

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²Центральная аэрологическая обсерватория

Введение

Изучение атмосферы земли является одним из глобальных направлений научного мира, так как атмосфера является ключевой фигурой в модели взаимодействия солнечной радиации и земли. В настоящее время ведущие страны мира проводят многоцелевые исследования атмосферы с использованием авиации, спутников, радиозондов и ракет. Данные исследования направлены на приближение к пониманию природы явлений и получению реалистичной картины протекающих процессов в атмосфере. Самыми эффективными исследованиями тропосферы земли считаются анализы данных полученных на основе авиационного зондирования, так как авиационный тип исследования позволяет оперативно, контактными методами получить исследуемые метеорологические параметры. Россия, а до 1991 года СССР, являлась ведущей страной в данном исследовательском направлении. После Великой Отечественной войны, по инициативе ЦАО, была создана сеть регулярного самолётного зондирования атмосферы, насчитывавшая около 30 пунктов, размещенных в разных районах СССР. ЦАО уделяла большое внимание вопросам разработки аппаратуры и методам исследования микро- и мезо-физики облаков. Однако, после распада СССР разработки и модернизации аппаратуры прекратились, поэтому на данный момент отечественные ученые-исследователи вынуждены пользоваться западными разработками принцип работы которых основан на работе приборов разработанных в 70-е годы нашими – отечественными учёными. Таким образом, в данной научно-исследовательской работе рассматривается такая актуальная проблема как отсутствие отечественного производства современного, высокоточного оборудования для исследования интегральной микрофизической характеристики – водность.

1. Описание и работа

1.1. Назначение

Измеритель водности облаков ИВО-ЛЭ является метеорологическим прибором, предназначенным для непрерывного измерения локального удельного содержания сконденсированной воды (водности) в облаках и туманах, движущихся с воздушным потоком относительно датчика прибора. ИВО позволяет измерять как полную (жидкую плюс ледяную) водность, так и отдельно ее жидкую составляющую и обладает диапазоном измерений от 0,003 г·м³ до 3 г·м³. Эти функциональные возможности и конструктивное исполнение ИВО обеспечивают его пригодность для исследований любых атмосферных облаков в диапазоне температур от +30°С до 60°С.

В процессе измерений ИВО преобразует текущие величины водности в выходные аналоговые сигналы. Значения измеренных величин должны рассчитываться потребителем по значениям напряжений выходных сигналов и скорости воздушного потока.

Конструкция ИВО рассчитана на установку и эксплуатацию на самолетах гражданской авиации, имеющих воздушную скорость полета от 70 до 250 м/с и оборудованных средствами преобразования, мониторинга и записи выходных показаний.

1.2. Структурная схема, состав и назначение основных элементов

Структурная схема ИВО приведена на Рис. 1

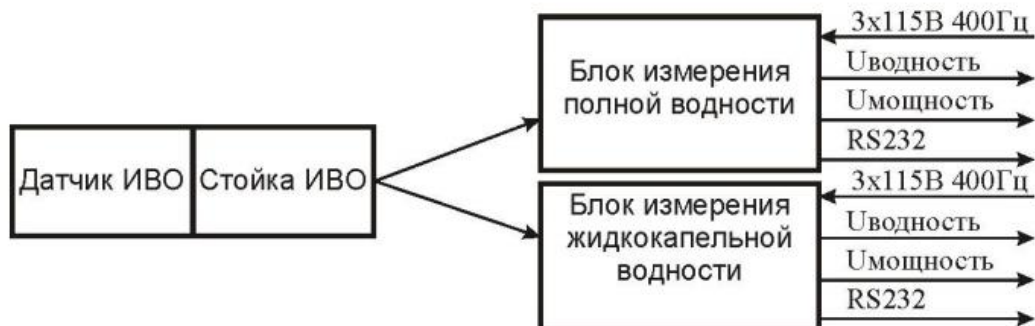


Рис.1 Структурная схема ИВО-ЛЭ

ИВО-ЛЭ состоит из датчика ИВО, установленного на стойке ИВО в воздушном потоке и двух идентичных электронных блоков, установленных в стойке оператора. Один электронный блок измеряет полную водность (жидкую и твердую фазу), а другой только жидкую. Оба электронных блока питаются от бортовой сети 115/400 и выдают информацию как в аналоговом, так и цифровом виде.

