, для слежения за динамикой развития облаков. Во-вторых, благодаря значительной высоте орбиты, ИСЗ “видит” соседние регионы, а также достаточно удалённые участки планеты. В-третьих, появляется возможность обрабатывать передаваемые фотоснимки, а затем использовать ИСЗ в качестве ретранслятора и передавать адресатам уже обработанные фотографии, например, с указанием реперных точек, позволяющих осуществить точную картографическую привязку.

9.5. Устройство и работа видикона

Теперь рассмотрим, как можно технически осуществить эту идею. Для этого употребляются передающие телевизионные трубки: видикон, суперортикон и др. Наиболее простой является передающая трубка видикон. Рассмотрим её устройство (рис. 9.6).

Как видно из рис. 9.6 устройство видикона весьма сходно с устройством обычной электронно-лучевой трубки (Приложение 5), применяемой, например, в осциллографах. Основой является вакуумный баллон, перед-

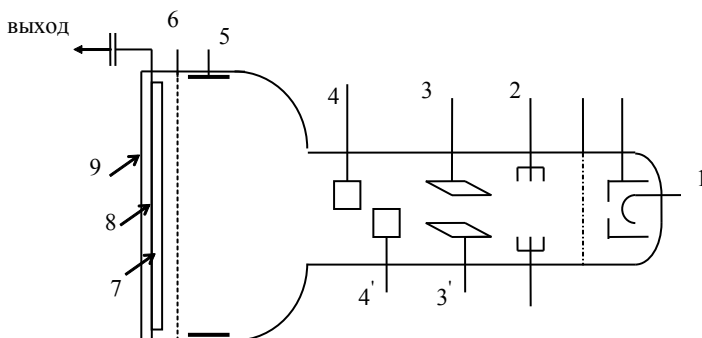


Рис. 9.6. Устройство видикона (разрез)

- 1 - катод; 2 - фокусирующая система; 3, 3' - вертикально отклоняющие пластины;
4, 4' - горизонтально отклоняющие пластины; 5 - кольцевой анод; 6 - сетка;
7 - фотомишень; 8 - сигнальная пластина; 9 - защитное стекло

няя часть которого выполнена из стекла (9). Внутри расположены катод (1), осуществляющий эмиссию электронов, фокусирующая система (2) - она, как правило, состоит из нескольких электродов, вертикально и горизонтально отклоняющие пластины 3, 3' и 4, 4'. Таким образом, пучок электронов может отклоняться по вертикали и по горизонтали в зависимости от напряжения, поданного на пластины. Разогнавшись в промежутке катод-анод, электронный пучок по инерции продолжает своё движение дальше, к фотомишени (7), пролетая через сетку (6). Сетка имеет отрицательный потенциал, который тормозит движение электронов. В результате электронный луч с небольшой скоростью “оседает” на правой стороне фотомишени.

Фотомишень является главной частью видикона. Она изготавливается из материала, обладающего свойствами фотосопротивления. Как известно, при освещении светом фотосопротивление становится хорошим проводником, а в темноте, наоборот, изолятором. Фотосопротивление изменяет свою величину в зависимости от освещения. Этим свойствами фотомишень обладает только в поперечном направлении (перпендикулярно плоскости фотомишени), в других направлениях она в любом случае представляет собой изолятор. Слева от фотомишени располагается сигнальная пластина (8). Она является хорошим проводником, но прозрачна для видимого света. Обычно в качестве сигнальной пластины используют золотую фольгу, настолько тонкую, что она вполне прозрачна и в то же время хорошо проводит электрический ток. Перед видиконом располагается объектив (он на рисунке не показан), фокусирующий изображение предмета, например, земной поверхности - в плоскости фотомишени. Объектив снабжен затвором, нормальное положение его закрытое.

Задача, которую выполняет видикон - получить электрический сигнал, амплитуда которого была бы однозначно связана с яркостью каждого участка изображения. Очерёдность передачи устанавливается правилом строчной развертки (глава 9, раздел 9.1). Значит, при сканировании ярких участков изображения амплитуда электрического сигнала должна быть большой, а при сканировании темных - малой.

Процесс преобразования изображения в электрический сигнал проходит в несколько стадий. На *первой стадии* электронный луч сканирует плоскость фотомишени по правилу строчной развертки. Для этого на отклоняющие пластины необходимо подать напряжения, эпюры которых изображены на рис. 9.7. Ясно, что отношение периодов будет равно числу строк в кадре, которое может быть выбрано достаточно большим.

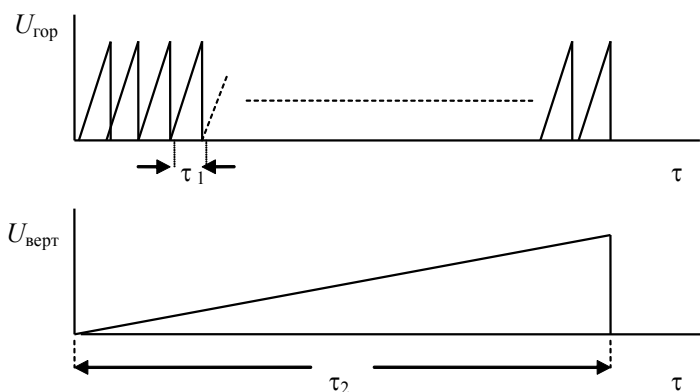


Рис. 9.7. Эпюры напряжений на горизонтально ($U_{гор}$) и вертикально ($U_{верт}$) отклоняющих пластинах при сканировании фотомишени электронным лучом

При сканировании вся правая поверхность фотомишени заряжается отрицательно. Совершенно ясно, что левая поверхность фотомишени, то есть сигнальная пластина, приобретет положительный заряд. Фотомишень можно рассматривать как сумму большого числа элементарных конденсаторов, у которых левые пластины соединены вместе сигнальной пластиной, а правые пластины разобщены. Конденсаторы будут постепенно разряжаться, однако очень медленно, так как сопротивление фотомишени велико.

Вторая стадия процесса состоит в том, что затвор объектива открывается на непродолжительное время. На левой поверхности фотомишени возникает изображение, состоящее из участков разной освещенности. Сопротивление участков фотомишени в направлении, перпендикулярном к поверхности, окажется обратно пропорционально освещенности и упомянутые выше конденсаторы будут разряжаться сильнее на тех участках, которые больше освещены.

Выделим три уровня освещенности: сильный - в “белых” участках изображения, промежуточный - в “серых” и практически нулевой - в “чёрных”. Фотомишень будет разряжаться. Время экспозиции выбирается так, чтобы “белые” участки фотомишени разрядились бы полностью, “серые” - лишь частично, а “чёрные” - остались бы заряженными. Тогда по окончании экспонирования на фотомишени останется рельеф заряда, повторяющий рельеф видимого изображения.

На *третьей стадии* электронный луч снова сканирует всю поверхность фотомишени по правилу строчной развертки - точно так же, как на

первой стадии. Разумеется, при этом вся правая поверхность фотомишени приобретет отрицательный заряд, а левая – положительный, так как положительные заряды подтянутся к отрицательным по проводу, связывающему сигнальную пластину с дальнейшей схемой (“выход” на рис. 9.6). Однако третья стадия отличается от первой тем, что некоторые участки фотомишени (“черные” и “серые”) уже заряжены.

Следовательно, при сканировании лучом этих участков дальнейшей зарядки не происходит (или происходит частичная зарядка “серых” участков), электроны не оседают на заряженной поверхности, а по выходному проводу ток не идет. Только в те моменты времени, когда электронный луч пробегает “белые” участки, происходит их зарядка, а на левую часть фотомишени – сигнальную пластину приходят положительные заряды.

Мы пришли к очень важному выводу: при вторичном сканировании фотомишени электронным лучом появляются импульсы тока на выходном проводе, сильные – в “белых” участках, менее сильные – в “серых”, а в “чёрных” – тока практически нет. Значит, этот ток несёт в себе информацию об изображении. Назовем его *видеосигналом*. Дальнейшая задача – усиление видеосигнала, его модуляция и преобразование в радиосигнал осуществляется с помощью усилителей и радиопередатчика, который передаёт радиосигнал на Землю.

Остается добавить, что в конце каждой строки специальное устройство формирует особые «строчные» импульсы. Они необходимы для того, чтобы при расшифровке видеосигнала распознать начало следующей строки и конец предыдущей. Эти импульсы дают возможность синхронизировать работу передающего и приёмного устройства, поэтому их называют *«строчными синхроимпульсами»*.

Трубкам видикон и другим высоковольтным вакуумным фотоэлектрическим преобразователям свойственны такие недостатки, как большой расход электроэнергии, механическая непрочность, малый срок службы, сравнительно большие габариты и масса. Твердотельная техника имеет в этом плане существенное преимущество. Наиболее перспективны многоэлементные твердотельные преобразователи с зарядовой связью (ПЗС).

9.6. Преобразователи с зарядовой связью (ПЗС)

Если в видиконах фотоизображение преобразуется в рельеф сопоставлений, то в ПЗС информацию о фотообразе представляют пакеты

носителей зарядов, возникающих в полупроводнике под действием света и хранящихся в потенциальных ямах в поверхностном слое полупроводника под слоем диэлектрика. На рис. 9.8 изображена ПЗС матрица на структуре металл – диэлектрик – полупроводник (МДП). Подложкой служит n- полупроводник с основными носителями – электронами. Металл служит внешним электродом. Если к какому-либо из металлических электродов приложен отрицательный потенциал, то основные носители зарядов – электроны уходят от поверхности в глубь полупроводниковой подложки.

У поверхности вблизи этого электрода образуется обеднённая область, представляющая собой потенциальную яму для неосновных носителей – дырок. Если вблизи её оказываются неосновные носители – дырки, то они скапливаются в узком приповерхностном слое. В ПЗС пары

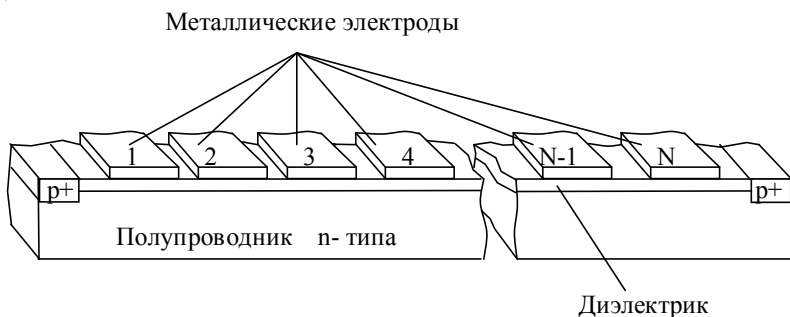


Рис. 9.8. Структура элемента прибора с зарядовой связью

электрон – дырка создаются в результате облучения их светом. Спектральная чувствительность определяется энергией ионизации энергетических уровней полупроводника. Диэлектрик подбирают так, чтобы он обладал достаточной прозрачностью в заданной прибору спектральной области.

