

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» в качестве электронных методических указаний

\

САМАРА
Издательство СГАУ
2014

УДК СГАУ: 6(075)

Составители: **Н. Н. Игонин**, *И. М. Макаровский, Д. Ю. Киселёв*

Рецензент д-р техн. наук, проф. В. С. Кузьмичев

Измерения функциональных параметров при испытаниях и эксплуатации авиационной техники [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания / *сост.: Н.Н. Игонин, И.М. Макаровский, Д.Ю. Киселев.* – Электрон. текстовые и граф. данные (1,44 Мб). – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Изложены основы технических измерений и порядок проведения лабораторных работ по определению точности измерений функциональных параметров при испытаниях и эксплуатации авиационной техники с использованием бортовых средств контроля ЛА.

Предназначены для студентов специальностей и направлений подготовки «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и «Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов».

Разработаны на кафедре эксплуатации авиационной техники.

УДК СГАУ: 6(075)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	6
1.1. Основные термины и определения	6
1.2. Погрешности измерений.....	10
1.3. Классы точности средств измерения	13
1.4. Оценка точности результатов измерений.....	14
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	16
2.1.Функциональные параметры, методы и средства их измерения	16
2.2. Порядок выполнения лабораторных работ	17
2.3. Типовая методика определения точности измерений	18
2.4. Оформление отчета по лабораторным работам	19
3 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	21
3.1 Измерение частоты вращения роторов ГТД	21
3.2. Измерение температуры выходящих газов ГТД.....	31
3.3. Измерение расхода топлива ГТД	41
3.4. Измерение количества топлива в баках ЛА	49
3.5. Измерение давления моторного масла ГТД.....	57
3.6. Измерение уровня вибрации ГТД.....	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	64

ВВЕДЕНИЕ

При испытаниях и эксплуатации авиационной техники (АТ) обычно возникает необходимость в проведении различного рода измерений и обработке экспериментальных данных. Такие задачи, в частности, решаются при проверке работоспособности и поиске неисправностей (дефектов) функциональных систем летательных аппаратов (ЛА) методами технического диагностирования. Вопросы, относящиеся к измерениям функциональных (выходных) параметров, наиболее специфичны при реализации метода технической эксплуатации по состоянию (ТЭС).

Как правило, прежде чем приступить к измерениям, в зависимости от необходимой точности результатов и имеющихся в наличии средств измерения, выбирают соответствующий *метод измерения*, представляющий собой совокупность принципов и приемов использования средств измерения. Затем, исходя из выбранного метода измерения, выбирают оптимальную для конкретных условий проведения эксперимента *методику измерений*, представляющую собой детально разработанный план размещения и применения средств измерения, порядок и число раз снятия показаний приборов, метод обработки экспериментальных данных, правила расшифровки результатов измерений и т.д.

Следует отметить, что только детально отработанная методика измерений позволяет в максимальной степени реализовать все возможности выбранного метода измерений.

Важнейшим показателем качества методики измерений является единство результатов измерений, представляющее собой такое положение в области технических измерений, при котором результаты измерений выражаются в узаконенных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Основной задачей обеспечения единства измерений является достижение сопоставимости результатов измерений одних и тех же физических величин, производимых в различных местах, в разное время и с помощью различных средств измерения.

Единство измерений достигается единством эталонов и мер, метрологических (точностных) характеристик средств измерения, методик измерений, форм представления результатов измерений и т.д.

В связи с этим в промышленности и в гражданской авиации (ГА)

действует ряд руководящих технических материалов (РТМ), руководящих документов (РД) и отраслевых стандартов (ОСТ), регламентирующих вопросы проведения технических измерений. Контроль за их соблюдением, а также проведение метрологических проверок средств измерения в масштабах предприятия (авиакомпания), возложен на метрологическую службу, представленную отделом главного метролога и лабораторией метрологического контроля.

Проверку метрологических характеристик средств измерения, входящих в состав ЛА проводят работники специализированных лабораторий авиационно-технических баз (АТБ) после их демонтажа из конструкции. Это объясняется тем, что проверка приборов непосредственно на борту ЛА обычно не обеспечивает необходимой точности из-за отсутствия соответствующего оборудования. Результаты проверки заносят в паспорт (формуляр) с указанием пригодности прибора к дальнейшей эксплуатации.

В процессе испытаний и эксплуатации АТ с учетом величины погрешностей измерения параметров принимают решение о работоспособности изделий, т.е. о возможности их использования по назначению. Снижение точности измерений, в силу низкого качества метрологической проверки прибора и нарушения методики проведения измерений, обычно приводит к снижению достоверности результатов контроля технического состояния и, как следствие, к отказу изделия в полёте.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Основные термины и определения

В общем случае всякое измерение представляет собой процесс нахождения численного значения физической величины опытным путем. Сущность измерений заключается в сравнении (сопоставлении) численного значения измеряемой физической величины с однородной физической величиной, принятой за единицу измерения.

Если обозначить измеряемую физическую величину через X , ее численное значение через Y , а единицу измерения через U , то выражение $X = U \cdot Y$ можно рассматривать как **основное уравнение технических измерений**.

В настоящее время допускаются к применению (за небольшим исключением) только единицы измерения международной системы (СИ). При этом различают основные и вспомогательные (производные) единицы измерения. К основным единицам относят: единицу длины – метр (м), массы – килограмм (кг), времени – секунда (с), силы электрического тока – Ампер (А), температуры – Кельвин (К), количества вещества – моль (моль) и силы света – Кандела (Кн).

К вспомогательным единицам относятся: единица частоты колебаний – Герц (Гц), силы – Ньютон (Н), давления – Паскаль (Па), энергии – Джоуль (Дж), мощности – Ватт (Вт) и электрического напряжения – Вольт (В).

В зависимости от способа получения информации, измерения производят методом непосредственной оценки или сравнения с мерой.

Метод непосредственной оценки представляет собой метод измерения, при котором искомое численное значение физической величины определяют непосредственно по отсчетному устройству средств измерения.

Отсчет представляет собой число, полученное по шкале (показанию) измерительного прибора, либо путем подсчета выходных сигналов. **Показание** представляет собой численное значение измеряемой физической величины, выраженное в принятых единицах, т.е. значение физической величины, соответствующее отсчету. При этом единица измерения передается через предварительно проградуированную по эталону шкалу прибора.

Метод сравнения с мерой представляет собой метод измерения, при котором искомое численное значение измеряемой физической величины определяется путем сравнения (сопоставления) с однородной физической величиной, воспроизводимой мерой.

В зависимости от способа получения измерительной информации различают прямой и косвенный методы измерения.

Прямой метод измерения представляет собой метод измерения, при котором искомое численное значение физической величины определяется непосредственно в ходе эксперимента.

Косвенный метод измерения представляет собой метод измерения, при котором измеряется не сама физическая величина, а функционально связанные с ней физические величины. Затем, на основе экспериментальных данных, по известной функциональной зависимости определяют (рассчитывают) искомое численное значение физической величины.

Наиболее распространенными в практике технических измерений являются метод непосредственной оценки и метод прямых измерений. Значительно реже применяются метод сравнения с мерой и косвенный. Измерения физических величин обычно производят при помощи различных средств измерения.

Средства измерения представляют собой технические устройства, которые имеют нормированные точностные характеристики. Это означает, что отсчитываемые по их отсчетному устройству численные значения физической величины соответствуют определенному количеству единиц (градусов, Паскалей, Вольт и других), принятых в качестве единицы измерения.

В зависимости от назначения средства измерения разделяются на меры (эталоны), измерительные преобразователи и измерительные приборы.

Мера (эталон) – средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Измерительный преобразователь – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но неподдающейся непосредственному восприятию. К измерительным преобразователям относятся первичные преобразователи (датчики) и промежуточные преобразователи (делители напряжения, усилители, ограничители и т.п.).

Измерительный прибор – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации о численном значении физической величины в форме, доступной для непосредственного восприятия (регистрации). Измерительные приборы по своему устройству представляют совокупность измерительных преобразователей и вспомогательных устройств (источники питания, отсчетные устройства и т.п.), которые не принимают непосредственного участия в измерительных преобразованиях (рис. 1.1).

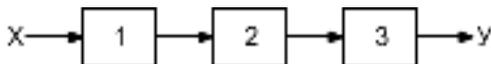


Рис. 1.1. Структурная схема измерительного прибора:

X – измеряемая физическая величина; Y – показания отсчётного устройства;
 1 – входной измерительный преобразователь (датчик); 2 – промежуточный измерительный преобразователь (селектор сигналов, усилитель, передаточно-множительный механизм и т.д.); 3 – отсчётное устройство (указатель, индикатор и т.п.)

Область применения средств измерения определяется их техническими характеристиками, основными из которых являются: род измеряемой физической величины, диапазон измерений, функция преобразования, чувствительность, разрешающая способность, точность, время измерений и стабильность.

Род измеряемой физической величины определяет назначение средств измерения: давление – манометр, температура – термометр, вибрация – измеритель вибрации, расход – расходомер, сила тока – амперметр, мощность – ваттметр и т.д.

Рабочий диапазон измерений (D) характеризуется областью численных значений физической величины, для которой нормированы допустимые погрешности:

$$D = X_{\max} - X_{\min} ,$$

где X_{\max} ; X_{\min} – соответственно максимальное и минимальное численное значение измеряемой физической величины (отметки шкалы прибора).

Функция преобразования представляет собой функциональную зависимость, связывающую численные значения измеряемой физической величины X и показания (выходные сигналы) Y средств измерения. Различают прямую, обратную, типовую и индивидуальную функции преобразования.

В *прямой функции* преобразования (рис. 1.2) аргументом служит численное значение измеряемой физической величины, а функцией – показания средств измерения (выходной сигнал).

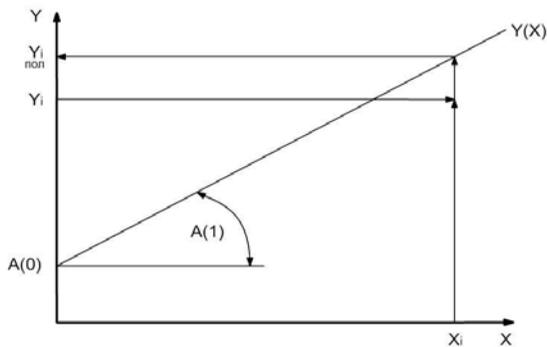


Рис. 1.2. Прямая функция преобразования датчика

В *обратной функции* преобразования аргументом служат показания средства измерения (выходной сигнал), а функцией – численное значение измеряемой физической величины.

Индивидуальная функция преобразования представляется в технической документации средства измерения индивидуальной функциональной зависимостью в графической или аналитической форме, а также в виде полинома первой, второй или третьей степени. Наиболее часто её представляют полиномом первой степени, т.е. линейной зависимостью вида:

$$Y(X) = A(0) + A(1) \cdot X, \text{ где } A(0) \text{ и } A(1) \text{ – коэффициенты полинома.}$$

Чувствительность средств измерения S характеризуется отношением изменения отсчета ΔY к вызвавшему его изменению измеряемой физической величины ΔX , т.е. $S = \Delta Y / \Delta X$.

Разрешающая способность средств измерения характеризуется минимальным изменением измеряемой физической величины ΔX_{\min} , которое приводит к изменению отсчета ΔY .

Точность измерений характеризуется близостью к нулю погрешностей, т.е. степенью соответствия результата измерений истинному значению измеряемой физической величины.

Время измерений (установление показаний успокоения) характеризуется скоростью получения измерительной информации и зависит от инерционности отдельных узлов прибора, способа обработки и

представления измерительной информации. Поэтому, при измерении переменных во времени физических величин, стремиться к тому, чтобы время измерений было значительно меньше времени переходного процесса средств измерения.

Стабильность измерений характеризуется неизменностью во времени метрологических (точностных) характеристик средств измерения.

1.2. Погрешности измерений

Результат измерения, независимо от того, какими техническими средствами оно проводилось и как тщательно выполнялось, всегда отличается от истинного значения измеряемой физической величины на некоторую величину, называемую погрешностью измерений.

Погрешности возникают в силу влияния на результаты измерений большого числа разнообразных объективных и субъективных факторов.

Погрешности классифицируют в зависимости от источника их возникновения, условий проведения измерений, характера проявления, временного поведения измеряемой физической величины, взаимосвязи со значениями измеряемой физической величины, способу выражения и другим признакам.

По источнику возникновения погрешности разделяют на:

погрешности метода измерения, возникающие из-за несовершенства приемов использования метода измерения;

инструментальные, возникающие из-за несовершенства средств измерения;

субъективные, обусловленные несовершенством органов чувств и подготовки оператора.

По условиям проведения измерений погрешности разделяют на:

основные – погрешности измерений, выполняемых в нормальных условиях ($T_n = 20 \pm 5 \text{ C}^\circ$, $P_n = 760 \pm 30 \text{ мм рт.ст.}$);

дополнительные – погрешности измерений, вызванные отклонениями условий проведения измерений от нормальных.

По характеру проявления погрешности разделяют на:

систематические, остающиеся неизменными при повторных измерениях одного и того же значения физической величины, одним и тем же методом при помощи одних и тех же средств измерения и яв-

ляющиеся следствием неправильной градуировки шкалы прибора или повреждений средств измерения;

случайные, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одного и того же значения физической величины и являющиеся следствием влияния факторов, влияние которых на результаты измерений различно и при каждом измерении и не может быть учтено заранее;

грубые погрешности (промахи) – погрешности, существенно превышающие ожидаемые значения при данных условиях проведения измерений. Промахи чаще всего являются результатом небрежной работы оператора. Результаты измерений, содержащие грубые погрешности, из экспериментальных данных обычно исключают (отбрасывают).

По временному поведению измеряемой физической величины погрешности разделяют на:

статические – погрешности измерений неизменных во времени физических величин;

динамические – погрешности измерений переменных во времени физических величин. Последние возникают только в тех случаях, когда время измерения (успокоения прибора) соизмеримо с периодом изменения физической величины, т.е. когда прибор не успевает отслеживать изменение измеряемой физической величины во времени.

По взаимосвязи со значениями измеряемой величины погрешности разделяют на **аддитивные** – имеющие одинаковые значения по всему диапазону изменения измеряемой физической величины; **мультипликативные** – имеющие значения, зависящие от значений измеряемой физической величины.

По способу выражения погрешности разделяют на:

1) **абсолютные** (ΔY) – равные разности между результатом измерения Y и истинным значением X измеряемой физической величины и выраженные в единицах физической величины. Они включают в себя систематическую ΔY_c и случайную ΔY_p , составляющие, т.е. $\Delta Y = \Delta Y_c + \Delta Y_p$.

Систематическую составляющую погрешности ΔY_c , определяют при помощи средств измерения более высокого класса точности и исключают из результатов измерений путем калибровки средств измерения или введения поправок.

Поправка C – величина, численно равная значению ΔY_c , взятая с обратным знаком, т.е. $C = -\Delta Y_c$.

Случайную составляющую ΔY_p определяют по результатам серии равноточных измерений физической величины. Мерой величины случайных погрешностей служит *среднеквадратичная погрешность* $\sigma(\Delta y)$, значение которой определяют по формуле

$$\sigma(\Delta y) = \sqrt{(\Delta y_i)^2 \frac{n}{n-1}}.$$

При проведении технических измерений истинное значение **физической** величины неизвестно, поэтому в качестве X обычно принимают среднее арифметическое Y_{cp} результатов нескольких равноточных измерений, т.е.

$$X = Y_{cp} = (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_i + \dots + Y_n) / n,$$

где n – число измерений, Y_i – результат i -го измерения.