1.2.1. Датчик ИВО

Датчик водности предназначен для установки непосредственно в исследуемом воздушно-аerosольном потоке, в частности за бортом самолета. Его принципиальное устройство описано в разделе. Внешний вид показан на Рис. 2. Выводы обмоток датчика соединены с контактами разъема, жестко связанного с платой основания и служащего для электрического и механического подсоединения датчика к выносной стойке. Этим обеспечиваются простота монтажа датчика на стойке, связанная с необходимостью его замены при возникших неисправностях вследствие внешних воздействий. Плата датчика имеет форму флюгера для обеспечения ее автоматической установки параллельно потоку с целью стабилизации термодинамических характеристик при вариациях угла тангажа самолета в полете. Каждый датчик отградуирован по параметрам, необходимым для установки заданной рабочей температуры и расчета значений водности:

1. Отношение мостов рабочего чувствительного элемента (ЧЭ) и опорного ЧЭ при рабочих температурах 70°C и 90°C.
 2. Значения произведения (RS) для рабочего ЧЭ при тех же температурах.
- Результаты градуировки занесены в паспорт, прилагаемый к каждому датчику.

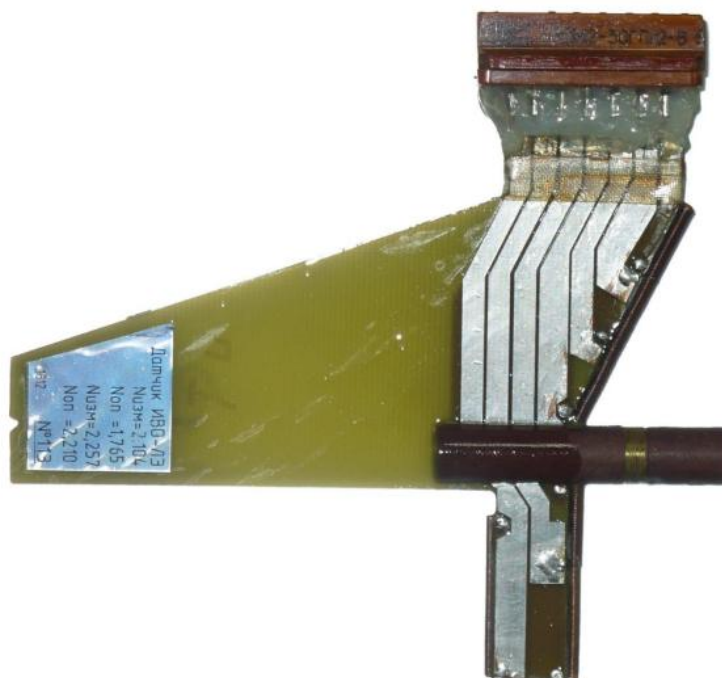


Рис. 2. Внешний вид датчика ИВО

На флюгере датчика указан его серийный номер и отношение его рабочего и опорного моста для температуры 90 градусов (Рис. 3).