Управляя потенциалами металлических электродов, можно готовить ячейку к приёму сигнала измерительной информации, воспринимать её, хранить информацию в виде пакета зарядов, передавать пакет зарядов в соседние ячейки или передавать информацию в линию связи. При фотографировании объекта облучаются одновременно все ячейки фотомишени, вследствие чего при одинаковом исходном потенциале металлических электродов рельеф фотообраза преобразуется в рельеф зарядов фотомишени ПЗС. Далее, чтобы передать полученную информацию, преобразовав её в видеосигнал, необходимо выполнить считывание и подготовить фотомишень к следующему сеансу.

Работа ПЗС в качестве приёмника фотоизображения может быть представлена тремя режимами: фотографирование, хранение и считывание.

В режиме фотографирования объекта поток излучения (видимого или ИК) преобразуется в зарядовые пакеты, при этом время экспозиции обеспечивает достаточное превышение полезного сигнала над шумом. В этом режиме затвор в оптической системе открывается на время экспозиции и на ПЗС, через объектив, проецируется изображение, так же как и у видикона. Если к металлическому электроду приложено отрицательное напряжение, то при облучении светом в потенциальной яме под электродом образуется зарядовый пакет дырок, величина которого пропорциональна интенсивности облучения (рис. 9.9, а).

Далее фоторельеф, преобразованный в потенциальных ямах в рельеф зарядов, хранится, пока не будет востребован. Срок хранения информации в ПЗС ограничен. Невостребованное изображение “стирается”, так как зарядовые пакеты постепенно перемещаются в области с меньшей концентрацией носителей зарядов – дырок.

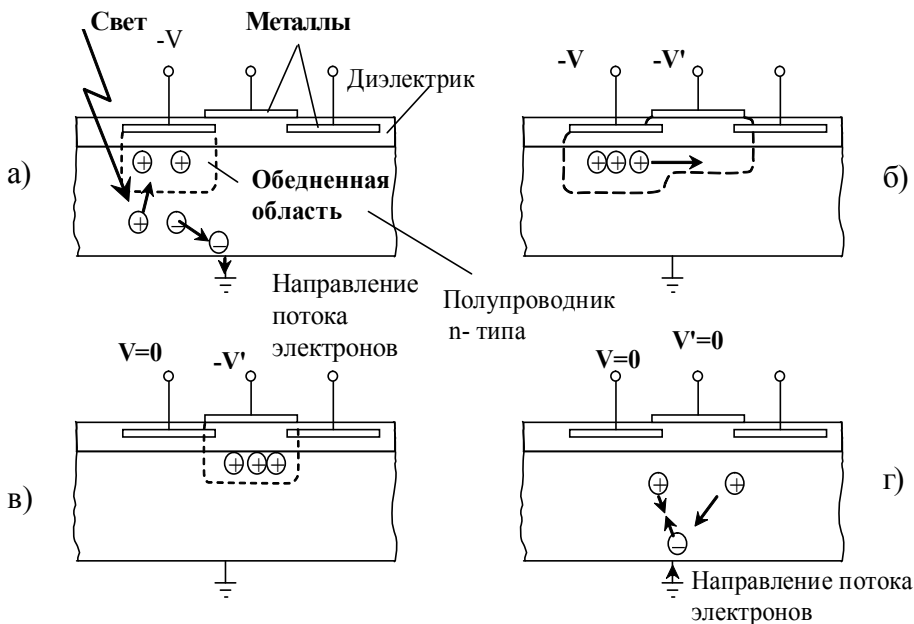


Рис. 9.9. Ячейка прибора с зарядовой связью

а) генерируемые фотонами дырки устремляются в потенциальную яму;

б) процесс передачи зарядового пакета в соседнюю яму $|V'| > |V|$;

в) переадресовка закончена; г) ямы исчезают

В режиме считывания информации тактовые импульсы заставляют переходить зарядовые пакеты от одной МДП-структуры к другой в зависимости от последовательности считывания информации и формирования выходного видеосигнала. Для передачи зарядового пакета необходимо подать на соседний справа электрод больший, чем на первый, отрицательный потенциал, в результате этого пакет зарядов (дырок) устремится к нему (рис. 9.9, б). Если снять потенциал с левого электрода, тогда весь пакет перейдет ко второму правому электроду (рис. 9.9, в), так происходит передача зарядового пакета из одной МДП структуры другой. Если снять потенциал с данного и с соседнего электродов, то дырки переместятся вглубь полупроводника. Потенциал ямы исчезает, сигнал об этом поступает в линию связи, ячейка готова к следующему циклу (рис. 9.9, г). Организованная по заданной программе последовательность тактовых импульсов, поступающая на металлические электроды, являющиеся затворами МДП ячеек фотомишени, заставляет переадресовывать зарядовые пакеты из одних потенциальных ям в другие, что обеспечивает порядок считывания информации и передачи её в линию связи.

Возможны разные способы организации матричных формирователей сигналов изображений на ПЗС и их считывания: кадровая, строчная, строчно-кадровая, адресная. Соответственно способу считывания создаётся последовательность вывода результатов на выходной дисплей на Земле, на котором по видеосигналам воспроизводится изображение объекта наблюдения.

9.7. Дешифрирование метеорологической информации на снимках с метеорологических спутников

Метеорологическим дешифрированием космических снимков Земли называется процесс распознавания облачности, снега, льда и объектов земной поверхности. При дешифрировании снимков важно получить такие характеристики как количество, тип и высота верхней границы облаков. Основными дешифровочными признаками, позволяющими различать изображения облаков разного типа и земной поверхности, являются яркость (тон) и рисунок (структура) изображения.

Яркость изображения на космических снимках зависит от ряда физических характеристик объекта. На снимках, полученных в видимом участке спектра, яркость определяется отражательными свойствами объекта и его освещенностью. На инфракрасных снимках яркость изображения

зависит от температуры поверхности объекта. Тон изображения зависит также и от количества облачности на площади соответствующей элементу разрешения изображения, а для инфракрасных снимков и от высоты верхней границы облаков.

Яркость космических изображений не является сама по себе достаточным дешифровочным признаком, по которому можно отличить на снимке облака от подстилающей поверхности суши и моря. Наиболее информативными являются резкие изменения тона по полю снимка, которые формируют рисунок изображения.

Текстура изображения - это рисунок мелких деталей изображения, создаваемый различием яркости отдельных элементов, размеры которых сравнимы с разрешающей способностью аппаратуры. Различают четыре основных типа текстуры: матовая, зернистая, волокнистая и дендритовая.

Матовая текстура (рис. 9.10, а) характеризуется однородным тоном изображения. Она свойственна изображениям открытых участков водной поверхности, однородных участков суши, сплошных льдов и снежного покрова, тумана и слоистообразной облачности. На ИК снимках матовую текстуру могут иметь кучевые и слоисто-кучевые облака в том случае, когда просветы между облачными элементами меньше элементов разрешения или соизмеримы с ними.

Зернистая текстура (рис. 9.10, б) – скопление пятен (зёрен) светлого тона. Мелкие зерна характерны для изображений кучевообразной облачности, причём размеры зерен в этом случае настолько малы, что детали формы отдельных облаков полностью скрадываются. Иногда зернистую структуру имеет на снимках мелкобитый морской лед; для таких изображений характерным признаком является некоторая угловатость и резкость очертаний. Зернистая текстура, как правило, на ИК снимках просматривается плохо.

Волокнистая текстура – волокна, нити, полосы незначительной толщины, но вытянутые в длину на десятки и сотни километров, с размытыми нечёткими краями (рис. 9.10, в). Такая текстура характерна для облаков верхнего и среднего ярусов.

Особый тип текстуры свойственен изображению рельефа суши – *дендритовая текстура* (рис. 9.10, г). Она характерна для изображений покрытых снегом гор и равнин с развитой системой рек. На ИК снимках не всегда удастся проследить этот вид текстуры.

При дешифрировании космических снимков не всегда удастся точно определить формы облаков из-за фотографического сходства большин-

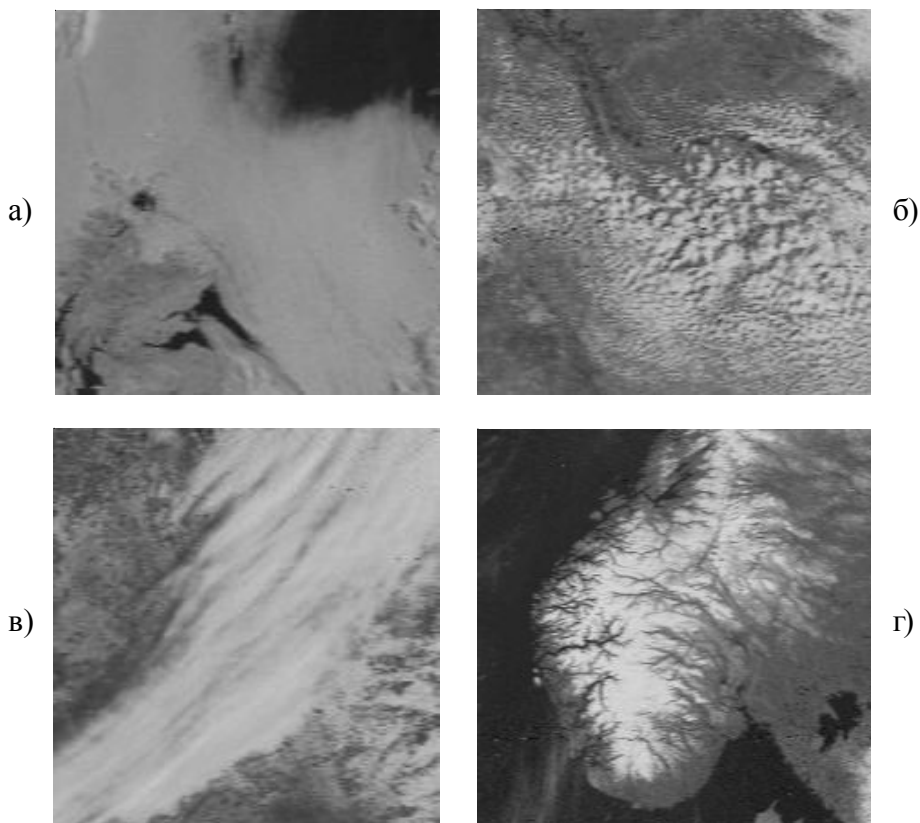


Рис. 9.10. Основные виды текстуры

- а) матовая (туман в Северном море у северо-восточного берега Англии);
- б) зернистая (кучевые облака в районе реки Обь);
- в) волокнистая (мощные перистые облака над Польшей);
- г) дендритовая (Скандинавские горы покрытые снегом)

ства из них между собой. Поэтому в спутниковой метеорологии пользуются условной классификацией. Облака разделяются по создаваемому ими на снимках сходному зрительному эффекту независимо от формы и яруса. По классификации облака разделяются на кучевообразные, слоистообразные, слоисто-кучевообразные, кучево-дождевые и перистообразные.