С вероятностью P случайная погрешность измерения не превысит значения

$$\Delta Y_p = \pm U_p \cdot \sigma(\Delta Y),$$

где U_p – квантиль нормального распределения, соответствующий принятой доверительной вероятности P .

При проведении технических измерений обычно принимают

$$P = 0,95 (U_{0,95} = 2), \text{ т.е. } \Delta Y_p = 2\sigma(\Delta y);$$

2) относительные (δ) – погрешности, равные отношению абсолютной погрешности ΔY к истинному (среднему или текущему) значению измеряемой физической величины X , выраженному в процентах, т.е.

$$\delta = (\Delta Y / X) \cdot 100 \approx (\Delta Y / Y_{cp}) \cdot 100 \approx (\Delta Y / Y_i) \cdot 100\%;$$

3) приведенные (γ) – погрешности, равные отношению максимальной абсолютной погрешности ΔY_{max} к диапазону измерений физической величины D , выраженному в процентах, т.е.

$$\gamma = (\Delta Y_{max} / D) \cdot 100 \%.$$

Суммирование погрешностей проводят следующим образом.

При **прямых измерениях**, с использованием сложных измерительных приборов, состоящих из m компонентов с независимыми погреш-

ностями, суммарную среднеквадратичную погрешность $\sigma(\Delta Y)_{\Sigma}$ определяют из выражения:

$$\sigma(\Delta Y)_{\Sigma} = \sqrt{\sum \sigma^2(\Delta y)_i},$$

где $\sigma(\Delta Y)_i$ – среднеквадратичная погрешность i -го компонента средств измерения.

При **косвенных измерениях** суммарные погрешности определяют путём решения дифференциальных уравнений или с использованием готовых формул, приведенных в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Функция	Погрешности	
	абсолютная, ΔY_{Σ}	Относительная, δ_{Σ}
$a \cdot y$	$\pm a \cdot \Delta y$	$\pm \Delta y / y$
$y_1 \pm y_2$	$\pm (\Delta y_1 + \Delta y_2)$	$\pm \{(\Delta y_1 + \Delta y_2) / (y_1 \pm y_2)\}$
$y_1 \cdot y_2$	$\pm (y_1 \cdot \Delta y_2 + y_2 \cdot \Delta y_1)$	$\pm (\Delta y_1 / y_1 + \Delta y_2 / y_2)$
y_1 / y_2	$\pm (\Delta y_1 / y_1 + \Delta y_2 / y_2)$	$\pm (y_1 \cdot \Delta y_2 + y_2 \cdot \Delta y_1) / y_2^2 $
$a \cdot y + b$	$\pm a \cdot \Delta y$	$\pm (a \cdot \Delta y / \pm a \cdot y + b)$

1.3. Классы точности средств измерения

Класс точности средств измерения (приборов) определяется пределами допустимых абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

Абсолютные погрешности приборов ΔY_{Π} нормируются:

- одним значением $\Delta Y_{\Pi} = \pm a$, где a – постоянная величина, выраженная в единицах измеряемой физической величины;
- в виде суммы двух членов, из которых один (a) зависит, а другой (b) не зависит от значения X_i физической величины:

$$\Delta Y_{\Pi} = \pm (a \cdot Y_i + b);$$

- в виде таблицы пределов допустимых погрешностей для различных значений физической величины: $\Delta Y_{\Pi} = \pm a_i$.

Относительные погрешности приборов δ_{Π} нормируются:

- одним значением, выраженным в процентах, $\delta = a$ (%);
- в виде суммы двух членов, один из которых (a (%)) не зависит, а другой (b) зависит от значения X_i физической величины,

$$\delta_{\Pi} = \pm (a(\%) + b/Y_i \cdot 100\%).$$

Приведенные погрешности приборов γ_{Π} обычно нормируются одним значением, выраженным в процентах $\gamma_{\Pi} = \pm \text{КП} (\%)$.

Средства измерения (измерительные приборы) разделены Госстандартом на 9 классов точности (0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0), каждый из которых определяет величину допустимой основной приведенной погрешности.

В зависимости от класса точности средства измерения разделяют на эталонные, образцовые и рабочие.

Эталонные и образцовые средства измерения (класс точности до 0,5) обычно используются для проверки метрологических (точностных) характеристик приборов более низких классов точности (рабочих). При этом соотношение между классом точности образцовых $K_{\Pi 0}$ и рабочих $K_{\Pi P}$ средств измерения должно быть $K_{\Pi P}/K_{\Pi 0} \geq 5$.

Рабочие средства измерения, в отличие от эталонных и образцовых, не связаны с передачей единиц измерения и используются в производственных условиях (в полете, при техническом обслуживании (ТО) и ремонте (Р) для измерения параметров изделий.

1.4. Оценка точности результатов измерений

Точность измерений как правило оценивают по величине основной или дополнительной приведенной погрешности.

Основная приведенная погрешность определяется в целом величиной инструментальной погрешности, т.е. нормируемыми метрологическими характеристиками средств измерения.

Нормируемые метрологические характеристики средств измерения – это характеристики, оказывающие непосредственное влияние на точность измерений и подверженные воздействию эксплуатационных факторов (температуры, влажности, вибрации и т.д.). Их разделяют на общие, частные, типовые и индивидуальные.

Общие метрологические характеристики нормируются значениями погрешностей, одинаковыми для всех видов средств измерения данной физической величины, частные – для всех типов средств измерения данного вида, типовые – для всех средств измерения данного типа, а индивидуальные – значениями погрешностей, оговоренными в технической документации (паспорте) конкретного экземпляра измерительного прибора.

Нормируемые метрологические характеристики рабочих средств измерения подлежат периодической проверке на соответствие техни-

ческим требованиям в течение установленного срока эксплуатации (ресурса). Результаты проверок заносят в документацию средств измерения (паспорт) и используют для оценки точности измерений.

Таким образом, точность измерения параметра без учёта влияния внешних факторов можно оценить по величине основной приведенной погрешности $\gamma_{\text{осн}}$, которую можно определить по классу точности $K_{\text{пр}}$ средств измерения ($\gamma_{\text{п}}$), т.е. $\gamma_{\text{осн}} = \gamma_{\text{п}}$.

Дополнительная приведенная погрешность определяется в основном величиной случайных погрешностей и зависит от принятой методики измерения, тщательности подготовки и проведения эксперимента (измерений), квалификации оператора и т.д. Величину погрешностей можно определить путём проведения серии равноточных измерений в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации средств измерения.

На основе полученных данных определяют величину среднеквадратической погрешности $\sigma(\Delta Y)$, величину абсолютной дополнительной погрешности $\Delta Y_{\text{доп}} = |\Delta Y|_P$, где P – доверительная вероятность измерений, и приведенную дополнительную погрешность $\gamma_{\text{доп}} = \Delta Y_{\text{доп}} \cdot 100\% / D$, где D – диапазон измерений параметра.

По величине $\gamma_{\text{доп}}$ можно оценить точность измерений параметра с учётом влияния внешних факторов, а также судить о качестве принятой методики измерений ($\gamma_{\text{осн}} \approx \gamma_{\text{доп}}$).

Так, например, при измерении температуры воздуха в кабине экипажа термометром ТЭУ-48 с диапазоном измерений ($-50^{\circ}\dots+150^{\circ}\text{C}$) и классом точности $K_{\text{пр}} = 2,5$ основная приведенная погрешность измерений $\gamma_{\text{осн}} = \gamma_{\text{п}} = \pm 2,5\%$.

В тоже время, в реальных условиях при среднеквадратичной погрешности измерений $\sigma(\Delta Y) = \pm 5^{\circ}\text{C}$ дополнительная абсолютная погрешность составит $\Delta Y_{\text{доп}} = \pm U_p \cdot \sigma(\Delta Y) = 2 \cdot 5 = \pm 10^{\circ}\text{C}$, а приведенная дополнительная погрешность $\gamma_{\text{доп}} = 100\% \cdot \Delta Y_{\text{доп}} / D = 100\% \cdot 10 / 200 = \pm 5\%$.

Столь высокое значение дополнительной погрешности указывает на несовершенство принятой методики измерения температуры (неравномерность температурного поля в кабине, малое время проведения измерений и т.д.) или на её недостаточное освоение оператором.

Рассмотренный пример, в частности, указывает на то, что при проведении измерений функциональных параметров необходимо учитывать величину дополнительных погрешностей, которые имеют место в условиях проведения эксперимента.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1. Функциональные параметры, методы и средства их измерения

При испытаниях и эксплуатации АТ обычно проводят большое число измерений разнообразных функциональных параметров с использованием контрольно-измерительных приборов, входящих в состав бортовой системы контроля ВС. С целью классификации измеряемых параметров их целесообразно разделить на следующие группы (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Система	Измеряемые параметры
Двигатель (ГТД)	Давление (циклового воздуха, наддува лабиринтных уплотнений и т.д.); температура (выходящих газов, подшипников опор и т.д.); частота вращения роторов; уровень вибрации (опор роторов, корпусов и т.д.) и др.
Топливная	Давление топлива (за насосами, перед форсунками и т.д.); количество (уровень) топлива в баках; расход топлива.
Масляная	Давление масла (на входе в двигатель, в редукторах и т.д.); температура масла (на входе в двигатель, в редукторах и т.д.); количество (уровень) масла в баках.
Гидравлическая	Давление рабочей жидкости (за насосами, в тормозах и т.д.); давление газа (в гидроаккумуляторах, баках и т.д.); температура рабочей жидкости (в системе, за насосами и т.д.); количество (уровень) рабочей жидкости в баках и др.
Высотная	Температура воздуха (в системах, салонах и т.д.); давление воздуха (в системах, салонах и т.д.); расход воздуха в системах и др.

Анализ приведенных данных позволяет выделить ряд параметров, физический принцип (метод), средства измерения которых одинаковы для выделенных функциональных систем (табл.2.2).

Ниже представлен цикл лабораторных работ, посвящённых определению точности измерения указанных выше функциональных параметров с использованием штатных измерительных приборов ЛА.

Таблица 2.2

Измеряемый параметр	Метод измерения	Средства измерений
Вибрация	Сейсмоэлемент с магнитоиндукционным или пьезоэлектрическим измерительным преобразователем	Измерители вибрации типа ИВ-154, ИВ-50 и др.
Температура	Термопара с включением по прямой или компенсационной схеме; терморезистор с включением по мостовой или логометрической схеме	Термометры типа 2ИА-7А, ИТГ-180, ТУЭ-48 и др.
Частота вращения роторов	Магнитоиндукционный; частотно-импульсный.	Тахометры типа ИТЭ, ИТ, ДТА и др.
Количество (уровень) жидкости	Поплавковый с потенциометрическим или индуктивным измерительным преобразователем; ёмкостный	Топливомеры (масломеры) типа СУИТ АЦТ-6 и др.
Давление жидкостей и газов	Манометрическая коробка с индуктивным или потенциометрическим преобразователем.	Датчики ЭПД, ДАС. Манометры типа МГ, МВ, ДИМ и др.
Расход жидкостей и газов	Турбинный с аксиальной турбинкой; диафрагменный с расходомерной шайбой (трубкой Вентури)	Расходомер типа СИРТ, УРВК и др.

2.2. Порядок выполнения лабораторных работ

Представленные лабораторные работы выполняются по типовой методике в следующей последовательности:

1. Ознакомление с общими вопросами технических измерений.
2. Ознакомление с типовой методикой определения точности измерений функциональных параметров.
3. Изучение физической сущности методов измерения заданного параметра.
4. Изучение принципа работы и технических характеристик средств измерения заданного параметра.
5. Изучение методики определения точности измерений заданного параметра.
6. Проведение эксперимента по определению точности измерения заданного параметра.
7. Оформление отчета по лабораторной работе.

2.3. Типовая методика определения точности измерений

Эксперимент по определению точности измерений функциональных параметров проводят в условиях, приближенных к реальным условиям проведения измерений на ЛА. Для этого используют стенды, оснащенные устройствами воспроизведения измеряемой физической величины, образцовыми и рабочими средствами измерений. По результатам эксперимента определяют величину дополнительной приведенной погрешности измерений $\gamma_{\text{доп}}$.

Оценку точности измерений заданного параметра дают путём сопоставления $\gamma_{\text{доп}}$ с основной приведенной погрешностью $\gamma_{\text{осн}}$ ($\gamma_{\text{п}}$) рабочих средств измерения. При $\gamma_{\text{доп}} \approx \gamma_{\text{п}}$ дают положительную, а при $\gamma_{\text{доп}} \gg \gamma_{\text{п}}$ – отрицательную оценку принятой методике измерений параметра.

Результаты эксперимента и промежуточных расчётов заносят в протокол исследований (Форма 1).

Эксперимент выполняют в следующей последовательности:

1. В диапазоне измерений заданного параметра D выделить 8...10 контрольных точек и занести их значения в протокол (X_i^*).

2. Наблюдая за показаниями контрольного измерительного прибора, с помощью устройства воспроизведения измеряемой физической величины последовательно задать выбранные контрольные значения параметра и провести регистрацию в протоколе соответствующих показаний образцового (Π_i) и рабочего (Y_i) измерительных приборов.

3. Рассчитать и занести в протокол «истинные» значения измеряемой физической величины $X_i = K_{\text{п}} \cdot \Pi_i$, где $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности для заданного параметра, Π_i – показания образцового измерительного прибора.

4. Полученные данные (X_i , Y_i) обработать на ЭВМ по методу наименьших квадратов и занести в протокол значения:

- измеряемой физической величины $Y_{i \text{ пол}}$;

- абсолютной погрешности ΔY_i ;
- относительной погрешности δ_i ;
- суммарной квадратичной погрешности $\sum(\Delta Y)^2$;
- коэффициентов полинома функции преобразования $A(0)$ и $A(1)$.

5. По полученным данным рассчитать и занести в протокол значения:

- среднеквадратической погрешности

$$\sigma(\Delta Y) = \sqrt{\frac{\sum(\Delta Y)^2}{n-1}}.$$

- дополнительной абсолютной погрешности $\Delta Y_{\text{доп}} = 2 \cdot \sigma(\Delta Y)$;
- дополнительной приведенной погрешности

$$\gamma_{\text{доп}} = \Delta Y_{\text{доп}} \cdot 100\% / D,$$

где D – диапазон измерений заданного параметра.

6. Провести анализ результатов эксперимента, дать оценку точности измерений заданного параметра и оформить отчёт по лабораторной работе.

2.4 Оформление отчета по лабораторным работам

Отчет по лабораторной работе оформляется на типовом бланке.

В него включают:

1. Краткие сведения о методе и средствах измерения заданного параметра.
2. Краткие сведения о методике определения точности измерений заданного параметра.
3. Протокол испытаний.
4. Заключение о точности измерений заданного параметра.

Протокол испытаний

(указать тип измерительного прибора)

Показатели	Контрольные точки									
X_i^*										
Π_i										
X_i										
Y_i										
$Y_{i \text{ пол}}$										
ΔY_i										
δ_i										
$Y(X)$										
$\sum \Delta Y^2$										
$\sigma(\Delta Y)$										
$\Delta Y_{\text{доп}}$										
$\gamma_{\text{доп}}$										
$\gamma_{\text{п}}$										

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

3.1. Измерение частоты вращения роторов ГТД

Цель работы. Ознакомление с физическими основами методов измерения частоты вращения роторов, устройством и работой бортовой измерительной аппаратуры (тахометров); освоение методики определения точности измерений частоты вращения роторов ГТД с помощью тахометров типа ИТЭ.