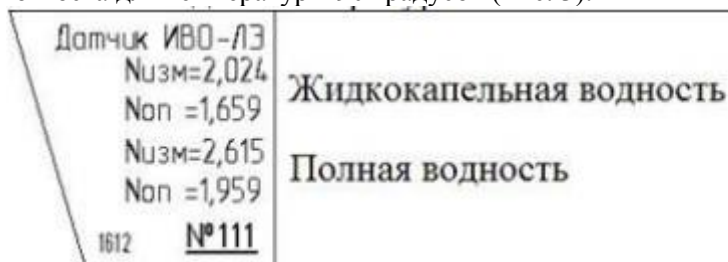


Рис. 3. Этикетка на датчике

1.2.2. Выносная стойка датчика

Выносная стойка датчика предназначена для крепления датчика ИВО и обеспечения его флюгирования в воздушном потоке. Внешний вид стойки ИВО показан на Рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид выносной стойки датчика ИВО

1.2.3. Электронный блок ИВО

Два электронных блока ИВО идентичны по схеме и взаимозаменяемы. Каждый блок имеет собственное питание и отдельные выходные сигналы. Внешний вид блоков показан на Рис. 5. На блоке установлен многофункциональный дисплей, индикаторы работы, органы управления и под защитной крышкой переключатели установки параметров установленного датчика. Блоки управления размещаются внутри салона самолета и крепятся к рабочему столу оператора винтами через две пары отверстий в передних панелях каждого блока.



Рис. 5. Внешний вид электронного блока ИВО

1.3. Технические характеристики

Технические характеристики ИВО-ЛЭ представлены в Табл. 1.1

Параметр [ед.изм.]	Значение
Диапазон измерения влажности при скорости потока 100 ± 20 м/с [г/м ³]	0,003... 3
Погрешность измерений, не более [%]	10
Отношение сопротивления рабочего и опорного чувствительных элементов при температуре 90°C	1,000... 2,999
Предельно допустимая температура чувствительных элементов, [°C]	100
Напряжение трехфазного сетевого питания [В]/[Гц]	115/400
Потребляемый ток в рабочем режиме, [А]	1
Максимальная высота полета [м]	Не менее 9000
Максимальное время работы [ч]	10
Диапазон скоростей полета [км/ч]	350... 700
Диапазон рабочих температур датчика [°C]	-55...+55
Диапазон рабочих температур электронного блока [°C]	0...+40
Выходной аналоговый сигнал [В]	0... 10
Частота обновления выходных данных, [мс]	1
Цифровой выходной интерфейс	RS232
Частота выдачи цифровой информации, [Гц]	85
Габаритные размеры, [мм]	
Датчик	100x110x20
Стойка	430x100x100
Вычислитель	300x213x129
Масса блоков [кг]	
Датчик	0,03
Стойка	2,6
Вычислитель	3,5

Табл. 1.1. Технические характеристики ИВО-ЛЭ

1.4. Устройство и работа

1.4.1. Принцип измерения влажности

Принцип измерения влажности с помощью ИВО заключается в непрерывном определении электрической мощности, затрачиваемой непосредственно на испарение частиц водного аэрозоля, осаждающихся из воздушного потока на горячий измерительный чувствительный элемент (ЧЭ) – коллектор частиц. Составляющая мощности, компенсирующая конвективную, или сухую теплоотдачу коллектора, автоматически исключается из показаний прибора с помощью специальной схемы, включающей в себя вспомогательный– опорный ЧЭ, аэродинамически защищенный от попадания облачной воды.

ИВО состоит из общего выносного датчика и двух блоков управления, осуществляющих измерительное преобразование и формирование выходных сигналов для измерений соответственно полной и жидкой влажности.

Устройство датчика ИВО, размещаемого в воздушном потоке, показано на Рис. 6. Датчик содержит ряд сплошных однослойных обмоток из эмалированного провода, размещенных на плоском основании и на цилиндрическом основании.