Изображение кучевообразной облачности на снимках создаётся кучевыми, мощными кучевыми, высоко-кучевыми и перисто-кучевыми облаками. Количество облачности может быть различным, но, как правило, облачность не сплошная. Тон изображения отличается большой

яркостной не однородностью, он может колебаться от светло-серого до ярко-белого, причём светлый тон изображения чередуется с более тёмным (рис. 9.11).



Рис. 9.11. Кучевообразная облачность

Характерной текстурой изображения являются зернистая или матовая. Матовая текстура наблюдается при большом скоплении кучевых облаков. Яркостный контраст между кучевообразными облаками и подстилающей поверхностью изменяется в широких пределах. На снимках в видимом диапазоне он возрастает при увеличении размеров облачных элементов и их сплоченности, а на снимках в инфракрасном диапазоне – в зависимости от высоты облаков.

На космических снимках кучевообразные облака могут быть беспорядочно разбросаны по полю снимка или организованы в различного вида линии, ячейки, гряды. Весьма чётко выявляются на снимках, полученных в видимом участке спектра, влияние горных массивов, возвышенностей, островов, побережий, рек, озер и других ландшафтных особенностей местности на распределение конвективных облаков. Кучевообразная облачность чаще всего наблюдается в областях холодных и окклюдируемых фронтов, в тыловых частях циклонов, а также над водной поверхностью и сушей при наличии развитой конвекции.

Изображение слоистообразной облачности на снимках создается слоисто-дождевыми, слоистыми, высоко-слоистыми и плотными перисто-слоистыми облаками. Кроме того, это некоторые облака (высоко-кучевые и слоисто-кучевые), состоящие из мелких элементов, разделенные пространствами меньше элементов разрешения аппаратуры, могут выглядеть

как слоистообразные. Как правило, поля слоистообразной облачности имеют большие горизонтальные размеры (рис. 9.12).

На снимках полученных в видимом участке спектра, тон изображения - от белого до серого в зависимости от мощности облаков и высоты Солнца. Тон изображения плотных слоистообразных облаков обычно белый, иногда ярко-белый, тонких – светло-серый.

Слоистая облачность часто наблюдается в сочетании с кучевообразной. В этом случае матовый тон изображения, характерный для слоистообразной облачности, будет несколько нарушен вкраплениями зерен или более крупных облачных элементов округлых форм. Нередко в слоистообразную облачность бывают включены кучево-дождевые облака, которые на снимках просматриваются в виде ярко-белых пятен на менее ярком однородном фоне. Иногда присутствие кучево-дождевых облаков можно обнаружить по теням от их вершин, выступающих над верхней кромкой слоистообразных облаков.

На инфракрасных снимках слоистообразная облачность выглядит как серая пелена. Если температурный перепад между верхней границей облаков и подстилающей поверхностью очень мал, то на ИК снимках слоистообразную облачность распознать трудно. При мощных приземных инверсиях, возникающих ночью вследствие выхолаживания, верхняя граница слоистообразной облачности имеет более высокую температуру, чем окружающая местность. В этих случаях облака на ИК снимках выглядят темнее безоблачного пространства.

Туман на снимках в видимом участке спектра выглядит в виде сплошного молочно-белого изображения с ровными чёткими краями,

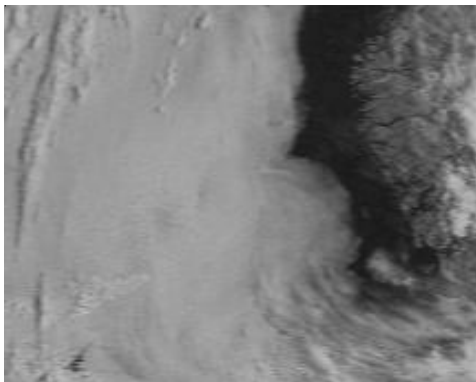


Рис. 9.12. Слоистообразная облачность

повторяющими формы рельефа. Адвективный туман над океаном иногда может иметь полосную структуру, напоминающую структуру перистых облаков. Малый температурный контраст между туманами и подстилающей поверхностью очень часто не позволяет по тону изображения отличить туман от других объектов. При сильных ночных инверсиях на ИК снимках туман выглядит темнее безоблачной местности (“чёрный туман”).

Изображению слоисто-кучевообразной облачности (рис. 9.13) соответствуют слоисто-кучевые облака. Очень часто эта облачность формируется в холодном подинверсионном слое и имеет небольшую вертикальную протяженность. Облачные элементы имеют округлую форму диаметром от 10 до 100 км. Размер безоблачных промежутков в несколько раз меньше облачных элементов.

Тон изображения слоисто-кучевообразной облачности на снимках, полученных в видимом участке спектра, меняется от белого в центре облачного элемента до светло-серого на его периферии. Очень часто на снимках в видимом участке спектра облачность напоминает внешний вид гальку. Тон изображения на ИК снимках от светло-серого до темно-серого. В случае когда, расстояния между облачными элементами малы, облачность на ИК снимке имеет вид сплошной серой пелены, которая часто сливается с подстилающей поверхностью.

На изображениях видимого участка спектра кучево-дождевые облака представлены ярко-белыми однородными пятнами (рис. 9.14). Эти облака часто имеют чёткую, резкую границу с одной стороны, и шлейф перестой облачности – с другой. Край шлейфа обычно бывает размыт.

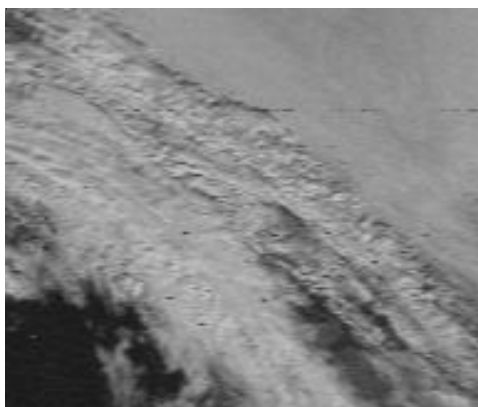


Рис. 9.13. Слоисто-кучевообразная облачность

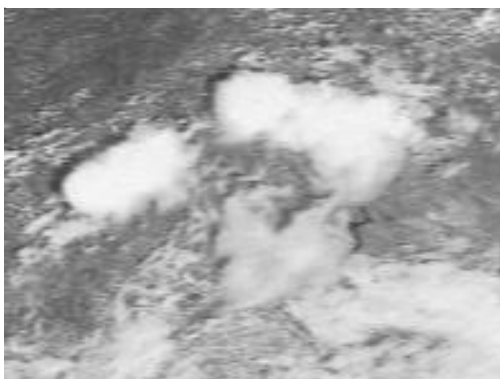


Рис. 9.14. Кучево-дождевая облачность

Полезным признаком при распознавании кучево-дождевых облаков являются отбрасываемые ими тени, особенно в тех случаях, когда они пробивают толщу слоистообразной облачности. Кучево-дождевые облака без наковален выглядят яркими пятнами. На инфракрасных изображениях кучево-дождевые облака образуют яркие белые пятна с хорошо выраженными границами. Присутствие наковален делает их границы менее резкими, а тон по краям менее ярким.

Кучево-дождевые облака встречаются как изолированные, так и в сочетании с другими формами. В случае сочетания облаков с другими формами граница их на снимках видимого участка спектра выражена резко: они обнаруживаются по теням, создаваемым вершинами, ярко-белые купола которых выступают на более темном фоне. В случае отсутствия теней кучево-дождевые облака опознаются по яркости их изображения. Они могут наблюдаться в тылу циклона в неустойчивом холодном воздухе и размытом барическом поле, особенно в летнее время года. Наличие кучево-дождевых облаков является хорошим индикатором прогноза гроз, ливней и шквалистых ветров.

Изображение перистообразной облачности создается всеми формами перистых облаков (рис. 9.15). Она может быть опознана по волокнистой текстуре. Полосы более или менее плотных перистых облаков часто дают тень на облака нижнего и среднего яруса.

Перистые нитевидные облака обычно имеют волокнистую текстуру, причем четкая текстура наблюдается только на снимке в видимом диапазоне. Тон изображения перистых нитевидных облаков в видимом диапазоне изменяется от серого до светло-серого в зависимости от подсти-

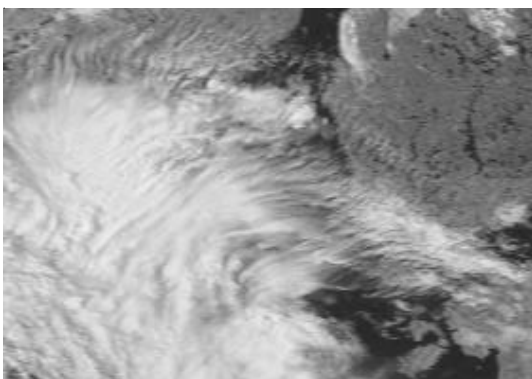


Рис. 9.15. Перистообразная облачность

лающей поверхности. Эти облака образуют полосы шириной 50-100 км и длиной до 1000 км. Сквозь них ясно просматриваются подстилающая поверхность и кучевые облака. Тон ИК изображения изменяется от серого до светло-серого.