Порядок выполнения лабораторной работы изложен в разделе 2.2.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методы и средства измерения частоты вращения роторов

Частота вращения роторов и, в частности, роторов авиационных ГТД, является одним из наиболее важных параметров, определяющих техническое состояние двигателя. Параметр частота вращения роторов (обороты) используют с целью:

- установления и контроля режимов работы;
- управления процессом запуска;
- регулирования и ограничения предельных параметров;
- контроля и диагностирования технического состояния и т.д.

Целесообразность использования параметра для установления и контроля режимов работы ГТД объясняется зависимостью тяги (мощности) двигателя от частоты вращения роторов.

Процесс запуска современных ГТД регламентируется как по времени, так и по частоте вращения роторов. Так, по частоте вращения роторов устанавливают момент подачи топлива к форсункам камеры сгорания, отключения стартера, закрытия клапанов перепуска воздуха из компрессора и т.д.

Ограничение предельных значений параметров ГТД на повышенных режимах обычно достигается ограничением частоты вращения роторов. Так, механическая прочность элементов проточной части компрессоров обычно обеспечивается за счёт ограничения физической, а их газодинамическая устойчивость – приведенной частоты вращения роторов.

Контроль технического состояния ГТД в процессе эксплуатации основан на измерении и анализе отклонений контролируемых параметров, в том числе и частоты вращения роторов.

Таким образом, частота вращения ротора является важным контролируемым параметром ГТД, поэтому он должен измеряться с достаточно высокой точностью.

Приборы и устройства, предназначенные для измерения частоты вращения ротора, называются тахометрами. Работа авиационных тахометров основана на преобразовании частоты вращения ротора непосредственно в отклонение стрелки указателя (магнитоиндукционные тахометры) или в электрические импульсы с последующим измерением частоты их следования при помощи электронного частотомера.

Магнитоиндукционный метод преобразования частоты вращения ротора в угловое отклонение стрелки указателя использован в тахометрах типа ТЭ и ИТЭ.

Принцип действия магнитоиндукционного тахометра (рис. 3.1) основан на измерении сил, возникающих в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с магнитными полями вихревых токов, наведенных переменным магнитным полем в чувствительном элементе.

Чувствительный элемент тахометра 2 выполнен в виде металлического немагнитного диска, помещенного в зазор между полюсами вращающегося постоянного магнита 1.

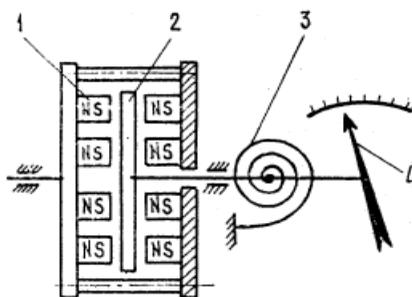


Рис. 3.1. Принцип действия магнитоиндукционного тахометра:
1 – постоянный магнит; 2 – чувствительный элемент; 3 – спиральная пружина;
4 – стрелка указателя

При вращении магнита в диске индуцируются вихревые токи, имеющие собственное магнитное поле. За счёт взаимодействия магнитных полей чувствительного элемента и постоянных магнитов возникает вращающий момент, толкающий диск по направлению вращения магнита. Вращению диска препятствует спиральная пружина 3.

Стрелка указателя 4, установленная на ось чувствительного элемента, поворачивается на угол φ , пропорциональный частоте f вращения магнита, т.е. имеет место зависимость $\varphi = b \cdot f$, где b – коэффициент пропорциональности.

В авиационных тахометрах обычно используется электрическая связь (рис. 3.2) между ротором и измерительной системой тахометра (система «электрический вал»). Датчиком тахометра при этом служит генератор 1 переменного трехфазного тока с ротором, выполненным в виде постоянного магнита. Напряжение от генератора по трехпроводной линии связи поступает на статорную обмотку (ОВ) синхронного электродвигателя, ротор которого, выполненный в виде постоянного магнита, вращается синхронно с ротором генератора. Синхронный электродвигатель 2, установленный в корпусе указателя, приводит во вращение измерительный узел тахометра 3.

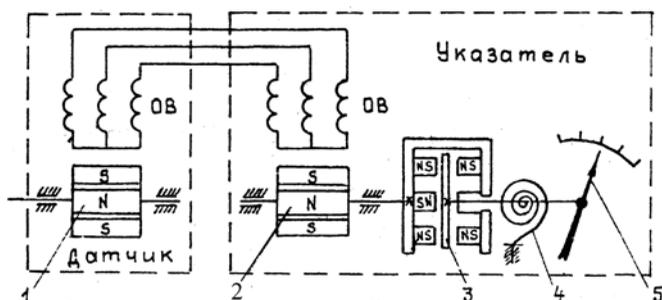


Рис. 3.2. Принципиальная схема магнитоиндукционного тахометра:

- 1 – датчик (генератор); 2 – синхронный электродвигатель;
- 3 – измерительный узел; 4 – пружина; 5 – стрелка указателя оборотов

Магнитоиндукционные тахометры обладают малой погрешностью ($\gamma_n \leq \pm 1\%$), которая возрастает с наработкой из-за износа узлов трения и по другим причинам.

При использовании частоты вращения роторов для управления и регулирования ГТД, требования к точности измерений существенно

повышаются, чем объясняется переход на частотно-импульсный метод измерения оборотов.

Принцип действия частотно-импульсного тахометра (рис. 3.3) заключается в генерации электрических импульсов с частотой, пропорциональной частоте вращения ротора. Датчик импульсного тахометра (рис. 3.3,а) представляет собой постоянный магнит 3, на котором размещена обмотка 4. Обмотка и магнит помещены в герметичный стальной корпус 2.

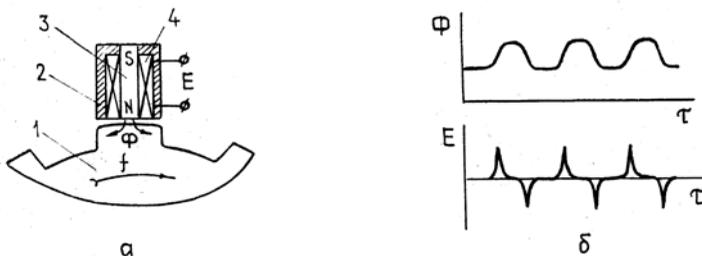


Рис. 3.3. Принцип действия (а) и электрические сигналы (б) от датчика тахометра:
 1 – индуктор; 2 – корпус; 3 – постоянный магнит; 4 – обмотка

Переменное магнитное поле в датчике тахометра возникает при вращении индуктора I , имеющего привод от ротора двигателя. В качестве индуктора обычно используют одну из шестерен коробки приводов двигателя.

При вращении индуктора за счет изменения сопротивления магнитной цепи происходит изменение величины магнитного потока Φ и в витках обмотки 4 индуцируется переменное напряжение с частотой, пропорциональной частоте вращения ротора. Частоту генерируемого напряжения измеряют электронным частотомером (указателем оборотов) и подают в систему регулирования двигателя.

Примером использования частотно-импульсного метода для измерения оборотов и регулирования ГТД может служить система управления двигателя Д-36 (рис. 3.4).

Три частотных датчика D_1 , D_2 , D_3 преобразуют частоты вращения трёх роторов двигателя в электрические сигналы, которые поступают на вход тахометрической аппаратуры, в систему управления и измеритель вибрации. Индикация частоты вращения роторов осуществляется трёхстрелочным указателем аналогового типа УО.

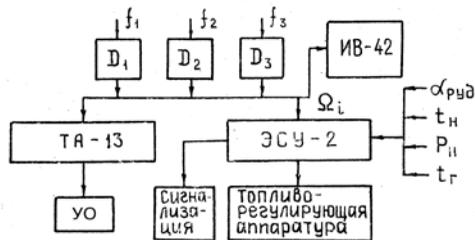


Рис. 3.4. Система управления двигателя Д-36:
 D_1, D_2, D_3 – частотные датчики (ДТА-10); электронная система управления (ЭСУ); трехстрелочный указатель оборотов (УО); измеритель вибрации (ИВ-42); электронный блок (ЭБ)

Метрологическое обеспечение измерений частоты вращения роторов

С целью обеспечения единства измерений частоты вращения роторов, Госстандартом разработаны руководящие документы, в которых указаны методы и средства проверки метрологических характеристик тахометров, а также нормативы на их допустимые погрешности.

Авиационные тахометры обычно проверяют при помощи устройства проверки тахометров (УПТ). При проведении проверок эталонную частоту вращения ротора УПТ контролируют образцовым тахометром типа ИТЭ или электронным частотомером.

Электронные блоки и указатели, входящие в состав частотно-импульсных тахометров, обычно проверяют с помощью образцовых генераторов электрических сигналов.

К нормируемым метрологическим характеристикам тахометров обычно относят диапазон измеряемых оборотов, типовую функцию преобразования и основную приведенную погрешность.

Для тахометров типа ИТЭ диапазон измерений частоты вращения роторов обычно составляет $0 \dots 41,666$ Гц ($0 \dots 2500$ об/мин или $0 \dots 100\%$ по шкале указателя). Они имеют линейную функцию преобразования и основную приведенную погрешность в рабочем диапазоне ($20 \dots 80\%$) не более $0,5\%$.

Типовая функция преобразования тахометров нормируется аналитической зависимостью

$$\Pi = 2,4 f,$$

где Π – показания тахометра, %; f – частота вращения датчика, Гц.

Метрологические характеристики авиационных тахометров проверяют перед установкой на ЛА, а также периодически в процессе эксплуатации. Результаты проверок фиксируют в технической документации (паспорте), так как они служат основанием для использования тахометра по назначению. Проверки проводят в лабораторных условиях после демонтажа аппаратуры из конструкции ЛА. При этом определяют основную приведенную погрешность указателей в рабочем и на всём диапазоне измерений.

Авиационный тахометр ИТЭ-1

Назначение, устройство и работа

Тахометр ИТЭ-1 предназначен для измерения частоты вращения (оборотов) роторов ГТД различных типов.

В состав тахометра ИТЭ-1 входят датчик (генератор переменного тока) и указатель оборотов. В корпусе указателя находятся синхронный двигатель и магнитоиндукционный измерительный узел.

Максимальная частота вращения датчика тахометра равна 2500 об/мин, что соответствует показаниям тахометра 100%. В силу этого на ГТД, имеющих высокие частоты вращения роторов, для привода датчика предусматривают редуктор с соответствующим передаточным отношением.

Датчик тахометра (рис. 3.5) представляет собой генератор трехфазного переменного тока с четырех полюсным постоянным магнитом 3, установленным на вал 7. Ротор генератора приводится во вращение через упругую рессору 6, которая демпфирует колебания частоты вращения и компенсирует возможные перекосы при монтаже датчика. Статор генератора 4 изготовлен из трансформаторной стали. В пазы статора уложены три обмотки, соединенные по схеме «звезда».

Указатель тахометра (рис. 3.6) состоит из синхронного электродвигателя и измерительной системы.

Ротор электродвигателя представляет собой четырех полюсный магнит 12, посаженный на втулку ротора 13, которая соединена с валом через пружину 14. Пружина позволяет магнитам проворачиваться относительно вала и быстро входить в синхронизм с вращающимся магнитным полем статора.

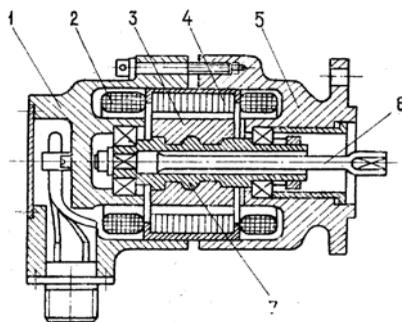


Рис. 3.5. Датчик тахометра ИТЭ – 1:

1 – крышка; 2 – обмотка статора; 3 – ротор-магнит; 4 – статор;
5 – корпус с фланцем крепления; 6 – упругая рессора; 7 – втулка.

На конце вала электродвигателя установлен магнитный узел с шестью парами магнитов 6. На магниты надето кольцо 8 представляющее собой термомагнитный шунт, магнитная проницаемость которого зависит от температуры.

Чувствительный элемент 7 измерительного узла (диск) выполнен из материала с малым температурным коэффициентом электрического сопротивления. На оси диска установлена пружина 15, стрелка 1 и диск демпфирующего устройства 16.

Демпфирующее устройство по конструкции аналогично измерительному магнитному узлу, но платы с магнитами 3 в нём закреплены неподвижно.

Шкала указателя 2 проградуирована в процентах (0...100%) с ценой деления 1%.

Основные технические данные тахометра

Диапазон измерений частоты вращения роторов, %	0...100
Основная приведенная погрешность измерений (γ_n):	
в рабочем диапазоне оборотов (20...80 %), %	не более 0,5
на всём диапазоне измерений, %	не более 1
Диапазон оборотов датчика, об/мин	0...2500

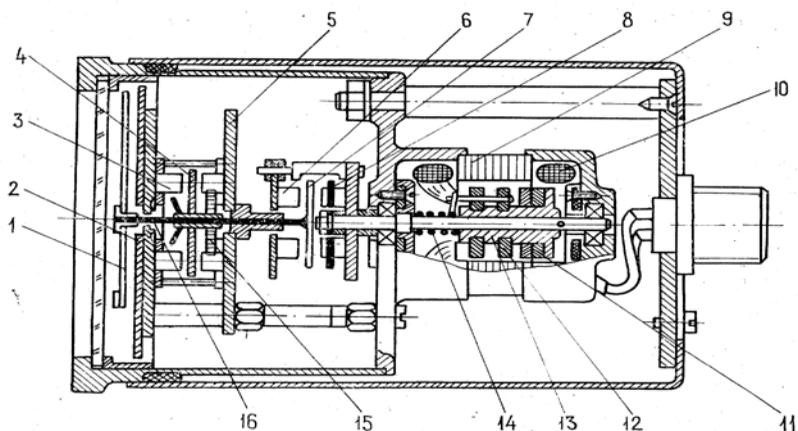


Рис. 3.6. Устройство указателя тахометра ИТЭ-1:

- 1 – стрелка; 2 – шкала; 4 – диск демпфера; 5 – магниты демпфера; 6 – магниты измерительной системы; 7 – измерительный диск; 8 – термомагнитный шунт; 9 – статор электродвигателя; 10 – статорная обмотка электродвигателя; 11 – гистерезисные диски; 12 – магниты; 13 – втулка; 14 – пружина; 15 – спиральная пружина; 16 – корпус указателя

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Ниже представлена методика определения точности измерений частоты вращения (оборотов) роторов ГТД с помощью тахометра ИТЭ-1. При этом определение точности измерений заключается в сравнении показаний рабочего и образцового тахометров.

Лабораторное оборудование

Эксперимент проводят на установке, обеспечивающей проведение измерений частоты вращения роторов с использованием тахометра ИТЭ-1 в условиях, приближенных к реальным условиям проведения измерений на ЛА.

В состав установки (рис. 3.7) входят: устройство воспроизведения частоты вращения ротора (УПТ), контрольный и рабочий тахометры, а также цифровой частотомер и электронный осциллограф, которые используют для измерения частоты вращения приводного вала и на-

блюдения формы электрических сигналов, вырабатываемых датчиком тахометра. Устройство воспроизведения частоты вращения ротора *1* содержит фрикционный вариатор с приводом от асинхронного электродвигателя. Вариатор позволяет плавно в диапазоне 0...2500 об/мин изменять частоту вращения датчика тахометра.