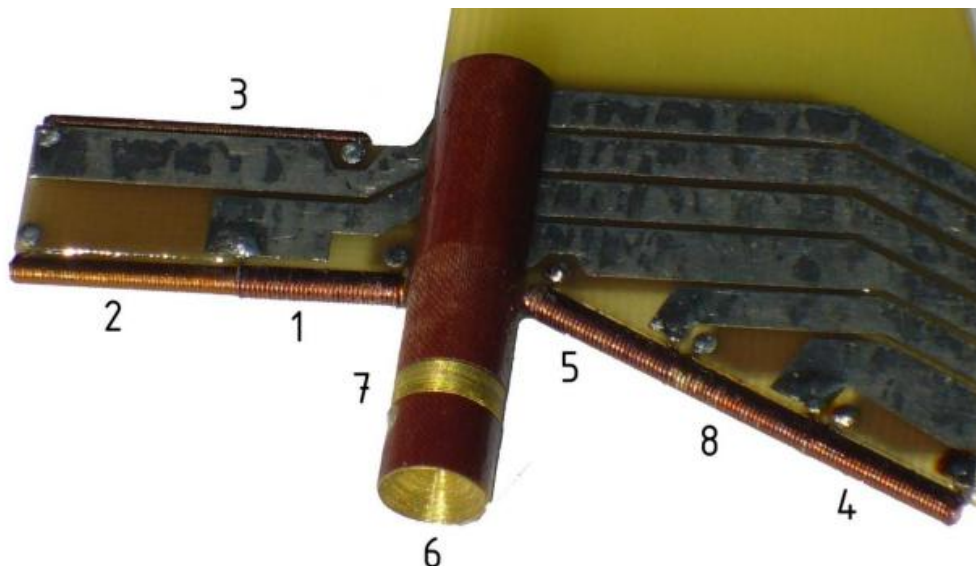


Рис. 6. Расположение чувствительных элементов на датчике

Чувствительный элемент полной водности 6 выполнен в виде спиральной обмотки, вклеенной в коническое углубление в переднем (по отношению к потоку) торце цилиндра. Такая форма коллектора обеспечивает возможность захвата всех попадающих на него частиц, включая ледяные, и их задержки на горячей поверхности вплоть до полного испарения. Опорный ЧЭ 7 намотан на боковой поверхности цилиндра, т. е. его поверхность параллельна траектории движущихся частиц.

Чувствительный элемент жидкой водности 2 представляет собой цилиндрическую обмотку на медном стержне и закреплен на переднем торце платы. Попадающие на него жидкие капли моментально растекаются в поверхностную пленку, испаряющуюся практически мгновенно и полностью. Напротив, ледяные частицы, если даже разбиваются после удара о коллектор, сохраняют фазовое состояние и объемную форму и сдуваются с обтекаемой поверхности ЧЭ без заметных затрат тепла на их частичное плавление и тем более испарение. Опорный ЧЭ 3 подобен по конструкции коллекторному ЧЭ, но в отличие от него имеет внешний диаметр меньше толщины основания и прикреплен к его заднему торцу, благодаря чему экранирован от попадания облачных частиц.

Все измерительные и опорные ЧЭ выполнены из никелевой проволоки, обладающей сопротивлением, существенно зависящим от ее температуры, что позволяет контролировать температуру подогрева ЧЭ протекающим электрическим током. С этой целью каждый из ЧЭ включен в плечо отдельного измерительного моста, разбаланс которого зависит от температуры ЧЭ. На переднем торце платы датчика имеются также четыре цилиндрические обмотки 1, 4, 5, 8, выполненные из манганиновой проволоки, сопротивление которой практически не зависит от температуры. Каждая из обмоток служит постоянным по сопротивлению плечом моста, последовательным по питанию с коллекторным либо опорным ЧЭ. Эти же обмотки, нагреваемые протекающим током одновременно с ЧЭ, защищают основание датчика от обледенения, способного нарушить термодинамический режим ЧЭ. Мосты рабочего и опорного ЧЭ уравниваются при одинаковой температуре обоих ЧЭ, составляющей 70 – 90 °С. В процессе измерений эта рабочая температура ЧЭ поддерживается постоянной путем управления токами питания измерительных мостов с помощью ПИ регулятора, входом которого является сигнал разбаланса моста.