На снимках видимого диапазона тон изображения плотной перестой облачности меняется от светло-серого до белого. Наиболее яркие участки на снимках соответствуют более плотным облачным элементам, которые часто отбрасывают хорошо различимые тени. Элементы облачного изображения могут быть округлыми или продолговатыми. Яркость плотных перистых облаков сильно уменьшается от центра их к периферии. На ИК снимках тон изображения плотных перистых облаков, имеющих низкую температуру и не пропускающих излучение подстилающей поверхности, белый и ярко-белый. Причём яркость убывает от центральной части облачного массива к его периферии.

Перистые облака наковален в большинстве случаев являются частью кучево-дождевых облаков. Наветренный край наковален обычно бывает резким, а подветренный – размытым. Яркость изображения максимальна над облачным массивом и убывает с его подветренной стороны. Тон наковален меняется от ярко-белого над кучево-дождевыми облаками до светло-серого при удалении от облаков.

Разрешающая способность аппаратуры работающей в видимом участке спектра позволяет определить с достаточной достоверностью количество облачности. По ИК снимкам можно определить среднее количество облаков только для достаточно больших по площади районов. Среднее количество облачности определяется в пределах условного

участка, в котором характеристики облачности (структура и яркость) меняются мало. Количество облачности находится как отношение площади, занятой облачностью, к площади всего выбранного условного участка. Для количественной оценки приняты следующие градации:

- ясно – облака полностью отсутствуют или ими покрыто менее 20% площади выделенного участка;
- небольшая – облаками покрыто от 20 до 50% площади выделенного участка;
- значительная - облаками покрыто от 50 до 80% площади выделенного участка;
- сплошная с просветами – облаками покрыто более 80% площади выделенного участка, но имеются просветы;
- сплошная – облаками покрыта вся площадь выделенного участка (100%).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В настоящее время развитие метеорологической измерительной техники идёт по трём основным направлениям:

1. Совершенствование существующих метеорологических датчиков. В рамках этого направления ведутся работы по созданию малоинерционных, более точных датчиков, расширение диапазона измерений и т.п.

2. Совершенствование методов обработки сигнала, прежде всего, компьютерных методов. Если измерение ведется с погрешностью, то, как мы знаем, в ряде случаев можно исключить эту погрешность, рассчитав правильное значение на основе известных закономерностей. Так, можно, например, рассчитать температуру воздуха по измеренным значениям, уменьшив инерционную погрешность. Можно задать программу встроенному калькулятору и получать значения измеряемой величины практически без погрешности.

3. Разработка принципиально новых методов измерения метеовеличин. Это наиболее фундаментальное направление. В настоящее время ведутся исследования возможности проводить метеорологические измерения на основе лазерного зондирования атмосферы, акустического зондирования, зондирования электромагнитным сигналом в различных диапазонах длин волн. Разберём в качестве примера одно из наиболее перспективных и разработанных к настоящему времени направлений - лазерное зондирование атмосферы. Для этого рассмотрим особенности лазера как источника света.

Итак, излучение импульсного лазера обладает следующими особенностями:

1. Монохроматичность. Длина волны лазерного излучения является постоянной величиной для данного лазера с очень высокой степенью точности.

2. Острая направленность. Лазерный световой поток характеризуется очень малым углом расхождения, благодаря чему его энергия достаточно велика даже на очень больших расстояниях. Можно, например, проводить лазерное зондирование лунной поверхности, получая достаточно сильный для регистрации отраженный сигнал.

3. Высокая энергия импульса - до 10 МВт.

4. Малая длительность импульса – 10^{-8} - 10^{-9} с и менее.

5. Частота следования импульсов может быть выбрана в пределах от 10 до 1000 Гц.

Поскольку длительность импульсов (τ) столь мала, то протяженность участка, освещенного лазерным импульсом составляет $C \cdot \tau \sim 1$ м (рис. 10.1).

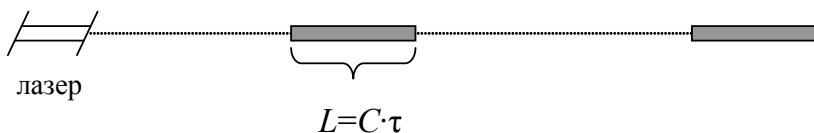


Рис. 10.1. Пояснение работы импульсного лазера

Когда лазерное излучение распространяется в атмосфере, оно рассеивается молекулами атмосферных газов, аэрозолями, каплями и т.д. Часть рассеянного излучения возвращается обратно и может быть принята чувствительными фотоприёмниками. Если известен состав атмосферы, количество аэрозолей, давление, температура и прочие параметры, то можно рассчитать параметры отраженного лазерного сигнала. Эта задача (достаточно сложная!) получила название *прямой задачи*. Однако для измерения параметров атмосферы по отраженному лазерному сигналу нужно решать другую задачу: рассчитать параметры атмосферы, зная параметры отраженного сигнала. Эта задача называется *обратной задачей*. Обратная задача сводится к написанию системы уравнений, связывающих параметры отраженного сигнала с параметрами атмосферы и к решению такой системы. При этом количество уравнений может оказаться меньше количества неизвестных величин. Тогда говорят, что обратная задача *некорректна*. Методика решения некорректных обратных задач сводится к поиску дополнительных связей между параметрами и замыканию, таким образом, системы уравнений. Если же это невозможно, то приходится задавать отдельные параметры на основе статистики наблюдений, делать различные предположения и допущения.

Таким образом, лазерное зондирование атмосферы предполагает решение, по крайней мере, двух задач: технической (т.е. создание установки для лазерного зондирования, приема и анализа отраженного сигнала) и математической (обратной задачи с учётом её возможной некорректности). Решение этих задач сопряжено со значительными трудностями, основные из которых мы сейчас перечислим.

1. Отраженный атмосферой сигнал очень слаб. Для его регистрации необходимо применять высокочувствительные фотоприёмники.

2. Лазерное излучение, отраженное интересующим наблюдателя участком атмосферы, трансформируется на обратном пути нижележащими слоями атмосферы.

3. Зарегистрированный лазерный сигнал искажается приёмной аппаратурой.

Для преодоления этих трудностей приходится пользоваться очень сложной (и очень дорогой!) аппаратурой. Тем не менее, лазерное зондирование атмосферы имеет следующие несомненные преимущества.

1. Дистанционность зондирования. Возможно получение информации о слоях атмосферы на удалении несколько десятков и даже сотен километров.

2. Протяженность зондируемого участка может, как уже было сказано, достигать 1 м и менее. Таким образом, зондирование можно проводить с очень высокой разрешающей способностью.

3. Время получения обратного сигнала измеряется миллисекундами или менее. Следовательно, лазерное зондирование является безинерционным методом измерения.

4. Возможен глобальный мониторинг атмосферы с помощью лазерного зондирования с искусственных спутников. Это может сильно снизить информационную значимость метеорологической наземной сети.

Лазерные установки для метеорологического зондирования получили название *лидаров*. Лидар включает в себя лазер, оптические элементы для направления лазерного излучения, вогнутое зеркало для приёма отражённого сигнала, фотоприёмник (он обычно помещается в фокусе вогнутого зеркала) и аппаратуру для анализа отраженного сигнала, например, спектрофотометр. Кроме того, лидар содержит электронные блоки определения времени (с точностью до долей наносекунды) и формирования выходных сигналов, например, приведение к цифровому виду.

Теперь рассмотрим основные физические принципы зондирования атмосферных параметров.

1. *Лазерное зондирование аэрозолей.* Эта задача технически наиболее простая, так как отраженный аэрозолями сигнал достаточно сильный. Отраженный сигнал зависит от размеров аэрозолей, их химических свойств и концентрации (количества частиц в единице объёма). Все эти параметры могут быть определены путём решения обратной задачи. Проблема состоит в правильном выборе длины волны лазерного излучения — излучение должно хорошо отражаться аэрозолями и плохо поглощаться атмосферными газами.

2. *Зондирование атмосферных газов.* Эта задача технически намного труднее, так как сигнал, отраженный молекулами газов, примерно в тысячу раз слабее сигнала, отраженного аэрозолями. Выделение полезно-

го сигнала на фоне помех создает дополнительные трудности. Тем не менее, высокая энергия лазерного излучения даёт возможность получить сигнал, достаточно хорошо регистрируемый чувствительными светоприёмниками. Для зондирования атмосферных газов можно воспользоваться методом *комбинационного рассеяния света* (КРС). Сущность его состоит в том, что световое излучение, рассеянное молекулами, не является монохромным. Помимо основной частоты рассеянное излучение содержит две спутниковые частоты: ν_1 и ν_2 . Таким образом, спектр рассеянного излучения имеет вид, изображенный на рис. 10.2.

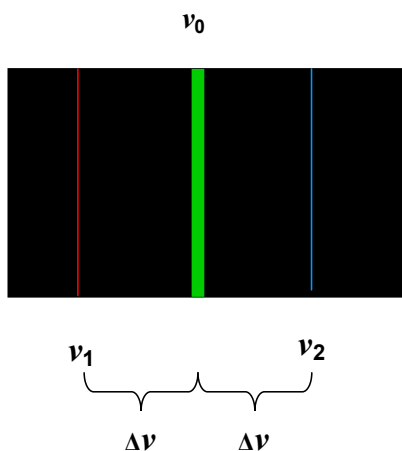


Рис. 10.2. Спектр рассеянного излучения

Разность частот $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_0$ зависит от химической природы молекулы газа. Таким образом, определив величину $\Delta\nu$, можно определить, какой газ содержится в зондируемом объеме. Яркость спутниковых линий несет информацию о количестве рассеивающего газа.

Реализация метода КРС для метеорологического зондирования сопряжена с большими трудностями. Если яркость основной линии мала, то яркость спутниковых линий ещё гораздо меньше. Кроме того, атмосфера представляет собой смесь различных газов, спектры которых накладываются друг на друга. Обязательным требованием является прозрачность нижележащих слоев атмосферы как для основной, так и для спутниковых линий. Соблюдение этого требования очень затрудняет выбор длины волны зондирующего сигнала. К счастью, в настоящее время существуют лазеры с перестраиваемой длиной волны. Это даёт возможность вести зондирование различных газов на различных частотах.