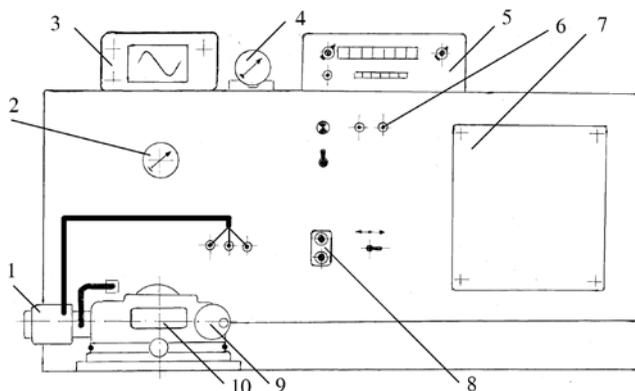


Рис. 3.7. Установка для определения точности измерений частоты вращения роторов:
1 – датчик воспроизведения частоты; *2* – контрольный указатель оборотов;
3 – электронный осциллограф; *4* – рабочий указатель частоты вращения;
5 – электронный частотомер; *6* – клеммы подключения к датчику электронного частотомера; *7* – схема установки; *8* – кнопки пуск и остановки управления электродвигателем; *9* – клеммы подключения датчика к измерительным устройствам установки; *10* – штурвал кнопки пуска и остановки двигателя к датчику измерения режима вариатора; *11* – механизм вариатор

Изменение частоты вращения датчика тахометра *6* осуществляется путём вращения штурвала *2*, который через червячный редуктор и винтовую пару перемещает фрикционный диск относительно ведущего диска, изменяя тем самым передаточное отношение вариатора.

Нажатием кнопок *3* «Пуск» и «Стоп» осуществляется управление электродвигателем вариатора.

Рабочий *4* и контрольный *5* указатели оборотов через клеммы *9* соединены с датчиком тахометра. К клеммам также подключены цифровой частотомер *7* и электронный осциллограф *8*.

Определение «истинных» значений частот вращения (оборотов) осуществляется частотомером по частоте напряжения, генерируемого датчиком тахометра.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент по определению точности измерений оборотов роторов ГТД проводят в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3, в следующей последовательности (см. рис. 3.7):

1. Выбрать в рабочем диапазоне оборотов датчика тахометра (0...2500 об/мин) 8...10 контрольных точек и занести их значения в протокол (X_i^*).

2. Подать питание на электродвигатель вариатора, нажав кнопку «Пуск».

3. Наблюдая за показаниями контрольного указателя оборотов, при помощи штурвала вариатора последовательно задать контрольные обороты датчика (X_i^*); произвести отсчёт и регистрацию в протоколе показаний рабочего указателя оборотов (Y_i) и цифрового частотомера (Π_i) в контрольных точках; уменьшить обороты датчика до минимально возможных (200...300 об/мин).

4. Выключить электродвигатель вариатора, нажав кнопку «Стоп».

5. Произвести расчет и регистрацию в протоколе «истинных» значений оборотов в контрольных точках $X_i = K_n / \Pi_i$, где K_n – коэффициент пропорциональности по оборотам; Π_i – показания цифрового частотомера, мс.

6. Произвести обработку полученных данных в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3.

7. Провести анализ результатов эксперимента, дать оценку точности измерений оборотов роторов ГТД и оформить отчёт по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для каких целей проводят измерения частоты вращения роторов ГТД?

2. Каков принцип работы магнитоиндукционного тахометра?

3. Почему необходимо согласовывать частоты вращения датчика тахометра и роторов ГТД?

4. Каковы назначение, устройство, работа и основные технические данные тахометров типа ИТЭ?

5. Как определяют точность измерений частоты вращения роторов ГТД?

3.2. Измерения температуры выходящих газов ГТД

Цель работы. Ознакомление с физическими основами методов измерения температуры, устройством и работой бортовых термометров; освоение методики определения точности измерений температуры выходящих газов с помощью аппаратуры 2 ИА – 7А.

Порядок выполнения лабораторной работы изложен в разделе 2.2.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методы и средства температурных измерений

Процесс измерения большинства физических величин (размеров, времени и т.д.) состоит в определении численного соотношения между измеряемой величиной и некоторым ее значением, условно принятым за единицу. Температура не обладает аддитивными свойствами, так как при различных ее значениях вещество может находиться в различных энергетических состояниях и иметь различные физические свойства. В силу этого процесс измерения температуры заключается в перемещении по температурной шкале с определением по ней значе- ний определяемой температуры.

Температурная шкала представляет собой непрерывную совокупность чисел, линейно связанных с числовыми значениями какого-либо физического свойства вещества, являющегося однозначной и монотонной функцией температуры. При построении температурной шкалы обычно выбирают две опорные точки, представляющие собой воспроизводимые значения температуры (точки кипения, затвердевания и т.д.). Этим значениям температуры присваивают точку начала t_1 и конца t_2 температурной шкалы. За единицу шкалы принимают целую часть этого интервала, называемую градусом.

Затем подбирают рабочее вещество, которое не меняет своего агрегатного состояния в пределах основного интервала температурной шкалы, а у него выбирают определённое свойство E , называемое термометрическим (объемное или линейное расширение, электрическое сопротивление и т.д.). Полагая, что это свойство линейно связано с температурой, выводят основное уравнение температурной шкалы

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{E_2 - E_1} (E_1 - E_t),$$

где E_1, E_2, E_3 – значения свойства E при температурах t_1, t_2 и t_3 .

Данное выражение позволяет по результатам измерения свойства E , определить значение измеряемой температуры.

В шкале Цельсия в качестве опорных точек t_1 и t_2 приняты температура замерзания (0°C) и температура кипения (100°C) океанской воды. Рабочими веществами в шкале Цельсия обычно служит жидкость (ртуть, спирт и т.д.).

В абсолютной термодинамической шкале Кельвина за начало отсчета T_1 принят абсолютный нуль (0 К), а в качестве второй опорной точки T_2 принята температура тройной точки океанской воды (273,15 К). Единицей абсолютной шкалы служит Кельвин (К), который как температурный интервал равен $^\circ\text{C}$. Рабочими веществами в шкале Кельвина обычно служат газы (азот, воздух и т.д.).

Температуры по этим шкалам Цельсия и Кельвина соотносятся как $T = t + 273,15 \text{ К}$.

Сложность воспроизведения абсолютной шкалы привела к созданию международной практической шкалы температур (МПТШ). Данная шкала базируется на шести опорных точках, соответствующих температурам фазовых переходов ряда чистых веществ. Обозначения температуры в МПТШ приняты как в шкалах Цельсия и Кельвина ($^\circ\text{C}$, К). В практике температурных измерений нашли применение жидкостные (стеклянные), манометрические (газовые и жидкостные), биметаллические, электрического сопротивления (электрические), термоэлектрические, радиационные и другие типы термометров. На ЛА в основном используются электрические и термоэлектрические термометры.

Действие электрических термометров основано на зависимости удельного сопротивления проводников электрического тока (металлов, полупроводников) от температуры.

В широком диапазоне температур удельное сопротивление металлов изменяется по линейному закону, поэтому можно считать, что увеличение сопротивления приемника $R_{\Delta t}$ при изменении температуры от t_1 до t_2 (Δt) составит:

$$R_{\Delta t} = K_R (t_1 - t_2) = K_{\Pi} \Delta t, \text{ Ом},$$

где K_R – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала приёмника.

Интервал измеряемых температур для приемников из металлов составляет $-100\dots+500^{\circ}\text{C}$ с погрешностью менее 5°C , которая зависит, в основном, от способа измерения сопротивления приёмника. Для этих целей используют компенсационные и мостовые схемы, а также логометры. Наиболее часто авиационные термометры сопротивления оснащаются логометрами, которые обеспечивают широкий диапазон измерений температуры ($-50\dots+200^{\circ}\text{C}$) с достаточно высокой точностью (погрешность менее $\pm 2^{\circ}\text{C}$).

Действие термоэлектрических термометров основано на эффекте Зеебека, который заключается в следующем. Если две проволоки из разнородных металлов соединить в кольцо, а одно из соединений («горячий» спай) нагреть до температуры, превышающей температуру другого соединения («холодного» спая), то в цепи потечёт ток.

Величина тока зависит от природы металлов и разности температур (ТЭДС) «горячего» и «холодного» спая. При постоянной температуре «холодного» спая (0°C) величина тока в цепи будет зависеть только от температуры (ТЭДС) «горячего» спая.

В достаточно широком диапазоне температур зависимость ТЭДС от температуры можно считать линейной. Тогда увеличение ТЭДС ($E_{\Delta t}$) при изменении температуры от t_1 до t_2 (Δt) составит:

$$E_{\Delta t} = K_n (t_1 - t_2) = K_n (\Delta t), \text{ В},$$

где K_n – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала электродов термопары.

В качестве материала для электродов обычно используют специальные сплавы (хромель, алюмель, капель и т.д.), обладающие большими значениями K_n , широким диапазоном измерений температуры, коррозионной стойкостью и т.д. Конструктивное оформление «горячих» спаев (термопар) зависит от условий их применения.

Различают термопары со стандартной и индивидуальной градуировкой. Первые, например, хромель-алюмелевые термопары (ТХА) имеют стандартную зависимость ТЭДС от температуры, которая нормируется типовой функцией преобразования (рис. 3.8), а вторые, например, медно-железные (ТМЖ) в силу низкой стабильности свойств материала электродов требуют индивидуальной градуировки.

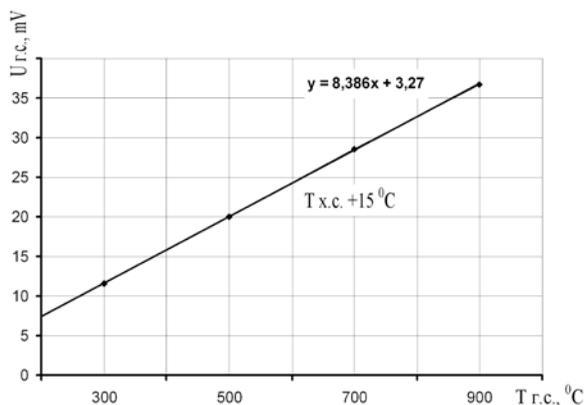


Рис. 3.8. Градуировочная характеристика термопары (ТХА)

Термоэлектрические термометры используют для измерения температуры в диапазоне $100\dots 1300^\circ\text{C}$. Они имеют погрешность менее 5°C , которая зависит, в основном, от способа измерения ТЭДС. Для этих целей используют пирометрические милливольтметры, электронные потенциометры, измерительные мосты и микроамперметры класса точности до 1,0.

Метрологическое обеспечение температурных измерений

С целью обеспечения единства температурных измерений Госстандартом разработаны руководящие документы, в которых указаны методы градуировки и поверки термометрических приборов, а также оговорены их допустимые погрешности.

Датчики термометров (термопары, терморезисторы и т.д.) проверяют с помощью средств воспроизведения температуры (термостатов, электропечей и т.д.). При этом допускается использование двух методов проверки: по постоянным точкам (плавления, кипения и т.д. чистых веществ) и по показаниям образцовых термометров (стеклянных, электрического сопротивления и т.п.).

Показывающие и самопишущие приборы, входящие в состав термометров (логометры, потенциометры и т.п.), проверяют с помощью образцовых электроизмерительных приборов.

К нормируемым метрологическим характеристикам авиационных термометров обычно относят: диапазон измеряемых температур и основную приведенную погрешность. Термометры подлежат проверке перед установкой на ЛА и периодически в процессе эксплуатации. Результаты проверок фиксируют в технической документации (паспорте

термометра), так как они служат основанием для использования прибора по назначению.

При этом проверки термопар обычно не проводят из-за отсутствия соответствующей поверочной аппаратуры и стабильности их метрологических характеристик. Проверки указателей температуры и электронных блоков приводят с помощью специализированных пультов (ППТ) путем подачи на них напряжений, имитирующих ТЭДС термопар. Проверки проводят в лабораторных условиях после демонтажа аппаратуры из конструкции ЛА. При этом определяют основную приведенную погрешность измерений (в рабочем и на всём диапазоне температур), а также работоспособность системы сигнализации.

Авиационные термометры относятся к группе электрических дистанционных приборов, позволяющих измерять температуру жидких и газообразных сред с передачей информации от места контроля в кабину экипажа. По принципу действия их разделяют на термометры электрического сопротивления и термоэлектрические. Другие типы термометров (биметаллические, манометрические, радиационные и т.п.) используются главным образом в качестве вспомогательных средств контроля. В качестве примера авиационного термометра рассмотрим аппаратуру 2ИА-7А, которой оснащаются многие типы ЛА и, в частности, самолет Ту-154.

Аппаратура 2ИА-7А

Назначение, устройство и работа

Аппаратура 2ИА-7А предназначена для непрерывного измерения температуры выходящих газов авиационных ГТД. В качестве источника ТЭДС в термопарах использованы хромель-алюмелевые сплавы (ТХА). Термопары (до 14 шт.) соединяют параллельно и подключают к переходной колодке с помощью компенсационного провода (ХА).

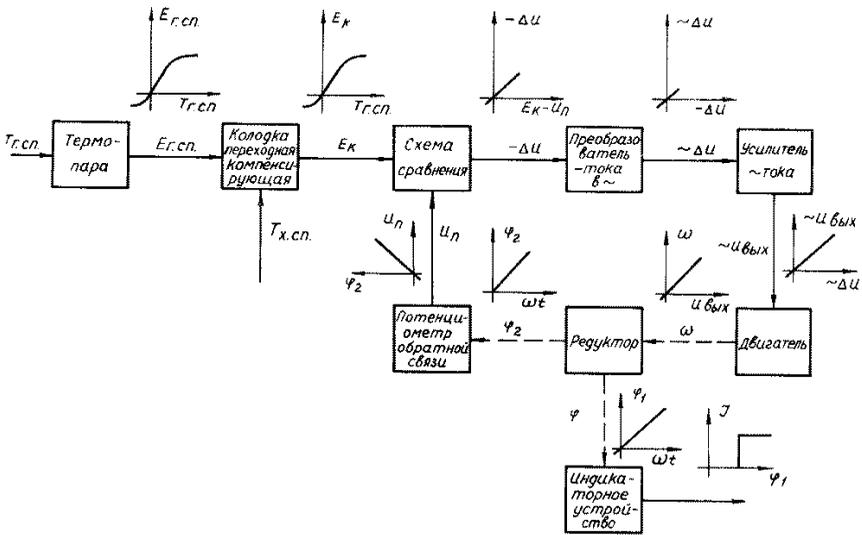
Аппаратура (рис. 3.9) содержит два независимых канала, которые используются для контроля температуры одновременно двух двигателей. В её состав входят два указателя температуры типа УТ-7А, двоярный усилитель 2УЭ-6В (электронный блок), две переходные колодки ПК-9Б и комплект (от 2 до 14) термопар типа Т-93 (Т-38, Т-82).

Работа термометра (см. рис. 3.9) основана на компенсационном методе измерения ТЭДС термопар. «Холодный» спай термопар 1 находится в переходной колодке 2, куда поступает и ТЭДС от «горячего» спаев (Е_{г.сп}).

На вход схемы сравнения 3 кроме ТЭДС (E_t), пропорциональной температуре газов, поступает напряжение обратной связи $U_{п}$, величина которого зависит от положения токосъемника потенциометра 4 обратной связи.

Разность напряжений $\pm_{\Delta} U = E_t - U_{п}$ поступает в преобразователь напряжения 5, где преобразуется в переменное напряжение с частотой 400 Гц. При этом фаза напряжения зависит от полярности $\pm_{\Delta} U$. После усиления в усилителе 6 выходное напряжение $U_{вых}$ поступает на реверсивный двигатель переменного тока 7, который, в зависимости от фазы напряжения, через редуктор 8 поворачивает токосъемник потенциометра обратной связи в сторону уменьшения $\pm_{\Delta} U$. В момент равенства E_t и $U_{п}$ ($\Delta U = 0$) двигатель останавливается. Одновременно прекращается и перемещение стрелок 9 по шкале указателя 10.