1.4.2. Алгоритм вычисления водности

Работа измерителя водности облаков основана на измерении электрической мощности, требуемой для испарения воды и кристаллов льда с измерительных нагревательных элементов. Датчик расположен в потоке воздуха за бортом самолета. На датчике два измерительных канала, на один попадают только капли воды

(жидкокапельная водность), а на другой попадают капли воды и кристаллы льда (полная водность). На нагреватель того канала, куда попадают кристаллы льда необходимо приложить больше энергии, так как для испарения добавляется еще энергия для плавления льда. По разнице между сигналами каналов судят о составе облаков: вода или лед. Каждый измерительный канал, в свою очередь, содержит два чувствительных элемента: измерительный и опорный. Конструкция датчика разработана таким образом, что на измерительный элемент попадают капли или кристаллы, а на опорный – не попадают. Таким образом, опорный элемент охлаждается только обдуваемым воздухом, а измерительный и обдувается воздухом и испаряет жидкость. На один датчик работают два идентичных прибора, первый из них измеряет полную водность, а второй – только жидкую.

Электронная часть прибора поддерживает температуру чувствительных элементов и определяет требуемую для этого мощность. Для этого чувствительные элементы включены в измерительные мосты. Одно плечо моста - фиксированное и расположено внутри прибора (3b, 4a и 4b, 3c) Рис. 7, а второе составлено двумя проволочными спиралями, одна из манганина (3a, 3d), а вторая из никеля (1, 2) расположенными в воздушном потоке. Так как манганин не изменяет температуры от сопротивления, то обмотка из никеля является единственной, которая приводит к разбалансу моста при изменении тока через нее и, как следствие, нагрева. Установив требуемое соотношение фиксированных резисторов (3b, 4a и 4b, 3c), можно меняя ток через обмотки добиться нулевого выходного напряжения моста, что будет соответствовать определенной температуре никелевой спирали. Поддерживая нулевое выходное напряжение моста с помощью ПИ регулятора, можно зафиксировать температуру спирали вне зависимости от обдува и испарения капель.