3. *Лазерное зондирование скорости ветра и турбулентности.* Для решения этой задачи применяются методы, использующие эффект Доплера при отражении лазерного луча аэрозолями. Одну из схем лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) мы рассматривали в главе 3, раздел 3.5.

4. *Лазерное зондирование влажности.* Для этой задачи также применяется метод КРС, причём определяется количество водяного пара.

5. *Лазерное зондирование атмосферного давления.* Определение давления сводится к определению содержания какого-либо широко распространенного в атмосфере газа, например, азота или кислорода. Эта задача может быть решена методом КРС при зондировании одного из этих газов.

6. *Лазерное зондирование температуры.* Измерение температуры с помощью лазера является одной из самых сложных задач и требует очень чувствительной аппаратуры. При этом применяется всё тот же метод КРС, причем зондирование опять-таки ведется для известных газов – азота или кислорода. При повышении температуры газа скорость молекул возрастает. Следовательно, возникает расширение спектральной линии отраженного сигнала за счет явления Доплера. Таким образом, ширина спектральной линии может служить мерой температуры газа.

Если яркость спутниковых линий J_1 и J_2 не зависит от температуры, то отношение яркостей J_1/J_2 зависит от температуры. Эта зависимость очень слабая, по-этому измерение J_1 и J_2 должно проводиться с очень высокой точностью очень чувствительной аппаратурой. Тем не менее, в настоящее время созданы опытные установки, позволяющие измерять температуру воздуха с точностью до 1^0 - $1,5^0$ на расстоянии до 1,5 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качурин Л.Г. Методы метеорологических измерений. - Л.: Гидрометеоиздат, 1985. - 456 с.
2. Стернзат М.С. Метеорологические приборы и измерения. - Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 392 с.
3. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах. Под ред. Афиногенова Л.П. и Романова Е.В. - Л.: Гидрометеоиздат, 1981. - 295 с.
4. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. - 751 с.
5. Коровин В.П., Тимец В.М. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Океанографические работы. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2010.
6. Городецкий О.А., Гуральник И.И., Ларин В.В. Метеорология, методы и технические средства наблюдений. - Л.: Гидрометеоиздат, 1984. - 327с.
7. Евтихеев Н.Н., Купершmidt А.Я., Папуловский В.Ф., Скугоров В.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 350с.
8. Восканян К.Л., Саенко А.Г. Актинометрические наблюдения. Пособие для учебной практики. СПб: 2010. - 54с.
9. Васильев В.И., Гусев Ю.М., Миронов В.Н. и др. Электронные промышленные устройства. – М.: Высшая школа, 1988. – 303 с.
10. Ямпольский В.С. Основы автоматики и электронно - вычислительной техники. – М.: Просвещение, 1991. – 223 с.
11. Карасев И.Ф., Васильев А.В., Субботина Е.С. Гидрометрия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991.
12. Григоров Н.О., Симакина Т.Е. Задачник по дисциплине «Методы и средства гидрометеорологических измерений». СПб: РГГМУ, 2006. – 41с.
13. Захаров В.М., Костко О.К., Бирич Л.Н., Крученицкий Г.М., Портасов В.С.. Лазерное зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 214 с.
14. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и её определение. Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 216 с.
15. Рацимор М.Я. Наклонная видимость. Методическое пособие для специалистов ГАМЦ, АМЦ и АМСГ. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 136 с.
16. Бочарников Н.В., Никишев П.Я., Солонин А.С. Дальность видимости на взлётно-посадочной полосе и её определение. С-Пб: Гидрометеоиздат, 1999. - 70 с.

17. Капустин А.В., Сторожук Н.Л. Технические средства гидрометеорологической службы. СПб: 2005. - 283 с.
18. Руководство к лабораторным работам по экспериментальной физике атмосферы. Под ред. Качурина Л.Г. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. - 510 с.
19. Мержеевский А.И., Фокин А.А. Электроника и автоматика в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. - 383 с.
20. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. – Киев: Высшая школа, 1980. - 144 с.
21. Захаров В.М., Костко А.К. Метеорологическая лазерная локация. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. - 317 с.
22. Базлова Т. А., Бочарников Н. В., Брылёв Г. Б. и др. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Том 1. // Под общей ред. А. С. Солонина. СПб.: Наука, 2010. – 312 с.
23. Базлова Т. А., Бочарников Н. В., Брылёв Г. Б. и др. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Том 2. // Под общей ред. А. С. Солонина. СПб.: Наука, 2010. – 518 с.
24. Дивинский Л.И. , Кузнецов А.Д., Солонин А.С. Комплексная радиотехническая аэродромная метеорологическая станция – КРАМС-4. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2010. – 80 с.
25. Баранов А.М., Солонин С. В. Авиационная метеорология. Изд. второе, перераб. и доп. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 383 с.
26. Кузнецов А.Д., Ляковский А.В., Поздняков Д.В., Сероухова О.С. Практикум по дистанционному зондированию. СПб: РГГМУ, 2004. - 130 с.
27. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 280 с.
28. Киселёв В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). СПб.; РГГМУ, 2004. – 428 с.
29. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка». – СПб.: Гидрометеоиздат, 2007. – 236 с.
30. Симакина Т.Е. Получение и обработка спутниковых снимков. Учебное пособие. СПб, РГГМУ, 2010. - 127 с.
31. Цифровое преобразование изображений. Учебное пособие для вузов. Под ред. Р.Е. Быкова. М.: Горячая линия - Телеком, 2003. - 228 с.
32. Качурин Л. Г. Физические основы воздействий на атмосферные процессы. - Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 463 с.
33. Чукин В. В. Физические свойства атмосферы. – СПб.: «Система», 2005. – 112 с.
34. Бройдо А.Г. Руководство к учебной практике по метеорологии. Л.:

ЛГМИ, 1971. - 154 с.

35. Виртуальная лаборатория. Гидрометеорологические приборы и оборудование. 2012. <http://tech.meteorf.ru/>.

35. Метеорологические наблюдения: распределенные в пространстве и во времени. Владимир Александрович Гордин «Квант» №3, №4, 2010, <http://elementy.ru/lib/431200>

36. Ian Strangeways. Measuring the Natural Environment. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000. – 365 p.

37. Grigorov N.O. Hydrometeorological measurements. Конспект лекций на английском языке. Изд. РРМУ, 2001. - 157 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Таблица значений удельного сопротивления металлов
и сплавов (ρ)**

Металл	ρ , Ом/м
Алюминий	$(0,025 - 0,278) \cdot 10^{-6}$
Алюмель	$(0,33 - 0,35) \cdot 10^{-6}$
Вольфрам	$(0,055 - 0,061) \cdot 10^{-6}$
Железо химически чистое	$0,0907 \cdot 10^{-6}$
Железо поделочное	$0,1 \cdot 10^{-6}$
Золото	$0,022 \cdot 10^{-6}$
Кобальт	$0,097 \cdot 10^{-6}$
Константан	$(0,45 - 0,5) \cdot 10^{-6}$
Копель	$0,49 \cdot 10^{-6}$
Манганин	$0,42 \cdot 10^{-6}$
Медь химически чистая	$(0,0156 - 0,0168) \cdot 10^{-6}$
Медь проводниковая	$0,017 \cdot 10^{-6}$
Молибден	$(0,0438 - 0,0476) \cdot 10^{-6}$
Никель	$(0,118 - 0,138) \cdot 10^{-6}$
Нихром	$(0,95 - 1,05) \cdot 10^{-6}$
Платина «Экстра»	$(0,0981 - 0,106) \cdot 10^{-6}$
Платинородий	$0,19 \cdot 10^{-6}$
Ртуть	$0,943 \cdot 10^{-6}$
Серебро	$0,0147 \cdot 10^{-6}$
Хромель	$0,7 \cdot 10^{-6}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Таблица значений температурного коэффициента
сопротивления (α) для различных металлов и сплавов**

<i>Металл</i>	α, K^{-1}
Алюминий	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Алюмель	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Вольфрам	$(4,21..4,64) \cdot 10^{-3}$
Железо химически чистое	$(6,25..6,57) \cdot 10^{-3}$
Железо поделочное	$(4..6) \cdot 10^{-3}$
Золото	$3,97 \cdot 10^{-3}$
Кобальт	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Константан	$4 \cdot 10^{-5}$
Копель	$-1 \cdot 10^{-4}$
Манганин	$6 \cdot 10^{-6}$
Медь проводниковая	$4,33 \cdot 10^{-3}$
Молибден	$4,35 \cdot 10^{-3}$
Нихром	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Платина	$3,94 \cdot 10^{-3}$
Ртуть	$0,96 \cdot 10^{-3}$
Сурьма	$4,73 \cdot 10^{-3}$
Свинец	$4,11 \cdot 10^{-3}$
Серебро	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Хромель	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Цинк	$3,9 \cdot 10^{-3}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Значения термоЭДС для различных металлов
в паре с платиной (*e*)

Наименование проводника	<i>e</i>, в/К
Алюминий	$+0.04 \cdot 10^{-5}$
Алюмель	$-1.38 \cdot 10^{-5}$
Вольфрам	$+0.79 \cdot 10^{-5}$
Железо поделочное	$+1.87 \cdot 10^{-5}$
Золото	$+0.80 \cdot 10^{-5}$
Константан	$-3.50 \cdot 10^{-5}$
Копель	$-4.00 \cdot 10^{-5}$
Кобальт	$-1.76 \cdot 10^{-5}$
Молибден	$+1.31 \cdot 10^{-5}$
Медь проводниковая	$+0.75 \cdot 10^{-5}$
Манганин	$+0.80 \cdot 10^{-5}$
Нихром	$+2.50 \cdot 10^{-5}$
Никель	$-1.54 \cdot 10^{-5}$
Платина	0.00
Платинородий	$+0.64 \cdot 10^{-5}$
Платиноиридий	$+1.30 \cdot 10^{-5}$
Свинец	$+0.44 \cdot 10^{-5}$
Серебро	$-0.72 \cdot 10^{-5}$
Хромель	$+2.71 \cdot 10^{-5}$
Цинк	$+0.70 \cdot 10^{-5}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