Таким образом, каждому значению температуры газов ($E_{г.сп}$) будет соответствовать определенное положение токосъемника потенциометра обратной связи и стрелок указателя температуры. При достижении заданного положения токосъемника нажимается концевой выключатель сигнализации опасной температуры.



Так как измерения температуры основаны на компенсационном методе, сопротивление внешней цепи (проводов и т.д.) практически не влияет на показания термометра.

Для уменьшения влияния температуры «холодного» спая на показания термометра в цепь компенсационного моста (рис. 3.10), находящегося в переходной колодке и питаемого от внешнего источника постоянного тока (4 В), включён терморезистор R_t , изготовленный из никелевой проволоки. Сопротивление терморезистора изменяется пропорционально изменению температуры окружающей среды и тем самым компенсирует изменение ТЭДС «холодного» спая при изменении температуры наружного воздуха.

Термопара (рис. 3.11) состоит из металлического корпуса с гайкой (фланцем) крепления. На рабочей части корпуса термопары выполнены два калиброванных отверстия, большее из которых направлено против, а меньшее – по потоку газов. Из-за разности давлений на входе и выходе из корпуса термопары «горячий» спай постоянно омывается потоком горячих газов, что способствует увеличению теплообмена и уменьшению погрешностей измерений.

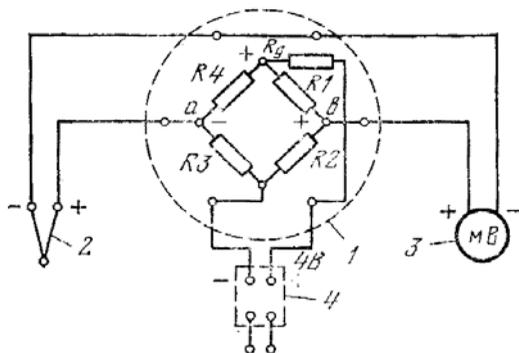


Рис. 3.10. Упрощенная схема температурной компенсации:
 1 – компенсационный мост; 2 – термопары; 3 – указатель температуры;
 4 – источник питания

Термопары устанавливают на корпус турбины, переходную колодку – в гондоле двигателя, электронный блок – в приборном отсеке, а указатель температуры и сигнальные лампы (табло) на приборной доске в кабине экипажа.

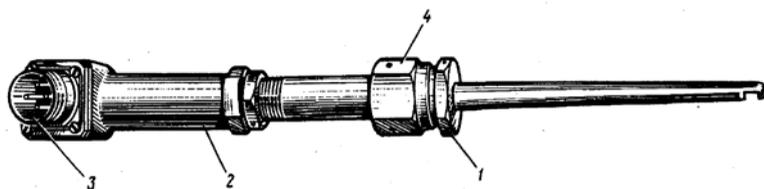


Рис. 3.11. Конструкция термопары Т-93:
1 – заглушка; 2 – корпус; 3 – штепсельный разъём; 4 – гайка крепления

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Определение точности измерений температуры

Ниже представлена методика определения точности измерений температуры выходящих газов ГТД с помощью аппаратуры 2ИА-7А. При этом определение точности измерений заключается в сравнении показаний рабочего и образцового термометров, питаемых от одного датчика (термопары).

Лабораторное оборудование

Эксперимент проводят на установке, обеспечивающей проведение измерений температуры газа (воздуха) с использованием аппаратуры 2 ИА-7А в условиях, приближенных к реальным условиям проведения измерений на ЛА.

Лабораторная установка (рис. 3.12) состоит из устройства воспроизведения температуры (термостата), рабочего и контрольного термометров, цифрового милливольтметра и вспомогательного оборудования.

В термостат 1 помещены рабочая и контрольная термопары (ТХА). Повышение температуры в термостате достигается за счет нагревательного элемента, питаемого от сети переменного тока (220 В) через выключатель 2. Сигнализация подачи питания на нагревательный элемент осуществляется лампой 3.

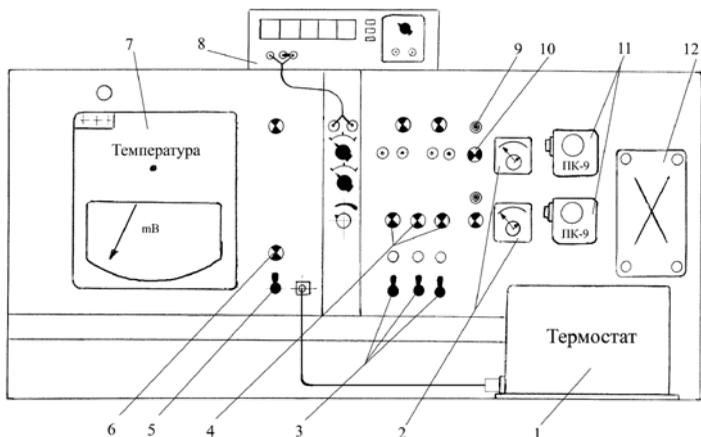


Рис. 3.12. Установка для определения точности измерения температуры газов
 1 – термостат; 2 – рабочий указатель температуры; 3 – выключатель питания нагревательного элемента; 4 – сигнальная лампа питания нагревательного элемента; 5 – выключатель включения дополнительного источника проверки сигнализации; 6 – сигнальная лампа включения дополнительного источника; 7 – указатель контроля температуры цифровой; 8 – цифровой милливольтметр; 9 – кнопка; 10 – сигнальная лампа повышенной температуры; 11 – переходные колодки; 12 – электронный блок термометра

В состав установки также входят электронный блок термометра 4, переходные колодки 5, рабочие указатели температуры 6, сигнальные лампы повышенной температуры 7 и кнопки 8 проверки работоспособности аппарата 2 ИА-7А.

Наблюдения за изменением температуры в термостате ведут по контрольному указателю температуры 9, а «истинные» значения температуры определяют по величине ТЭДС, развиваемой термопарой и измеряемой цифровым милливольтметром 10.

Питание установки (220, 115 и 27 В) осуществляется через выключатели 11, а сигнализация подачи питания – лампами 12.

Порядок проведения эксперимента.

Эксперимент по определению точности измерений температуры проводят в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3, в следующей последовательности (см. рис. 3.12).

1. Выбрать в диапазоне измерений температуры (0...700°C) 8...10 контрольных точек и занести их значения в протокол испытаний (X_i^*).

2. Подать электропитание на установку и нагревательный элемент термостата.

3. Наблюдая за изменением температуры в термостате по контрольному термометру, провести отсчет и регистрацию в протоколе испытаний показаний цифрового милливольтметра (Π_i) и рабочего указателя температуры (Y_i) в контрольных точках.

4. При достижении предельной температуры (700°C) отключить питание термостата и установки.

5. Провести расчёт «истинных» значений температуры в контрольных точках по формуле: $X_i = K_n \cdot \Pi_i$, °C, где K_n – коэффициент пропорциональности по температуре; Π_i – показания цифрового милливольтметра, mV.

6. Провести обработку полученных данных согласно типовой методике, изложенной в разделе 2.3.

7. Провести анализ результатов эксперимента, дать оценку точности измерений температуры газов и оформить отчёт по лабораторной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для каких целей проводят измерения температуры выходящих газов ГТД?

2. Каковы особенности температурных измерений?

3. Какие методы и средства используют для измерения температуры?

4. Каковы назначение, устройство, работа и основные технические данные аппаратуры 2ИА-7А?

5. Как определяют точность измерений температуры выходящих газов ГТД?

3.3. Измерения расхода топлива ГТД

Цель работы. Ознакомление с физическими основами методов измерения расхода рабочей жидкости, устройством и работой бортовой аппаратуры измерения расхода топлива; освоение методики определения точности измерений расхода топлива ГТД с помощью аппаратуры СИРТ.

Порядок выполнения лабораторной работы изложен в разделе 2.2.

Теоретическая часть

Методы и средства измерения расхода

На большинстве типов ЛА, находящихся в эксплуатации, производятся непрерывные измерения мгновенного (часового) и суммарного расхода топлива ГТД с использованием расходомеров различного назначения и устройства.

Расходомером в общем случае называют прибор для измерения расхода вещества, а устройство, непосредственно воспринимающее расход и преобразующее его в удобную для измерения величину – датчиком расхода.

Разнообразие, сложность и противоречивость требований, предъявляемых к расходомерам (высокая точность измерений, надежность, компактность и т.д.), привели к разработке большого числа разнообразных методов и средств измерения расхода жидкостей.

При равномерном установившемся движении потока жидкости в трубопроводе с площадью поперечного сечения S со средней скоростью $V_{\text{ср}}$ объемный расход Q составит $Q = V_{\text{ср}} S$, т.е. объёмный расход является функцией средней скорости потока. Это условие послужило толчком к появлению большого числа расходомеров, имеющих преобразователи расхода с рабочей характеристикой в виде $V = f(V_{\text{ср}})$, где V – выходной сигнал датчика.

В авиационных расходомерах наиболее широкое применение получил тахометрический метод, который основан на зависимости между объемным расходом и угловой скоростью (частотой) вращения аксиальной турбинки, помещенной в поток жидкости. При этом у не на-

груженной турбинки скорость (частота) вращения будет пропорциональна средней скорости потока, т.е. объёмному расходу жидкости.

Схема скоростей аксиальной турбинки представлена на рис. 3.13. На схеме C_1 , C_2 – абсолютная скорость жидкости на входе и выходе; W_1 , W_2 – относительная скорость жидкости; α_1, α_2 – углы между абсолютными и окружными скоростями на входе и выходе. φ_0 – угол установки лопастей турбинки.

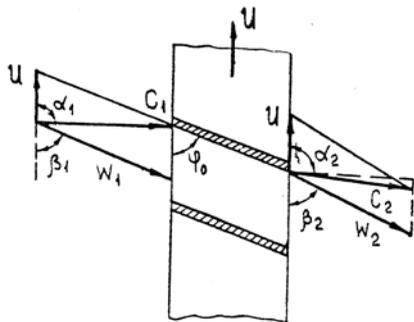


Рис. 3.13. Схема скоростей аксиальной турбинки

Ненагруженная турбинка практически не имеет сопротивления вращению, поэтому направления скоростей W_1 и W_2 совпадают и имеет место равенство углов $\beta_1 = \beta_2 = \varphi_0$. В этом случае зависимость между скоростью вращения турбинки U и расходом Q определяется только геометрическим соотношением

$$C_1 = U \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 = \omega \cdot R \cdot \operatorname{tg} \varphi_0,$$

где R – радиус турбинки.

В силу того, что $Q = C_1 \cdot S$, частота вращения турбинки составит $\omega = Q / (R \cdot S \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)$ или $\omega = K_T \cdot Q$, где K_T – постоянная турбинки.

Пропорциональность между расходом жидкости и скоростью вращения турбинки определяет линейность характеристики датчика расхода, т.е. точность измерений.

Турбинные датчики (рис. 3.14) применяют, в основном, для измерения расхода жидкостей (топлива, масла и т.д.), но их можно использовать и для измерения расхода газа.

Точность измерений расхода жидкостей при использовании турбинных датчиков составляет около 1% и зависит, в основном, от степени турбулентности потока в месте нахождения турбинки и точности измерений частоты её вращения. Турбинные датчики сохраняют работоспособность в широком диапазоне давлений и вязкостей жидкостей. Потери давления в датчике не превышают 10...30 КПа.

Для измерения скорости вращения турбинки используют бесконтактные электрические преобразователи (индукционные, индуктив-

ные, ёмкостные, и др.) В авиационных расходомерах чаще всего используют индукционные системы, которые представляют собой простейший генератор переменного тока (см. рис. 3.12).

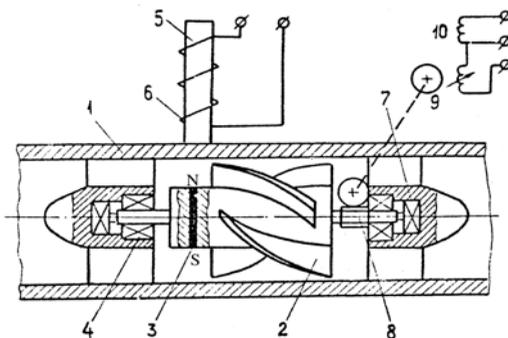


Рис. 3.14. Упрощенная схема турбинного датчика расхода:
 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – магнит; 4,7 – подшипник; 5,6 – датчик
 мгновенного расхода; 8 – червячный редуктор; 9 – сердечник;
 10 – датчик суммарного расхода

Авиационные расходомеры обычно используют и для измерения суммарного расхода топлива. Для этого они оснащаются устройством, которое позволяет подсчитать число оборотов турбинки, т.е. подсчитать количество (массу) прошедшего через датчик топлива (остаток топлива на борту ЛА). Для пересчёта объёмного расхода топлива в массовый расход датчики расхода обычно оснащают плотномером ёмкостного типа.

Метрологическое обеспечение измерений расхода

С целью обеспечения единства измерений расхода Госстандартом разработаны руководящие документы, в которых указаны методы градуировки и поверки расходомеров, а также их предельно допустимые погрешности.

Турбинные датчики расхода обычно проверяют с помощью средств воспроизведения объёмного расхода жидкости. Допускается проверка датчиков и с использованием образцовых расходомеров, датчики которых включают последовательно с проверяемым.

Электронные блоки и указатели расхода, входящие в состав расходомера, проверяют на специализированных стендах путем подачи

на вход аппаратуры сигналов, имитирующих сигналы турбинного датчика расхода.

Основными нормируемыми метрологическими характеристиками авиационных расходомеров являются: минимальный и максимальный измеряемый расход топлива, функция преобразования датчика расхода и основная приведенная погрешность измерений.

Метрологические проверки расходомеров (раздельно для датчиков и электронных блоков) проводят перед установкой на ЛА, а также периодически в процессе эксплуатации. Результаты проверок заносят в формуляр (паспорт) аппаратуры, так как они служат основанием для её использования по назначению. Проверки проводят в лабораторных условиях после демонтажа аппаратуры из конструкции ЛА. При этом определяют основную приведенную погрешность измерений в рабочем и на всём диапазоне расхода топлива.

Аппаратура СИРТ-1-2т

Назначение, устройство и работа

Аппаратура СИРТ-1-2т предназначена для дистанционного измерения мгновенного и суммарного расхода топлива ГТД.

В состав аппаратуры входят:

- датчик расхода топлива мгновенного и суммарного (ДРТМС);
- датчик плотности топлива (ДПЕ);
- электронные блоки (ПС, ПСР, ПНН, УСС, БОП, УСС);
- указатель мгновенного расхода топлива (УМРТ);
- указатель суммарного запаса топлива (УСЗТ).

Датчики расхода и плотности устанавливаются в магистралях питания ГТД топливом, электронные блоки в техническом отсеке, а указатели расхода (мгновенного и суммарного) – в кабине экипажа.

Работа аппаратуры СИРТ-1-2т (рис. 3.15) заключается в преобразовании количества протекающего через датчик топлива в показания указателей мгновенного и суммарного расхода.

Топливо, протекая через датчик *1*, приводит во вращение турбинку, угловая скорость (частота) вращения которой пропорциональна расходу, а число оборотов – количеству прошедшего через датчик топлива в объемных единицах. Таким образом, датчик генерирует два

электрических сигнала: с частотой, пропорциональной мгновенному расходу, и с частотой, пропорциональной количеству прошедшего топлива.