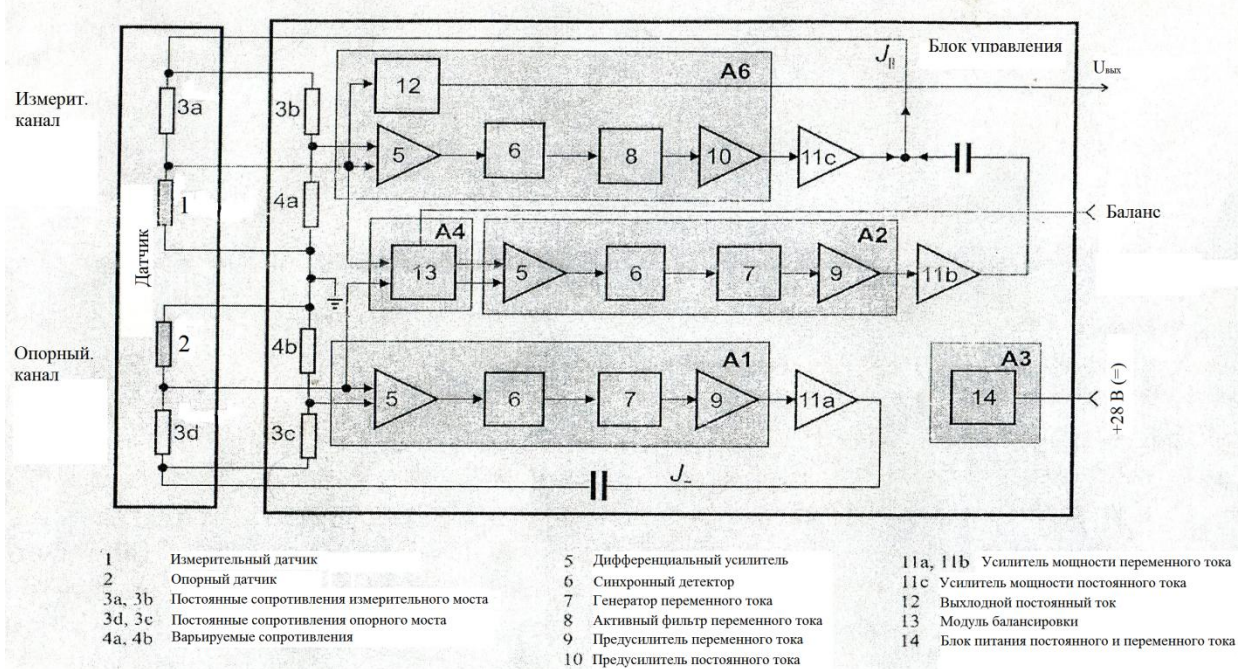


Рис. 7. Функциональная схема электронного блока

2. Постановка задачи

Итак, целью работы является разработка программного обеспечения (ПО) для перехода с аналоговых электронных схем на цифровые схемы получения и обработки сигналов с рабочих датчиков. Основные преимущества цифровой обработки сигнала:

- контроль за установленной температурой датчика, в результате которого повышается точность вычисления влажности за счёт учёта термо-поправки.
- уменьшение размера и массы данного прибора.

Однако данный тип модернизации включает в себе и минусы, а именно:

- за счёт считывания аналогового сигнала АЦП, появляется такой параметр как частота дискретизации, который отвечает за точность считывания и восстановления (обратная связь).
- за счёт считывания аналогового сигнала АЦП, появляется такой параметр как разрешение АЦП, который отвечает за “чувствительность” АЦП к минимальному изменению величины аналогового сигнала.

Данные минусы компенсируются высокочастотными и высокоразрядными АЦП. В нашем случае используется 10 – разрядный АЦП, с частотой дискретизации 10кГц.

Необходимость модернизации возникла вследствие обнаружения погрешности в вычислении влажности. В жидкокапельных облаках влажность $W_{жс}$ может быть вычислена следующим образом:

Запишем уравнение теплового баланса для нагревающегося элемента:

$$\begin{aligned} Q_{отдан.} &= Q_{получ.}; \\ \frac{U^2}{R} &= Cm\Delta T + Lm; \\ \Delta T &= T_{фикс} - T_{жс} \\ 1. \quad m &= \frac{U^2}{R_t(C\Delta T + L)}; \\ R_t &= R_{20} \cdot [1 + \alpha(t - 20^\circ C)] \end{aligned}$$

где:

R_t - сопротивление проводника при температуре t ,

R_{20} - сопротивление проводника при температуре $20^\circ C$,

α - температурный коэффициент сопротивления, t - температура.

$\frac{U^2}{R_t}$ - мощность, подаваемая на нагревательный элемент,

$T_{фикс}$ - температура проволоки,

$T_{жс}$ - температура жидкости (окруж. среды),

C - удельная теплоёмкость воды,

L - удельная теплота испарения при температуре $T_{фикс}$,

$$W_{жс} = \frac{U^2}{R_t(C\Delta T + L)US};$$

Используя уравнение (1), возможно вычислить влажность для жидкокапельных облаков по формуле:

$$W_{жс} = \frac{m}{V}$$

где V это счётный объём, который равен:

$$V = vtS;$$

где S - счётная площадь нагревающегося элемента, t - время за которое происходит измерение влажности, принято считать $t = 1$ сек, v - истинная воздушная скорость самолёта. Таким образом, влажность для жидкокапельных облаков равняется:

$$2. \quad W_{жс} = \frac{U^2}{R_t(C\Delta T + L)vS};$$

В аналоговом приборе считается, что удельная теплоёмкость воды C и удельная теплота испарения L это константы, так как подразумевается, что нагревательный элемент имеет фиксированную температуру. В реальности наблюдается флуктуация температуры во круг заданного значения температуры на нагревательном элементе, это связано с тем, что аналоговый блок управления не может обеспечить “жесткую” фиксации температуры. Осуществляя переход с аналогового сигнала на цифровой, появляется возможность контроля температуры и коррекции констант в зависимости от неё.