**Таблица значений температурного коэффициента
расширения некоторых металлов и сплавов (β)**

Металл	β , K^{-1}
Алюминий	$23,8 \cdot 10^{-6}$
Алюмель	$15,1 \cdot 10^{-6}$
Вольфрам	$3,36 \cdot 10^{-6}$
Железо химически чистое	$11 \cdot 10^{-6}$
Железо поделочное	$13 \cdot 10^{-6}$
Золото	$14,3 \cdot 10^{-6}$
Кобальт	$12,3 \cdot 10^{-6}$
Константан	$15,2 \cdot 10^{-6}$
Копель	$15,6 \cdot 10^{-6}$
Медь химически чистая	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Медь проводниковая	$16,4 \cdot 10^{-6}$
Молибден	$5,1 \cdot 10^{-6}$
Никель	$22,8 \cdot 10^{-6}$
Нихром	$17 \cdot 10^{-6}$
Платина «Экстра»	$8,99 \cdot 10^{-6}$
Ртуть	$18,4 \cdot 10^{-6}$
Серебро	$19,5 \cdot 10^{-6}$
Хромель	$16,1 \cdot 10^{-6}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Назначение и основные принципы работы осциллографа

В современных метеорологических измерительных приборах (таких как ИВО, РВО, ФИ-1, ФИ-2, М-63 и др.) применяются достаточно сложные электронные схемы. Для отладки, ремонта или просто исследования их с учебной целью применяют стандартные лабораторные электроизмерительные приборы: ампервольтметр (тестер), осциллограф, генераторы сигналов и другие. Электронно-лучевой осциллограф является многоцелевым исследовательским прибором и применяется достаточно часто. Поэтому студенты, изучающие метеорологические приборы, должны ознакомиться с основными типами существующих осциллографов, представлять себе их устройство и порядок работы с ними. Устройство осциллографов достаточно подробно описано в учебниках по электронике. В этом Приложении вспомним основные узлы осциллографа и порядок работы с ним.

Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ). Её схема показана на рис. П. 5.1. В её состав входят: источник электронов – катод (1), ускоряющий электрод-сетка (3), фокусирующие электроды – «электронная линза» (4), вертикально отклоняющие пластины (5), горизонтально отклоняющие пластины (6), анод (7) и экран (8), покрытый с внутренней стороны люминофором. Катод подогревается накаливаемой металлической нитью – накалом, что способствует эмиссии с него электронов. Катод и накал находятся внутри металлического цилиндра (2) с отверстием для вылета электронов. Такое устройство называют «электронной пушкой». Цилиндр заряжен отрицательно по отношению к катоду, поэтому электроны, вылетевшие с катода, отталкиваются стенками цилиндра и образуют своеобразное электронное облако внутри него.

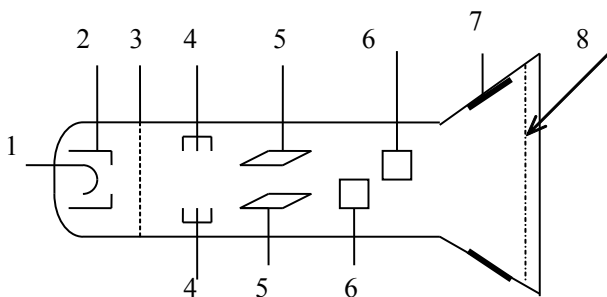


Рис. П. 5.1. Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ)

Единственный путь для электронов – отверстие в цилиндре, через которое они и вылетают узким пучком. Первоначальный разгон электронов осуществляется подачей положительного напряжения на сетку (3). Тем самым в промежутке «сетка – катод» образуется весьма сильное поле, ускоряющее электроны. Далее электроны летят к аноду, который имеет форму кольца. На него подается большое положительное напряжение (от нескольких сотен до нескольких тысяч вольт). Однако анод расположен достаточно далеко от катода, поэтому без первоначального ускорения, вызванного полем «сетка-катод», электроны не могли бы достичь необходимой скорости и рассеялись бы внутри трубки. Следовательно, управляя напряжением сетки, можно управлять величиной потока электронов, а значит, и *яркостью* изображения на экране. Для этого на переднюю панель осциллографа выведена специальная ручка. Иногда сетку называют *ускоряющим электродом*. В некоторых моделях осциллографов управление яркостью осуществляется регулировкой напряжения катода при неизменном напряжении на сетке.

Электроны, представляющие собой отрицательно заряженные частицы, не могут лететь узким потоком. Они неизбежно рассеиваются, отталкиваясь друг от друга, поток будет расширяться. Но можно сузить поток электронов, поставив на его пути, например, кольцевой электрод, заряженный отрицательно. Можно поставить систему электродов сложной формы и подавать на них различные напряжения, заставляя поток электронов сходиться и расходиться. Так устроены фокусирующие электроды (4). Управляя напряжением на одном из них, можно добиться того, что электронный пучок будет сходиться как раз в плоскости экрана. Для этого предусмотрена ручка «фокус» на передней панели осциллографа.

Управляя напряжением на отклоняющих пластинах (5) и (6), можно перемещать электронный пучок вверх-вниз и вправо-влево. Обычно на горизонтально отклоняющие пластины подается пилообразное напряжение – *напряжение развертки*. Его эпюра показана на рис. П. 5.2.

В то время как на правой пластине напряжение возрастает по линейному закону (интервал $0 - \tau_1$), электронный луч отклоняется слева направо. Это движение называют *прямым ходом луча*. В течение этого времени на вертикально отклоняющие пластины подают исследуемое напряжение. Нетрудно понять, что на экране осциллографа электронный луч рисует картину, отражающую изменение во времени исследуемого напряжения, например, синусоиду, импульсы и пр. В течение времени $\tau_1 - \tau_2$ происходит обратный ход луча – справа налево. На это время электронный пучок

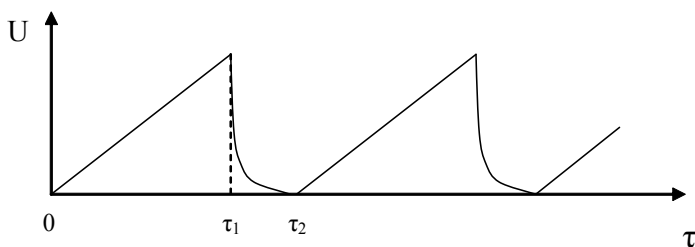


Рис. П. 5.2. Эпюра напряжения развертки

«гасится» подачей отрицательного напряжения на сетку (3). Таким образом, на экране обратный ход луча не виден.

Работа осциллографа в автоколебательном режиме (режиме непрерывной развертки)

Совершенно очевидно, что неподвижная картина на экране будет наблюдаться только в том случае, если каждый раз в течение времени прямого хода луча электронный луч движется по экрану по одной и той же траектории, т. е. картины накладываются друг на друга. Это возможно только тогда, когда, во-первых, исследуемый сигнал является периодическим, а во-вторых, фаза этого периодического сигнала в момент времени τ_2 (рис. П. 5.2) соответствует фазе сигнала в нулевой момент времени. Так как управлять фазой исследуемого сигнала обычно невозможно, то совпадения можно добиться, управляя периодом (или частотой) пилообразного напряжения развертки. Для этого на панели осциллографа предусмотрено две ручки: ступенчатое переключение частоты развертки (обычно частота выбирается кратной 1, 2, 5, 10, 20 и т.д.) и плавная регулировка частоты. Обычно эти ручки бывают совмещены, например, одна внутри другой. Управляя ими, можно добиться неподвижной картины на экране и таким образом представить себе эпюру исследуемого напряжения, что иногда бывает достаточно для исследования той или иной схемы.

Однако работать в таком режиме ручной синхронизации чрезвычайно неудобно. Поэтому в большинстве современных осциллографов предусмотрена автоматическая синхронизация развертки с исследуемым сигналом. Её идея заключается в том, что развертка начинается в тот момент, когда амплитуда исследуемого сигнала превысит заданную величину — *порог синхронизации*. Если же амплитуда исследуемого сигнала меньше

порога синхронизации, то развёртка все равно подается, но в этом случае сигналы не синхронизируются. Таким образом, синхронизация в автоколебательном режиме не является жесткой (как, например, в ждущем режиме) и на экране возможно дрожание, «плавание», появление двойного изображения и другие нежелательные эффекты. Тем не менее, автоколебательный режим применяется достаточно часто.

В автоколебательном режиме можно измерять амплитуду сигнала. Для этого на экране осциллографа имеется сетка с делениями. Одно деление (около 1 см) по вертикали соответствует определённому напряжению в вольтах. Цена деления задаётся ручкой «*вольт/дел*» на панели управления. Этой ручкой регулируется усиление исследуемого сигнала перед подачей его на вертикально отклоняющие пластины. Обычно бывают две ручки: ступенчатое переключение с заданным коэффициентом и плавная регулировка. Как и в случае сигнала развертки, ручки совмещены, т. е. одна находится внутри другой.

Необходимо, однако, иметь в виду следующее. Точное определение амплитуды с заданной ценой деления шкалы возможно *только в крайнем правом положении ручки плавной регулировки!* Это положение ручки фиксируется специальным стопором, и ручка выводится и вводится в него с характерным щелчком.

Автоколебательный режим используется для определения вида зависимости сигнала от времени и для измерения амплитуды сигнала. Измерение временных промежутков и связанных в ними величин (частоты, сдвига фаз двух сигналов и т.д.) удобнее выполнять в *ждущем режиме*.

Ждущий режим работы осциллографа

Ждущий режим работы отличается от автоколебательного режима главным образом тем, что при отсутствии синхронизирующего сигнала развёртка также отсутствует. Разумеется, в этом случае картина на экране также не наблюдается. Это гарантирует наблюдателя от тех нежелательных эффектов, которые могли наблюдаться в автоколебательном режиме.

В ждущем режиме развёртка (т.е. очередной «зубец пилы» на рис. П. 5.2) запускается в тот момент, когда амплитуда исследуемого сигнала превышает порог синхронизации. Тогда, если исследуемый сигнал периодический, начало развертки всегда соответствует одной и той же фазе исследуемого сигнала. Как уже было сказано, это является основным требованием, при выполнении которого картина на экране будет неподвижной.