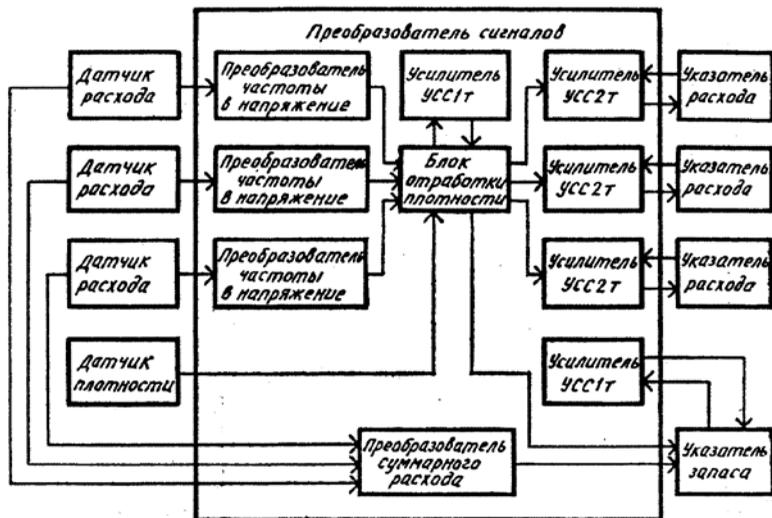


Рис. 3.15. Блок-схема аппаратуры СИРТ-1-2т:

1 – датчик мгновенного расхода; 2 – датчик суммарного расхода;
3 – указатель мгновенного расхода; 4 – указатель суммарного расхода
(остатка топлива); 5 – датчик плотности топлива; 6 – электронный блок

В электронном блоке 6 напряжение переменной частоты от датчика мгновенного расхода 1 преобразуется в постоянное напряжение, значение которого (с учетом поправки на плотность) пропорционально мгновенному расходу топлива. Полученное напряжение, после дополнительного усиления поступает в указатель мгновенного расхода топлива 3.

Электрические сигналы от датчика суммарного расхода 2 после преобразования поступают в указатель 4 суммарного расхода (запаса топлива).

Поправка на плотность топлива осуществляется с помощью специального устройства, состоящего из ёмкостного датчика плотности 5, блока обработки плотности и усилителя. Топливо из системы пита-

ния ГТД заполняет плоский конденсатор датчика, электрическая ёмкость которого будет пропорциональна плотности топлива. Конденсатор включён в цепь измерительного моста, который формирует напряжение поправки на плотность топлива.

Основные технические данные аппаратуры

Диапазон измерения мгновенного расхода, кг/ч	6000
Диапазон измерения суммарного расхода, кг	0...50000
Основная приведенная погрешность измерений мгновенного расхода (γ_n):	
в рабочем диапазоне (1000...5000кг\ч), %	0,5
на всём диапазоне, %	не более 2
Питание от сети	= 27 В, ~115В (400 Гц)

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методика определения точности измерений расхода топлива ГТД

Ниже представлена методика определения точности измерений расхода топлива ГТД при помощи аппаратуры СИРТ-1-2т. При этом определение точности измерений заключается в сравнении показаний рабочего и образцового расходомеров, подключённых к одному датчику расхода.

Лабораторное оборудование

Эксперимент проводят на установке (рис. 3.16), обеспечивающей проведение измерений расхода топлива ГТД с использованием аппаратуры СИРТ 1-2т в условиях, приближенных к реальным условиям проведения измерений на ЛА.

Топливо прокачивается через датчик расхода 5 (ДРТМС) с помощью насоса 3 с приводом от электродвигателя постоянного тока. Кон-

трольный расход топлива задают путем изменения частоты вращения насоса при помощи фрикционного редуктора 2. Частоту вращения насоса определяют по показаниям контрольного тахометра 1. «Истинный» расход топлива определяют по частоте напряжения, генерируемого датчиком расхода. Частоту напряжения, пропорциональную расходу топлива, измеряют цифровым частотомером 3.

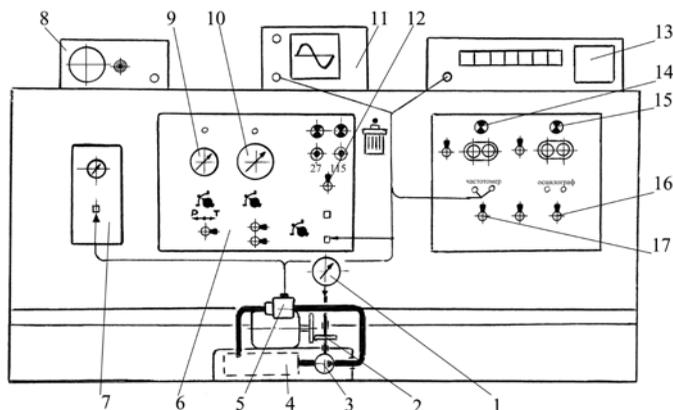


Рис. 3.16. Установка для определения точности измерений расхода топлива:
 1 – контрольный измеритель частоты вращения насоса; 2 – фрикционный вариатор;
 3 – насос центробежный; 4 – топливный бак установки;
 5 – датчик расхода; 6 – цифровой частотомер; 7 – пульт управления;
 8 – указатель суммарного расхода; 9 – указатель мгновенного расхода;
 10 – электронный осциллограф; 12, 16, 17 – сигнальная лампа; 13 – цифровой частотомер; 14, 5 – сигнальные лампы включения питания

В состав установки также входят электронный блок 7, указатели мгновенного 9 и суммарного 10 расхода топлива.

Питание на электродвигатель насоса (27 В) подаётся через выключатель 16, а на электронный блок (115 В, 400 Гц) – через выключатель 12. Сигнализация подачи питания осуществляется лампами 17 и 12.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент по определению точности измерений расхода топли-

ва ГТД проводят в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3, в следующей последовательности (см. рис. 3.16):

1. В диапазоне частот вращения насоса (300...1200 об/мин) выбрать 8...10 контрольных точек и занести их значения в протокол испытаний (X_i^*).

2. Подать питание на расходомер и электродвигатель насоса.

3. Наблюдая за показаниями контрольного тахометра, ручкой управления вариатора последовательно задать выбранные частоты вращения насоса (X_i^*); в каждой контрольной точке произвести отсчёт и регистрацию в протокол показаний указателя мгновенного расхода (Y_i) и цифрового частотомера ($Π_i$).

4. Уменьшить частоту вращения насоса до 200...300 об/мин; отключить питание электродвигателя и расходомера.

5. Рассчитать и занести в протокол «истинные» значения расхода топлива в контрольных точках по формуле: $X_i = K_n / Π_i$, кг/ч, где K_n – коэффициент пропорциональности по расходу; $Π_i$ – показания цифрового частотомера, тс.

6. Провести обработку полученных данных согласно методике, изложенной в разделе 2.3.

7. Провести анализ результатов эксперимента, дать оценку точности измерений расхода топлива ГТД и оформить отчёт по лабораторной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для каких целей проводят измерение расхода топлива ГТД?
2. В чем заключается физическая сущность тахометрического метода измерения расхода?
3. Каков принцип работы турбинного преобразователя (датчика) расхода?
4. Каковы назначение, устройство и работа аппаратуры СИРТ-1-2т?
5. Как определяют точность измерений расхода топлива?

3.4. Измерения количества топлива в баках ЛА

Цель работы. Ознакомление с физическими основами методов измерения количества (уровня) рабочей жидкости, устройством и работой бортовой аппаратуры, предназначенной для измерения количества топлива; освоение методики определения точности измерений количества топлива в баках ЛА с помощью аппаратуры СУИТ.

Порядок выполнения лабораторной работы изложен в разделе 2.2.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методы и средства измерения количества (уровня) жидкости

Необходимость определения количества (уровня) рабочих жидкостей (топлива, масла и других) в баках обусловлено тем, что по изменению их запасов (расходу) можно косвенно судить о техническом состоянии различных систем ЛА. Так, количество (расход) моторного масла свидетельствует о состоянии узлов трения и уплотнений двигателя, расход гидрожидкости – о герметичности агрегатов гидравлической системы, по расходу топлива – о состоянии проточной части и топливной автоматики ГТД и т.д.

Кроме того, топливо является самой большой переменной массой в полете, поэтому задача обеспечения необходимой центровки ЛА может быть успешно решена только путём управления порядком расхода и перекачки больших масс топлива на основе измерений его количества в баках.

Измерения количества рабочих жидкостей на борту ЛА обычно осуществляется при помощи топливомеров и масломеров различного принципа действия (поплавковых, ёмкостных и т.д.).

Наиболее широкое распространение в топливных системах ЛА получили ёмкостные топливомеры. Это объясняется простотой их конструкции, высокой надёжностью и точностью измерений в различных условиях применения. При этом высокая надёжность ёмкостных датчиков уровня, в частности, объясняется отсутствием в их конструкции подвижных элементов.

В настоящее время на ЛА для измерения и управления расходом топлива обычно используется единая топливно-измерительная система (ТИС), в функции которой входит:

- измерение количества топлива в баках;

- сигнализация предельно-допустимого количества топлива в баках;
- управление порядком заправки и выработки топлива из баков;
- выдача информации о количестве топлива в баках в навигационную и регистрирующую аппаратуру и другие.

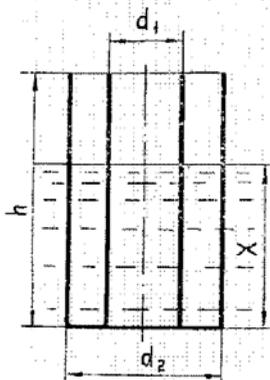


Рис. 3.17. Схема емкостного датчика уровня с цилиндрическими электродами

Ёмкостный датчик уровня (рис. 3.17) представляет собой цилиндрический или плоский конденсатор, помещённый в топливо (масло) для проведения измерений.

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d_2}{d_1}} [h + (\epsilon_m - 1)X].$$

$$\text{Или } C_x = C_0 + SX,$$

где C_0 – ёмкость сухого датчика; S – постоянная датчика; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; ϵ_r , ϵ_b – относительная диэлектрическая постоянная; X – высота уровня топлива.

При заполнении межэлектродного пространства конденсатора топливом его электрическая ёмкость увеличивается, так как диэлектрическая проницаемость топлива значительно больше чем у воздуха.

Электрическая ёмкость датчика, частично заполненного топливом C_x , складывается из ёмкости датчика, заполненной топливом, и ёмкости его воздушной части. Ёмкость цилиндрического датчика с длиной электродов h диаметрами d_1 и d_2 вычисляют по формуле:

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d_2}{d_1}} [h + (\epsilon_T - 1)X] = C_0 + S \cdot X,$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

ϵ_T – диэлектрическая проницаемость топлива;

C_0 – ёмкость «сухого» датчика;

S – постоянная датчика;

X – уровень топлива.

Постоянную датчика S определяют по формуле:

$$S = (C_{\max} - C_0) / h,$$

где C_{\max} – ёмкость заполненного топливом датчика.

В этом случае зависимость C_x от массы топлива m с плотностью ρ_T в баке площадью F_6 от уровня топлива X можно представить в виде:

$$C_x = C_0 + S \cdot F_6 \cdot \rho_T \cdot X.$$

Для обеспечения линейности зависимости $C_x(X)$ в топливных баках, имеющих переменную по высоте площадь сечения, датчики профилируют по длине (рис. 3.18) с учётом зависимости $F_6(X)$.

Таким образом, для каждого бака ЛА необходимо изготавливать датчик уровня с индивидуальными ёмкостными характеристиками. Точность изготовления датчика при этом должна быть достаточно высокой, так как она определяет линейность зависимости $C_x(X)$, т.е. точность измерений количества топлива в баках.

Увеличение чувствительности ёмкостных датчиков достигается путём параллельного соединения нескольких электродов (рис. 3.19) и уменьшения зазоров между ними.

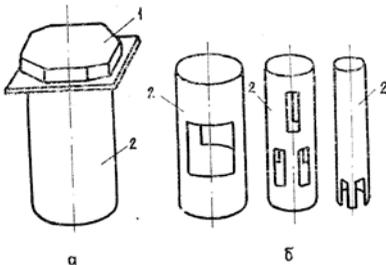


Рис. 3.18. Устройство (а) и профилирование электродов (б) ёмкостных датчиков уровня

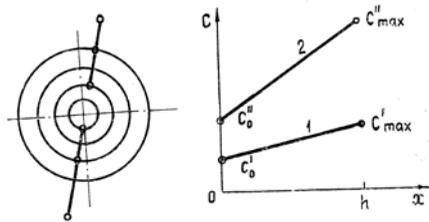


Рис. 3.19. Схема соединения электродов (а) и зависимость C_x от уровня топлива для двух (1) и многоэлектродного (2) датчика

Погрешности ёмкостных датчиков обусловлены, главным образом, влиянием температуры, которая влияет на геометрические размеры (длину) электродов. Основная приведенная погрешность ёмкостных датчиков обычно не превышает $\pm 1\%$, а топливомеров в целом $\pm 4\%$.

Метрологическое обеспечение измерений количества (уровня) жидкостей

С целью обеспечения единства измерений уровня (количества) жидкостей Госстандартом разработаны руководящие документы, в которых указаны методы и средства проверки метрологических характеристик уровнемеров различных принципов действия и нормативы на их допустимые погрешности.

Ёмкостные датчики авиационных топливомеров проверяют на специализированных лабораторных установках, имитирующих условия их работы на ЛА, а электронные блоки, входящие в состав топливомеров, проверяют путём подключения к ним конденсаторов постоянной ёмкости, равной ёмкости датчика при различных уровнях топлива в баке.

Основными нормируемыми (проверяемыми) характеристиками датчиков уровня являются: начальная ёмкость, функция преобразования и основная приведенная погрешность.

Измерения ёмкости датчиков при этом проводят с помощью высокоточных измерительных приборов (ёмкостного моста).

Комплексные проверки топливомеров проводят непосредственно на ЛА. Для этого количество (массу) заправленного в баки топлива сравнивают с показаниями топливомера. Затем вычисляют погрешности измерений и, при необходимости, регулировки аппаратуры.

Аппаратура СУИТ

Назначение, устройство и работа

Аппаратура СУИТ предназначена для измерения количества (массы) топлива в баках ЛА, а также для обеспечения работы автомата центровки.

В состав топливомера входит несколько ёмкостных датчиков (в зависимости от числа баков), электронный блок и указатель количества топлива.

Преобразование уровня топлива в электрический сигнал (рис. 3.20) осуществляется измерительным мостом 5, два плеча которого образуют активные сопротивления R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 и R_6 , а два других – конденсаторы C_x (датчик) и C_1 . Питание моста осуществляется переменным током с частотой 400 Гц от трансформатора Тр1.

В исходном состоянии мост находится в равновесном состоянии и разность потенциалов в измерительной диагонали АБ равна нулю. При изменении ёмкости датчика (C_x) вследствие изменения уровня топлива, равновесие моста нарушается и в измерительной диагонали появляется напряжение, которое усиливается электронным усилителем 1 и поступает на электродвигатель 2 указателя 4.

Электродвигатель через редуктор 3 перемещает щетку балансировочного потенциометра R_6 в сторону восстановления баланса моста. С осью потенциометра R_6 связана стрелка указателя, шкала которого проградуирована в килограммах топлива. Таким образом, каждому уровню (количеству) топлива будет соответствовать определённое положение стрелки указателя.

С осью потенциометра R_6 также связаны потенциометры R_8 и R_9 , которые вырабатывают сигналы, необходимые для работы автомата центровки и регистрации остатка топлива в баках бортовым самописцем (МСРП).

Переменные сопротивления R_1 и R_5 измерительного моста служат для установки стрелки указателя на нулевое и максимальное деление шкалы при пустом и заполненном топливном баке.