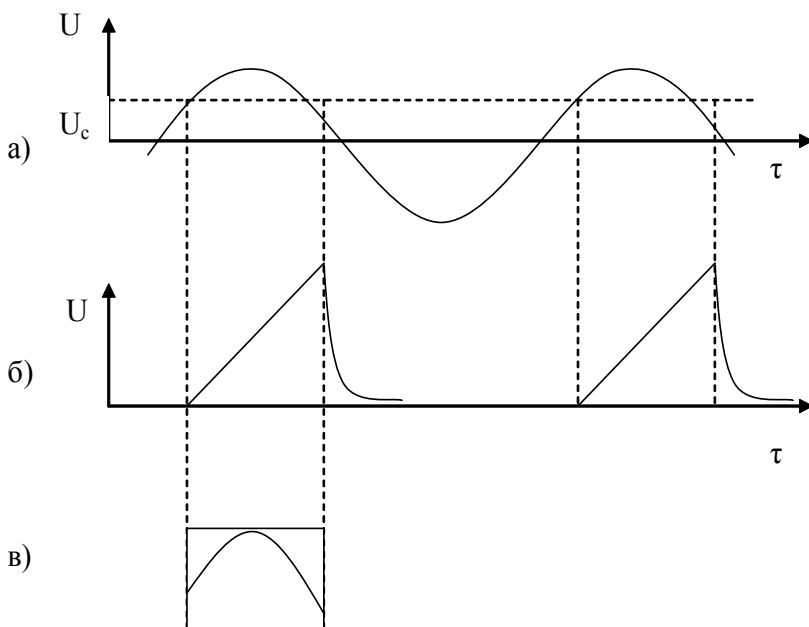


Рис. П. 5.3. а – исследуемый сигнал; б – напряжение развертки; в – видимый на экране осциллографа участок исследуемого сигнала

На рис. П. 5.3 показана эпюра напряжения развертки в этом случае. Как видно из рис. П. 5.3, б, развертка не является непрерывной, т. е. конец одного зубца не совпадает с моментом начала следующего.

Величина порога синхронизации U_c (рис. П. 5.3, а) может регулироваться специальной ручкой на панели управления. При этом следует помнить, что при изменении усиления сигнала ручкой «вольт/дел» изменяется фаза сигнала, при которой включается развертка.

Следующий «зубец» развертки включается опять-таки в момент достижения исследуемым сигналом порогового уровня. Таким образом, эпюра напряжения развертки в ждущем режиме представляет собой отдельные «зубцы» (рис. П. 5.3, б), в промежутках между которыми напряжение развертки равно нулю.

Синхронизация развертки с исследуемым сигналом – так называемая *внутренняя синхронизация* – не единственный вариант использования ждущего режима. Иногда бывает удобно запустить развертку по внешнему сигналу, подаваемому на специальный *вход синхронизации*. Такой режим получил название *внешней синхронизации*. Уровень синхронизи-

рующего сигнала, при котором происходит запуск развертки, также может регулироваться ручкой на панели управления (*«уровень запуска»*).

Как в режиме внутренней, так и в режиме внешней синхронизации запуск развертки может производиться при нарастании или при убывании сигнала. Для переключения режима срабатывания сигнала запуска предусмотрены кнопки или переключатели на панели управления с соответствующими надписями или значками «+» и «-». Полярность сигнала запуска выбирается в зависимости от ожидаемого вида исследуемого сигнала. Например, если известно, что сигнал представляет собой отрицательные импульсы, то в режиме внутренней синхронизации запуск развертки целесообразен при убывании напряжения. Если же вид исследуемого сигнала заранее не известен, то рекомендуется сначала использовать режим непрерывной развертки для определения примерного вида сигнала, а затем измерить все его характеристики в ждущем режиме.

Получив в ждущем режиме устойчивую картину на экране, приступают к точным измерениям характеристик сигнала. Измерение амплитуды производится точно так же, как и в режиме непрерывной развертки. Для измерения промежутков времени используются горизонтальные деления масштабной сетки на экране. Цена деления масштабной сетки регулируется ручкой *«время/дел»*, расположенной на панели управления. Предусмотрена ступенчатая и плавная регулировка, причем ручки обычно бывают совмещены (одна внутри другой). Как и при измерении амплитуды, точное измерение временных промежутков возможно *только в крайнем правом положении ручки плавной регулировки!* Это положение также фиксируется стопором. В современных осциллографах цена деления шкалы регулируется в широких пределах – от 10 с до 1мкс и менее.

Двухлучевые и двухканальные осциллографы

При исследовании работы схем часто бывает нужно рассмотреть одновременно два сигнала, например, сопоставить их фазу, измерить промежутки времени между импульсами первого и второго сигнала и т.п. Для этого используются осциллографы, на экране которых возможно одновременное наблюдение двух сигналов, например, один под другим.

Устройство таких осциллографов зависит от используемой в них электронно-лучевой трубки. Можно использовать ЭЛТ, снабженные двумя электронными пушками (осциллографы, укомплектованные такой трубкой, собственно, и называют *двухлучевыми*). Но чаще используются обычные

ЭЛТ с одной пушкой. При этом на вертикально отклоняющие пластины подаются поочередно первый и второй сигнал, причём частота чередования сигналов (тактовая частота) составляет несколько кГц. Одновременно со вторым сигналом подается смещающее постоянное напряжение, благодаря чему второй сигнал наблюдается на другом уровне. Разумеется, в этом случае картина на каждом уровне состоит из штриховых линий, но благодаря большой величине тактовой частоты штрихи становятся незаметными при наблюдении. Такие осциллографы получили название *двухканальных*.

Если же частота развертки не превышает 20-30 Гц, то можно использовать другой способ одновременного наблюдения двух лучей. На вертикально отклоняющие пластины по очереди подаются первый и второй исследуемые сигналы. Первый «зубец» развертки соответствует первому сигналу, второй – второму, третий – опять первому и т.д. Для того чтобы различать их, во время четных периодов на вертикально отклоняющие пластины подается ещё и постоянное напряжение, благодаря чему второй сигнал наблюдается на другом уровне – выше или ниже первого.

Управление двухканальными и двухлучевыми осциллографами в целом не отличается от управления одноканальными осциллографами. Разумеется, каждый канал управляется отдельно, количество ручек управления соответственно возрастает. Развертка – общая для двух лучей, а внутренняя синхронизация в ждущем режиме возможна как по первому, так и по второму сигналу. Для удобства представления на экране сигналов, предусмотрены ручки, смещающие каждый луч по вертикали вверх и вниз. Возможны следующие режимы наблюдения:

- наблюдение только одного (первого) луча;
- суммирование двух сигналов;
- одновременное наблюдение первого и второго луча на разных уровнях;
- последовательное наблюдение первого, а затем второго луча.

Измерение амплитуды сигналов и временных промежутков в двухлучевых осциллографах производится точно так же, как и в однолучевых. Более редко используются многоканальные осциллографы – например, четырехканальные.

Блок-схема осциллографа

С целью более полного изучения принципа действия осциллографа рассмотрим его блок-схему (рис. П. 5.4).

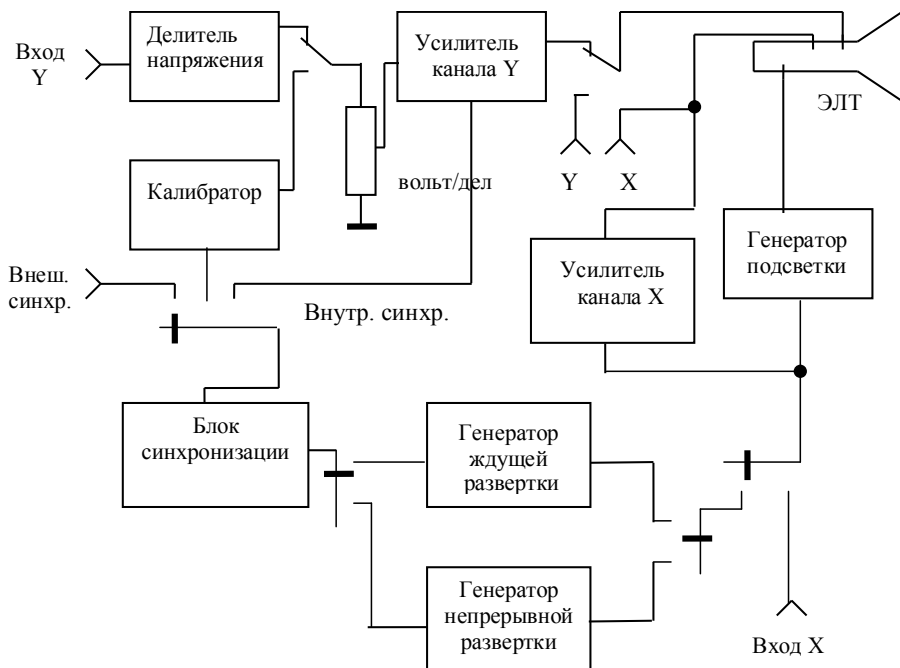


Рис. П. 5.4. Блок-схема одноканального осциллографа

На вход Y подается исследуемый сигнал. Его амплитуду можно регулировать *делителем напряжения*. Далее сигнал поступает на *усилитель канала Y*, коэффициент усиления которого можно изменять ручкой «*вольт/дел*». Далее сигнал подается на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Амплитуда сигнала на пластинах обычно составляет несколько десятков вольт. Можно, однако, подать сигнал непосредственно на пластины, что бывает необходимо в некоторых случаях. Тогда используется специальное гнездо на боковой панели осциллографа (Y). Существует возможность прямой подачи сигнала и на горизонтально отклоняющие пластины (X).

Далее рассмотрим формирование и прохождение канала развертки. В режиме внутренней синхронизации, как было сказано выше, развертка начинается тогда, когда уровень исследуемого сигнала (он подается с усилителя канала Y) превышает порог синхронизации, формируемый *блоком синхронизации*. В момент совпадения блок синхронизации формирует импульс, который подается на один из генераторов развертки - *генератор ждущей развертки* (в ждущем режиме) или *генератор непрерывной развертки* (в режиме непрерывной развертки). пилообразные импульсы

развертки, формируемые этими блоками, усиливаются *усилителем канала X* и далее поступают на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. Кроме того, импульсы развертки подаются на *генератор подсветки*, который формирует прямоугольные положительные импульсы для подачи на ускоряющий электрод (сетку). Таким образом, длительность подсвечивающего импульса равна длительности импульса развертки. Длительность импульсов развертки может регулироваться ручкой «*время/дел*», которая управляет работой генераторов развертки.

Имеется возможность подать сигнал на вход *X* через усилитель. Для этого служит отдельное гнездо на передней панели осциллографа (*Вход X*).

В режиме внешней синхронизации внешний синхронизирующий импульс подаётся на блок синхронизации через специальное гнездо «*Вход синхронизации*».

Во всех осциллографах предусмотрена возможность проверки шкалы измерения амплитуды. Для этого включается специальный блок калибровки (*Калибратор амплитуды*), генерирующий импульсы стандартной амплитуды и длительности. Эти импульсы подаются на усилитель канала *Y* и на вход синхронизации для обеспечения работы одного из блоков развертки.

Двухлучевые и двухканальные осциллографы имеют те же самые блоки с той лишь разницей, что некоторые из изображенных на рис. П. 5.4 блоков задублированы. Студентам рекомендуется самим представить себе соответствующую блок-схему в качестве полезного упражнения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
КРАТКАЯ ИСТОРИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В РОССИИ	4
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	9
1. Классификация метеорологических приборов	9
2. Классификация методов измерения	13
3. Основные характеристики измерительных приборов	15
Глава 1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ	18
1.1. Тепловая инерция термометров	18
1.2. Резисторы и термисторы. Зависимость сопротивления от температуры	27
1.3. Мостовые измерительные схемы	30
1.4. Уравновешенный термометр сопротивления	34
1.5. Следящие системы с отрицательной обратной связью. Автоматически уравнивающийся термометр сопротивления	38
1.6. Неуравновешенный термометр сопротивления	42
1.7. Дифференциальный термометр сопротивления	45
1.8. Термоэлектрические явления. Термопара и термобатарея	46
1.9. Деформационные термометры	53
1.10. Радиационные термометры	56
1.11. Акустические термометры	63
Глава 2. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА	67
2.1. Влажность. Основные понятия. Психрометрический метод измерения влажности	67
2.2. Деформационные гигрометры	76
2.3. Конденсационные гигрометры	77
2.4. Электролитические гигрометры	81
2.5. Электролитические гигрометры с подогревом	86
2.6. Сорбционные гигрометры	90
2.7. Радиационные гигрометры	93
2.8. Конденсаторные гигрометры	96
Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА	99
3.1. Теория ротоанемометров	99
3.2. Индукционные анемометры	108
3.3. Импульсные (контактные) анемометры	114

3.4. Акустические анемометры	117
3.5. Лазерный доплеровский измеритель скорости ветра	120
3.6. Измерители направления ветра. Дистанционные измерители	124
3.7. Использование проволочных потенциометров и угловых кодеров при передаче информации об угле поворота флюгарки ...	128
Глава 4. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	132
4.1. Жидкостные барометры	132
4.2. Деформационные барометры	136
4.3. Барометр БРС	140
4.4. Вакуумметры	141
Глава 5. АКТИНОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	143
5.1. Измерение прямой солнечной радиации	144
5.2. Измерение рассеянной и суммарной радиации	149
5.3. Измерение радиационного баланса. Балансомер	152
Глава 6. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ	159
6.1. Информация. Основные определения, свойства. Цифровые коды	159
6.2. Устройства для хранения информации (запоминающие устройства)	164
6.3. Логические элементы (малые интегральные схемы)	168
6.4. Логические действия и логические функции. Минимизация логических функций	171
6.5. Средние интегральные схемы	176
6.6. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи	181
Глава 7. ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	188
7.1. Измерение высоты нижней границы облачности	188
7.2. Измерение содержания озона в атмосфере	192
7.3. Измерение метеорологической дальности видимости. Понятие контраста. Уравнение Кошмидера	194
7.4. Поляризационный измеритель дальности видимости М-53а	199
7.5. Регистратор дальности видимости РДВ-3	202
7.6. Импульсный фотометр ФИ-1	206
7.7. Дистанционная метеорологическая станция М-49	211
7.8. Анеморумбометр М-63М	216
7.9. Пульт цифрового анеморумбометра МВ1-2-М1	225

7.10. Измерение радиоактивного фона и радиоактивного заражения местности	235
Глава. 8. КОМПЛЕКСНАЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ АЭРОДРОМНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ КРАМС-2	242
8.1. Датчик атмосферного давления станции КРАМС-2	245
8.2. Датчик температуры и влажности КРАМС-2	247
8.3. Датчик близких гроз	250
8.4. Датчик параметров ветра КРАМС-2	251
8.5. Датчик метеорологической дальности видимости КРАМС-2	252
8.6. Датчик высоты нижней границы облачности КРАМС-2	252
Глава 9. СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	253
9.1. Принцип передачи неподвижных изображений	253
9.2. Принцип действия факсимильных аппаратов	254
9.3. Устройство метеорологических спутников. Системы ориентации	256
9.4. Параметры орбит искусственных спутников Земли	259
9.5. Устройство и работа видикона	264
9.6. Преобразователи с зарядовой связью (ПЗС)	268
9.7. Дешифрирование метеорологической информации на снимках с метеорологических спутников	270
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	279
ЛИТЕРАТУРА	284
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Таблица значений удельного сопротивления металлов и сплавов (ρ)	287
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Таблица значений температурного коэффициента (α) для различных металлов и сплавов	288
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Значения термоЭДС для различных металлов в паре с платиной	289
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Таблица значений температурного коэффициента расширения некоторых металлов и сплавов (β)	290
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Назначение и основные принципы работы осциллографа	291
ОГЛАВЛЕНИЕ	300

CONTENT

Introduction	3
Brief History of Meteorological measurements in Russia	4
Main Basement	9
1. Classification of Meteorological Devices	9
2. Classification of Measure Methods	13
3. Main Values of Meteorological Devices	15
Chapter 1. Temperature measurements	18
1.1. Heat Inertia of Thermometers	18
1.2. Resistor Temperature Sensors. Resistance Dependence on Temperature	27
1.3. Measuring Bridge Circuits	30
1.4. Balanced Resistive Thermometer ³⁴	
1.5. Feedback Controlled Systems. Automatically Balanced Resistive Thermometer	38
1.6. Disbalanced Resistive Thermometer	42
1.7. Differential Resistive Thermometers	45
1.8. Thermoelectrical Phenomenas. Thermocouple and Themopile	46
1.9. Deformation Thermometers	53
1.10. Radiation Thermometers	56
1.11. Acoustic Thermometers	63
Chapter 2. Humidity Measurements	67
2.1. Humidity. Main Values. Psychrometer Method of Humidity Measurements	67
2.2. Deformation Hygrometer	76
2.3. Condensation Hygrometer (Dew-Point Hygrometer)	77
2.4. Electrolytic Hygrometer	81
2.5. Electrolytic Hygrometer Warm up	86
2.6. Sorptional Hygrometers	90
2.7. Radiation Hygrometer	93
2.8. Capacitor Hygrometer	96
Chapter 3. Wind Mesutements	99
3.1. The Theory of Rotoanemometers	99
3.2. Inductive wind meter	108
3.3. Pulse (contact) wind meter	114
3.4. Acoustic wind meter	117
3.5 Laser Doppler wind meter	120

3.6. Wind Direction Measurements. Remote Measurements.....	124
3.7. Wire Potentiometers and Angle Decoders Using to Transmit Information about Vane Position	128
Chapter 4. Atmospheric Pressure measurements	132
4.1. Liquid Barometers	132
4.2. Deformation Barometers	136
4.3. Barometer БРС	140
4.4. Low Pressure Measurements	141
Chapter 5. Actinometry Measurements	143
5.1. Direct Solar Radiation Measurements	144
5.2. Diffuse and Net Radiation Measurements	149
5.3. Radiation Balance Measurements	152
Chapter 6. Basement of Digital Devices Construction	159
6.1. Information. Main Definitions, Properties. Digital Codes	159
6.2. Elements to Memorize Information	164
6.3. Gates (Simple Integral Circuits)	168
6.4. Logic Actions and Logic Functions. Logic Functions Minimization	171
6.5. Medium Scale Integration Circuits (MSI)	176
6.6. Digital-Analog and Analog-digital Converters	181
Chapter 7. Remote Devices	188
7.1. Cloud Base Altitude Measurements	188
7.2. Ozone Measurements	192
7.3. Meteorological Visibility Range Measurements. Contrast. Koshmider Equation	194
7.4. Polarization Visibility Range Instrument M-53a	199
7.5. Visibility Range Registrar РДВ-3	202
7.6. Pulse Photometer ФН-1	206
7.7. Remote Meteorological Station M-49	211
7.8. Wind Meter M-63M	216
7.9. Consol of Digital Wind Meter MB1-2-M1	225
7.10. Measurements of radioactive Background and radioactive Pollution	235
Chapter 8. Complex Radioengineering Airdrome Meteorological Station CRAMS-2	242
8.1. Atmospheric Pressure Transducer	245
8.2. Temperature and Humidity Transducer	247
8.3. Thunderstorm Transducer	250

8.4. Wind Parameters Transducer	251
8.5. Meteorological Visibility Range Transducer	252
8.6. Cloud Boundary Transducer	252
Chapter 9. Apparatus to Transmit Meteorological Information	253
9.1. Principle to Transmit Unmoving Pictures	253
9.2. Principle of Facsimile Apparatus	254
9.3. Meteorological Satellites. Orientation Systems	256
9.4. Satellite Orbits and Their Parameters	259
9.5. TV-Transmit Tube Operation	264
9.6. Transmitter with charge connection	268
9.7. Decoding of Meteorological Information from Satellite	270
Perspective of Meteorological Devices Development	279
Literature	284
Enclosure 1. The Table of Specific Resistance for Metals and Alloys (ρ)	287
Enclosure 2. The Table of Resistant Coefficient of Temperature (α) for Metals and Alloys	288
Enclosure 3. Thermoelectromotive force for Various Metals in couple with Platinum	289
Enclosure 4. The Table of Expansion Coefficients for Some Metals and Alloys (β)	290
Enclosure 5. The Purpose and Main Principles of Oscillograph Operation	291
Content	300

Учебное издание

*Николай Олегович Григоров,
Андрей Геннадьевич Саенко,
Карина Левановна Восканян*

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ.
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ**

Редактор *О.С. Крайнова*
Компьютерная вёрстка *К.П. Ерёмин*

ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 28.12.2012. Формат 60х90 1/16. Гарнитура “Таймс”

Печать цифровая. Усл. печ. л. 19,1. Тираж 300 экз. Заказ № 140.

РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр. 98.

Отпечатано в ЦОП РГГМУ