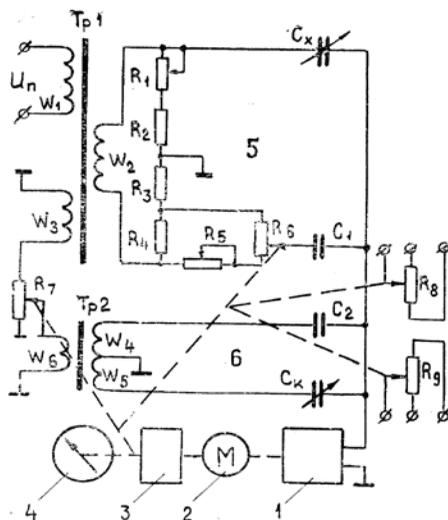


Рис. 3.20. Принципиальная схема топливомера типа СУИТ:

- 1 – электронный усилитель; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор;
- 4 – указатель; 5 – измерительный мост; 6 – компенсационный мост

Для проверки работоспособности топливомера на указатель вынесены кнопки встроенного контроля «Н» и «П». При их нажатии происходит отключение от измерительного моста ёмкостных датчиков и подключение постоянных конденсаторов, ёмкости которых равны ёмкости датчиков при пустом и полном баке. При этом стрелка указателя должна перемещаться в сторону нулевого и максимального показаний.

Топливомер имеет относительно небольшие основные (до 2%) и значительные дополнительные (до 4%) приведенные погрешности, которые обусловлены:

- изменениями сорта и температуры топлива;
- эволюциями ЛА в полёте;
- изменениями формы баков и другими факторами.

Для уменьшения влияния сорта топлива и температуры топливомер оснащен компенсационным устройством, вырабатывающим сигнал равный по величине, но противоположный по фазе сигналу ошибки измерения.

Компенсационное устройство б выполнено по мостовой схеме. Плечи моста образуют обмотки W_4 и W_5 трансформатора Тр2, ёмкость C_k компенсационного датчика и ёмкость C_2 .

Компенсационный датчик представляет собой цилиндрический или плоский конденсатор, помещенный в топливный бак, и постоянно заполнен топливом. При температуре 20⁰С и при определённом сорте топлива компенсационный мост уравновешен, т.е. в его измерительной диагонали напряжение равно нулю.

Если изменится сорт или температура топлива (диэлектрическая проницаемость), то на вход усилителя I подаётся сигнал противоположный по фазе, но равный по величине сигналу погрешности измерительного моста.

Так как величина погрешности зависит от количества (уровня) топлива, напряжение компенсации зависит и от уровня топлива в баке. Это достигается изменением напряжения питания трансформатора Тр2 с помощью потенциометра R_7 , щётка которого связана со стрелкой указателя.

Для уменьшения влияния эволюций ЛА, в баки устанавливают несколько (до восьми) включённых параллельно датчиков уровня.

Несмотря на принятые меры, дополнительные погрешности измерений при температуре $\pm 60^0$ С, высоте полёта до 20 км и влажности до 80% могут достигать 4% и более.

Основные технические данные аппаратуры

Диапазон измерения количества топлива, кг	0...6000
Основная приведенная погрешность (γ_n), %	1
Дополнительная приведенная погрешность ($\gamma_{доп}$), %	до 4
Питание	= 27В, ~ 115 В (400 Гц)

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Определение точности измерений количества топлива

Ниже рассматривается методика определения точности измерений количества топлива в баках ЛА аппаратурой СУИТ. При этом определение точности измерений заключается в сравнении показаний рабочего и образцового топливомеров, подключённых к одному датчику уровня.

Лабораторное оборудование

Эксперимент проводится на установке обеспечивающей измерения количества (уровня) топлива аппаратурой СУИТ в условиях, приближенных к реальным условиям проведения измерений.

В состав установки (рис. 3.21) входит устройство воспроизведения количества (уровня) топлива, ёмкостный датчик уровня, электронные блоки топливомера и вспомогательное оборудование, необходимое для питания аппаратуры и проведения эксперимента. В качестве датчика уровня использован ёмкостный датчик типа ДК-10 с линейной характеристикой.

Датчик уровня *1* помещен в мерную ёмкость *2*, закреплённую на передней панели установки. Гидравлическая схема установки, включающая бак, подкачивающий насос и кран *3* обеспечивает наполнение и слив топлива из мерной ёмкости.

«Истинное» количество топлива в баке определяют по электрической ёмкости датчика уровня *1*, которую измеряют при помощи ёмкостного измерительного моста *12*.

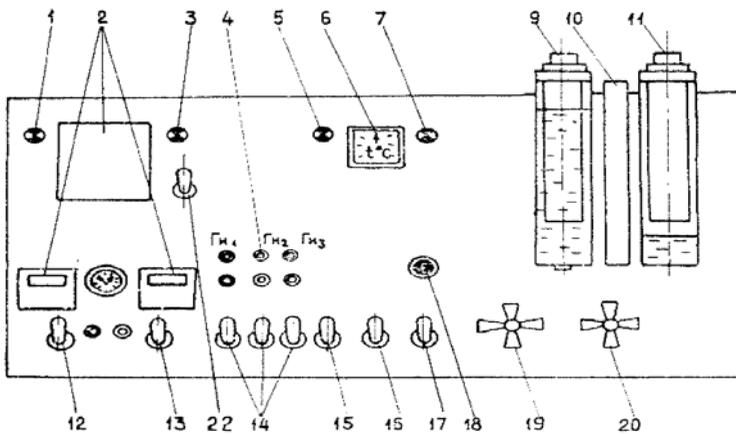


Рис. 3.21. Установка для определения точности измерения количества (уровня) топлива в баках: 1 – датчик уровня; 2 – мерная ёмкость; 3 – кран наполнения (слива); 4 – кнопка включения подкачивающего насоса; 6 – сигнальная лампа включения насоса; 7 – тумблёр питания подкачивающего насоса; 8 – тумблёр питания топливомера; 9 – указатель рабочего топливомера; 10 – тумблер переключения датчика, 11 – сигнальная лампа включения топливомера; 12 – измерительный ёмкостный мост

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент по определению точности измерений количества топлива проводят в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3, в следующей последовательности (см. рис. 3.21).

1. Выбрать 8...10 контрольных точек в диапазоне изменения уровня топлива в мерной ёмкости (0...350 мм) и занести их значения в протокол испытаний (X_i^*).

2. Подать питание на топливомер и подкачивающий насос.

3. Проверить работоспособность топливомера по отклонению стрелок указателя при нажатии кнопок «Н» и «Р».

4. Открыть кран наполнения, включить подкачивающий насос и заполнить топливом мерную ёмкость до максимального уровня, закрыть кран наполнения.

5. Провести регистрацию в протоколе испытаний показаний рабочего топливомера (V_i); подключить датчик к измерительному мосту и провести измерение его ёмкости ($П_i$).

6. Провести аналогичные измерения в остальных контрольных точках, понижая уровень топлива в мерной ёмкости путём открытия крана наполнения.

7. Отключить питание подкачивающего насоса и топливомера.

8. Рассчитать и занести в протокол испытаний «истинные» значения количества топлива в контрольных точках $X_i = K_n P_i$, кг, где K_n – коэффициент пропорциональности по уровню топлива; P_i – показания измерительного моста, пФ.

9. Провести обработку полученных данных в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3.

10. Провести анализ результатов эксперимента, дать оценку точности измерений количества топлива и оформить отчёт по лабораторной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие задачи решают путём измерения количества топлива на борту ЛА?

2. Каков принцип работы ёмкостного датчика уровня?

3. Какие факторы снижают точность измерений количества топлива и как уменьшают их влияние?

4. Каковы назначение, устройство, работа и основные технические данные аппаратуры СУИТ?

5. Как определяют точность измерений количества топлива в баках ЛА?

3.5. Измерения давления моторного масла ГТД

Цель работы. Ознакомление с физическими основами методов измерения давления рабочих жидкостей и газов на ЛА, устройством и работой авиационных манометров; освоение методики определения точности измерений давления моторного масла ГТД с помощью манометра ДИМ-8.

Порядок выполнения лабораторной работы изложен в разделе 2.2 .

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методы и средства измерения давления

Измерители давления (манометры) широко используются для измерения давления жидкостей и газов в функциональных системах ЛА. Так, по давлению воздуха за компрессором ГТД определяют состояние его проточной части, по давлению топлива перед форсунками контролируют работу топливо – регулирующей аппаратуры, по давлению масла на входе в двигатель – работу масляной системы, по давлению рабочей жидкости – определяют состояние гидронасосов и т.д.

Действие авиационных манометров (рис. 3.22) основано на использовании упругих силоизмерительных элементов (мембран, сильфонов и т.д.), конструктивные параметры которых определяют пределы и точность измерений давления. Перемещение (деформацию) жесткого центра силоизмерительного элемента под воздействием разности давления при этом измеряют различными способами: электромеханическим (потенциометрическим), индуктивным, ёмкостным и т.д.

Наиболее часто в системах ЛА используют потенциометрические и индуктивные манометры, в комплект которых входят первичный преобразователь (датчик) и указатель давления.

Чувствительным элементом потенциометрического датчика (рис. 3.23) обычно служит манометрическая коробка 1, деформация которой посредством передаточно-множительного механизма (ПММ) 2 передается на щетку реостата 3. Кроме функции передачи и увеличения амплитуды перемещения упругого элемента ПММ используют и для обеспечения линейности функции преобразования датчика. Потенциометрические датчики преобразуют изменение входного сигнала (давления) в изменение электрического сопротивления реостата. При перемещении щетки по реостату происходит поочередное замыкание одного или нескольких витков обмотки, что приводит к ступенчатому изменению сопротивления, а, следовательно, и к появлению погрешностей измерения давления.

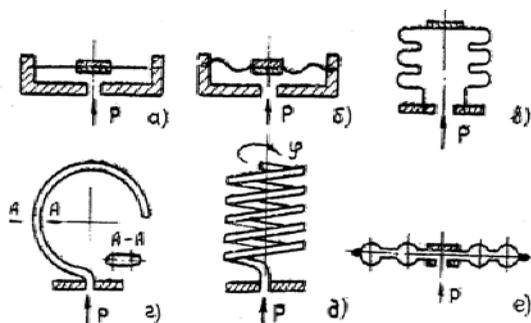


Рис. 3.22. Схемы упругих силоизмерительных элементов авиационных манометров: *a* – плоская мембрана с жестким центром; *б* – гофрированная мембрана с жестким центром; *в* – сильфон; *г* – трубка Бурдона; *д* – винтовая трубка; *е* – мембранная коробка

Для уменьшения таких погрешностей увеличивают количество витков, уменьшают диаметр проволоки и ширину щётки реостата. Как правило, число витков реостата не превышает 100...200, а диаметр проволоки – 0,03...0,1 мм.

Потенциометрические датчики, в силу инерционности подвижных элементов, используют для измерения статических и медленно изменяющихся давлений. С целью сглаживания пульсации давления во входной штуцер датчика устанавливают демпфер – цилиндрическое тело с калиброванным осевым каналом. В этом случае датчик ведет себя как аperiodическая система первого порядка, переходный процесс которой описывается экспоненциальным уравнением

$$y = y_0(1 - e^{-t/T_0}),$$

где y – текущее значение выходного сигнала; y_0 – величина установившегося выходного сигнала датчика, соответствующая скачкообразному увеличению давления; t – время измерения; T_0 – постоянная переходного процесса.

Для потенциометрических датчиков с демпфером величину T_0 обычно выбирают в пределах 0,05...1с. Физический смысл T_0 – это время, в течение которого при скачке давления выходной сигнал достигает 0,632 его значения.

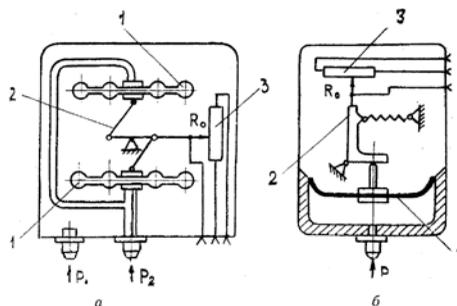


Рис. 3.23. Схемы потенциметрических датчиков давления:
а – преобразователь с мембранными коробками и кривошипно-шатунным ПММ;
б – преобразователь с мембраной и рычажным ПММ

Чувствительным элементом датчика индуктивного манометра (рис. 3.24) обычно служит манометрическая коробка *1*, деформация которой передаётся на подвижный элемент *3* (якорь магнитной цепи) через шток *2*. Обмотки магнитной цепи L_1 и L_2 (переменные индуктивные сопротивления) через диоды *4* включены в цепь измерительного моста, в котором сопротивления R_2 и R_4 служат для компенсации температурных погрешностей прибора.

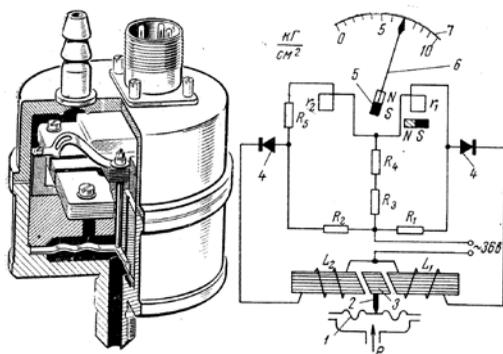


Рис. 3.24. Устройство датчика (*а*) и принципиальная схема (*б*) индуктивного манометра: *1* – манометрическая коробка; *2* – шток (толкатель); *3* – якорь магнитной цепи; *4* – диоды; *5* – постоянный магнит; *6* – стрелка; *7* – шкала указателя

Рамки указателя манометра (логометра) $г_1$ и $г_2$ включены в измерительную диагональ моста, который запитан от сети переменного тока (400 Гц).

Под воздействием избыточного давления P манометрическая коробка 1 прогибается. Перемещение центра коробки через шток 2 передаётся на якорь 3, который изменяет величину воздушных зазоров в магнитной цепи катушек L_1 и L_2 . При этом один зазор увеличивается, а другой уменьшается, что приводит к изменению индуктивностей катушек L_1 и L_2 и перераспределению токов в рамках логометра $г_1$ и $г_2$.

Подвижный элемент логометра 5 (постоянный магнит) устанавливается по результирующему вектору магнитного потока рамок, а стрелка указателя 6 – на соответствующее деление шкалы 7.

Индуктивные манометры применяют для измерения статического, медленно изменяющегося и пульсирующего давления с частотой пульсаций до 50 Гц.

Авиационные датчики давления и манометры имеют следующие характеристики.

Наименование (тип) датчика и манометра	Пределы измерения, МПа	Класс точности	Сопротивление, Ом
Датчик избыточного давления типа ДДиП	-0,01...0,0085	2,0	1600
Датчик перепада давления типа ЭДПД	-500...+2000 (в мм вод. ст.)	2,0	1000
Датчик давления (МДД)	1; 2,5; 15 и т.д.	2,5	1000
Датчик давления типа ДТ	1; 2,5 и т.д.	2,5	1500
Датчик давления типа МДД	10; 15 и т.д.	1,0	1500
Манометры типа ДИМ	1; 2,5; 8 и т.д.	4,0	-

Метрологическое обеспечение измерения давления

С целью обеспечения единства измерений давления Госстандартом разработаны руководящие документы, которые устанавливают методы и средства проверки метрологических характеристик манометров, а также нормативы на их допустимые погрешности.

Авиационные манометры проверяют с помощью устройств воспроизведения давления различной конструкции и назначения. Параметры таких устройств, в свою очередь, проверяют с помощью эталонных манометров.

Электронные блоки и указатели давления, входящие в состав манометров, проверяют с помощью специализированных пультов (ППМ) и образцовых электроизмерительных приборов.

К нормируемым метрологическим характеристикам авиационных манометров и датчиков давления относят: диапазон измерений давления, основная приведенная (абсолютная) погрешность и функция преобразования. При этом индуктивные манометры проверяют только в комплекте (датчик и указатель).

Функцию преобразования датчиков давления необходимо проверять в силу того, что они входят в состав контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратуры, например, МСРП, имеющей стандартные входные характеристики.

Нормируемые метрологические характеристики авиационных манометров и датчиков давления проверяют перед установкой на ЛА, а также периодически в процессе их эксплуатации. Проверки проводят в лабораторных условиях после демонтажа приборов из конструкции ЛА. Результаты проверок фиксируют в технической документации (паспорте), так как их результаты служат основанием для использования приборов по назначению.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методика определения точности измерений давления

Ниже представлена методика определения точности измерений давления моторного масла манометром ДИМ-8. При этом определение точности измерений заключается в сравнении показаний рабочего и образцового манометров, подключённых к одной масляной магистрали.

Лабораторное оборудование

Эксперимент проводят на установке, позволяющей проводить измерения давления масла в условиях, приближенных к реальным условиям проведения измерений на ЛА.

Установка (рис. 3.25) состоит из устройства воспроизведения давления 1, рабочего 2 и контрольного 3 указателей давления, рабочего 4 и образцового 5 датчиков давления.

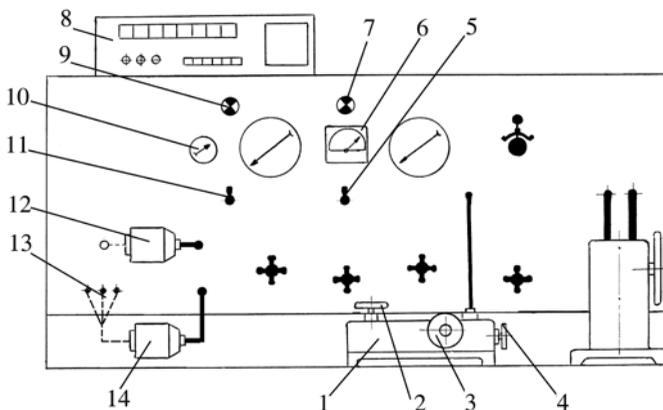


Рис. 3.25. Установка для определения точности измерений давления масла:
 1 – устройство воспроизведения давления; 4 – образцовый датчик давления; 5, 11 – выключатель питания; 6 – контрольный указатель давления;
 7, 9 – сигнальная лампа подачи питания; 8 – цифровой вольтметр;
 10 – рабочий указатель давления; 12 – рабочий датчик давления

Определение «истинного» давления масла проводят с помощью образцового датчика давления и цифрового вольтметра 6.

Электропитание на установку (27 и 115 В) поступает через выключатели 7 и 8, сигнализация подачи питания осуществляется лампами 9 и 10.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент по определению точности измерений давления проводят в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3, в следующей последовательности (см. рис. 3.25).

1. Выбрать в диапазоне показаний контрольного указателя давления (0...100 дел.) 8...10 контрольных точек и занести их значения в протокол испытаний (X_i^*).

2. Подать электропитание на установку.

3. Открыть кран бачка источника давления; вращая штурвал ручного насоса против часовой стрелки, произвести заполнение насоса маслом; закрыть кран бачка.

4. Открыть краны подачи давления к рабочему и контрольному датчикам; вращая штурвал насоса по часовой стрелке, по показаниям контрольного манометра последовательно задать выбранные значения давления; в каждой контрольной точке (X_i^*) после закрытия кранов подачи давления провести отсчёт и регистрацию в протоколе показаний цифрового вольтметра (Π_i) и рабочего указателя давления (Y_i).

5. Открыв кран на бачке источника давления, сравить давление в системе до нуля; закрыть краны подачи давления к рабочему и контрольному датчикам давления.

6. Отключить электропитание установки.

7. Рассчитать «истинные» значения давления в контрольных точках по формуле: $X_i = K_{\Pi} \cdot \Pi_i$, кг/см², где K_{Π} – коэффициент пропорциональности по давлению; Π_i – показания цифрового вольтметра, В.

8. Провести обработку полученных данных в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3.

9. Провести анализ результатов эксперимента, дать оценку точности измерений давления масла и оформить отчёт по лабораторной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы назначение и принцип работы авиационных манометров?

2. Чем объясняются погрешности измерений при помощи потенциометрического датчика давления?

3. Каковы устройство, работа и основные технические данные манометров типа ДИМ?

4. Как определяют точность измерений давления?

3.6. Измерения уровня вибрации ГТД

Цель работы. Ознакомление с физическими основами измерения вибрации, устройством и работой бортовой аппаратуры для измерения уровня вибрации; освоение методики определения точности измерений уровня вибрации ГТД с помощью аппаратуры ИВ-154.

Порядок выполнения лабораторной работы изложен в разделе 2.2.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методы и средства измерения вибрации

Вибрация или механические колебания являются реакцией механической системы на действие внешних или внутренних возмущающих сил, которые имеют механическое или другое происхождение. Вибрация оказывает вредное влияние на организм человека, работу узлов трения, радиоаппаратуры и другие системы ЛА. В силу этого уровень вибрации изделий АТ обычно регламентируется (нормируется).

Повышение уровня вибрации изделий в процессе эксплуатации связывают с возникновением и развитием неисправностей, что позволяет путем измерения уровня и анализа спектра вибрации судить об изменении их технического состояния и моментах появления неисправностей.

Контроль изделий по вибрационным параметрам представляет собой одно из важнейших направлений в общей системе технического диагностирования АТ. Так, средствами бортового контроля вибрации сегодня удаётся своевременно обнаруживать до 35% всех неисправностей ГТД.

Вместе с тем выявился и ряд трудностей, связанных с проведением виброконтроля. К ним, в частности, относятся: сложность выбора диагностических признаков неисправностей, низкая надежность виброаппаратуры (датчиков) и т.д.

Основным источником вибрации ГТД служат вращающийся ротор, неуравновешенность которого приводит к возникновению сил и моментов, вызывающих вибрацию как самого ротора, так и двигателя в целом. Вибрация двигателя с частотой вращения ротора называют «основная роторная гармоника».

Современные ГТД обычно имеют несколько роторов, механически не связанных друг с другом и имеющих различные частоты вращения. Это приводит к появлению в спектре вибрации двигателя нескольких роторных гармоник и ряда комбинационных частот. Кроме того, в спектре вибрации ГТД присутствуют колебания, вызванные не стационарностью газодинамических процессов, работой коробок приводов, агрегатов, подшипников опор и других узлов, которые существенно затрудняют задачу выделения полезной информации.

Спектр колебаний ГТД имеет линейчатый характер с концентрацией энергии колебаний по дискретным (роторным) частотам. В силу

этого, контроль вибрации проводят по изменению энергии (амплитуды) колебаний на частотах, близких к роторным гармоникам. Для этого из спектра вибрации выделяют диапазон частот (300...300 Гц), наиболее полно характеризующий изменения технического состояния двигателя.

Оценку технического состояния ГТД проводят по величине вибро смещения (S), виброскорости (V) или виброускорения (I), которые связаны между собой соотношениями:

$$V = \omega S; I = \omega^2 S,$$

где $\omega = 0,105 n$, где ω – круговая частота вращения ротора, n – число оборотов ротора в минуту.

В некоторых случаях вместо параметра «виброускорение» используют параметр «виброперегрузка» $K = I / g$, где g – ускорение свободного падения, который проще измерить существующими датчиками вибрации

Средства измерения вибрации

В практике виброизмерений используют большой арсенал измерителей вибрации (ИВ), различающихся назначением, областью применения, техническими характеристиками и т.д.

В состав ИВ (рис. 3.26) обычно входят: датчик вибрации (ВП), усилительно-преобразовательное устройство (УПУ), показывающий прибор (ПП), лампы сигнализации повышенной (ЛСП) и опасной (ЛСО) вибрации, а также кнопка проверки работоспособности аппаратуры (КП).

Датчик вибрации (ВП) работает по принципу сейсмического элемента (рис. 3.27). Он включает в себя массу m , упругий элемент (пружину) с жёсткостью C и демпфер D с коэффициентом пропорциональности K между скоростью движения массы и силой вязкого трения.

Дифференциальное уравнение второго порядка движения сейсмомассы m под воздействием возбуждающей силы F , изменяющейся по закону $F = A \sin \omega t$, где A амплитуда вибрации; ω – круговая частота колебаний, имеет вид:

$$X'' + 2d \cdot \omega_0 \cdot X' + \omega_0^2 \cdot X = A \cdot \sin \omega t,$$

где $\omega_0 = \sqrt{C/m}$, $d = K/2 \cdot \sqrt{Cm}$ – собственная частота и коэффициент затухания колебаний массы.

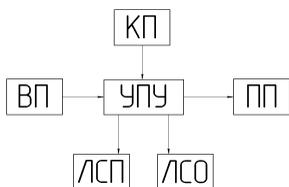


Рис. 3.26. Блок-схема
авиационного измерителя
вибрации (ИВ)

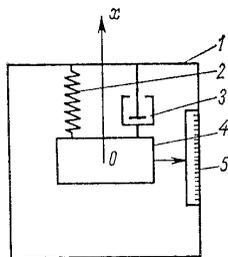


Рис. 3.27. Принципиальная схема датчика
вибрации: 1 – корпус; 2 – упругий
элемент; 3 – демпфер; 4 – сейсмическая масса;
5 – измеритель виброскорости

В случае $\omega \gg \omega_0$ масса при движении корпуса датчика остается практически неподвижной, а в случае $\omega \ll \omega_0$ масса с запаздыванием по фазе повторяет движение корпуса.

В первом случае датчик обычно используют для измерения виброперемещения (виброскорости), во втором – для измерения виброускорения (виброперегрузки).

Резонансные ВП ($\omega \approx \omega_0$) в практике виброизмерений не используют из-за нелинейности их амплитудно-частотной характеристики.

Датчики вибрации различают и по способу генерации электрических сигналов, пропорциональных вибрационным параметрам. В практике виброизмерений обычно используют индукционные и пьезоэлектрические ВП.

В индукционном ВП (рис. 3.28) массу 1 выполняют в виде постоянного магнита, который устанавливается в металлический корпус 2 на подшипниках качения 4.

Среднее положение массы относительно обмотки 3 обеспечивают двумя относительно мягкими цилиндрическими пружинами 7 и 8.

Под воздействием возбуждающей силы, приложенной к корпусу датчика 2, обмотка 3 смещается относительно остающегося неподвижным магнита 1 ($\omega \gg \omega_0$). В силу этого в витках обмотки наводятся индукционные токи (ЭДС), частота которых равна частоте возбуждающей силы (ω), а амплитуда пропорциональна величине виброскорости (V). Чувствительность индукционных ВП, характеризуемая величиной ЭДС (mV) на единицу виброскорости (мм/с), зависит от параметров магнитной системы и числа витков обмотки.

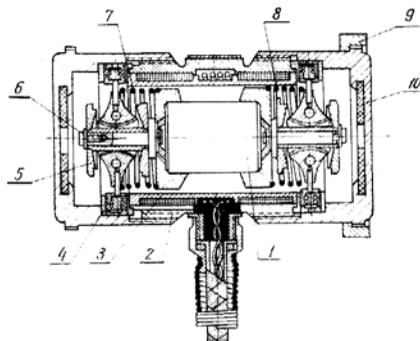


Рис. 3.28. Устройство индукционного датчика вибрации:
 1 – масса (магнит); 2 – корпус датчика; 3 – обмотка; 4 – опора 5 – шайба;
 6 – винт; 7,8 – пружина; 9 – фланец; 10 – прокладка

В силу ограниченного частотного диапазона (30...150 Гц), больших габаритов и массы (до 0,4 кг) индукционные ВП размещают на наружных поверхностях корпусов (в плоскости опор роторов) и используют для измерения виброскорости (вибросмещения) на основной роторной гармонике двигателя.

К недостаткам индукционных ВП следует отнести наличие в их конструкции подвижных элементов (узлов трения), износ которых приводит к снижению точности измерений и надёжности аппаратуры.

В пьезоэлектрическом ВП (рис. 3.29) масса 1 жёсткой тарельчатой пружиной 5 прижата к пьезопластине 7, изготовленной из пьезокерамики. Все элементы ВП размещают в прочном металлическом корпусе 2.

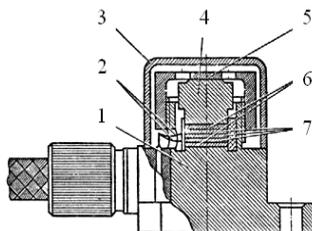


Рис. 3.29. Устройство пьезоэлектрического датчика вибрации:
 1 – основание; 2 – токоотводы; 3 – крышка; 4 – груз; 5 – пружина;
 6 – прокладки; 7 – пьезоэлементы

Под воздействием возбуждающей силы масса совершает колебательные движения, параметры которых (частота и амплитуда) совпадают с параметрами возбуждающей силы ($\omega \ll \omega_0$). Однако, в силу запаздывания фазы колебаний массы относительно корпуса, возникают инерционные силы, изменяющие усилие прижатия массы к пьезопластине, т.е. деформацию пьезокерамики.

При этом на обкладках пьезопластины возникает ЭДС, частота которой равна частоте возбуждающей силы, а амплитуда пропорциональна виброускорению датчика. Чувствительность пьезоэлектрических ВП, характеризуемая отношением амплитуды ЭДС (mV) к величине виброускорения (м/с^2), зависит от материала пьезопластины и жёсткости пружины.

Верхняя рабочая частота пьезоэлектрических гВП достигает 50 кГц, а нижняя – 10 Гц. В силу малых габаритов и массы (до 0,05 кг) пьезоэлектрические ВП можно размещать и на внутренних элементах конструкции ГТД (например, на опорах ротора). Это способствует повышению чувствительности контроля и лучшей локализации мест возникновения неисправностей.

Основными недостатками пьезоэлектрических ВП являются низкая надёжность в силу малой механической прочности пьезопластин и повышенная чувствительность к внешним электромагнитным полям (наводкам).

Основными нормируемыми параметрами ВП являются частотный диапазон, чувствительность и функция преобразования.

Функция преобразования (зависимость величины выходного напряжения от амплитуды вибропараметра) является важнейшей нормируемой характеристикой ВП, так как она определяет точность измерений уровня вибраций.

Усилительно-преобразующее устройство (УПУ) включает: согласующее устройство, предусилитель, фильтрующее устройство, усилитель мощности, схему сигнализации опасной вибрации и схему встроенного контроля (ВК).

Согласующее устройство предназначено для согласования электрических параметров ВП с предусилителем.

Предусилитель обеспечивает предварительную обработку и усиление электрических сигналов, идущих от ВП.

Фильтрующее устройство выполнено в виде RC – фильтра, основное назначение которого подавление составляющих спектра вибра-

ции, не несущих полезную информацию о техническом состоянии изделия.

Усилитель мощности обеспечивает нормальную работу показывающего прибора (ПП) и системы сигнализации.

Система сигнализации обеспечивает включение ламп сигнализации ЛС (сигнального табло) в случае превышения величины вибрации предельно-допустимого уровня, а также выработку соответствующих сигналов для регистрации на МСРП.

Система встроенного контроля при нажатии кнопки проверки (КП) вырабатывает тестовый сигнал, параметры которого соответствуют сигналу от ВП при предельно-допустимом значении вибрации, что позволяет провести проверку работоспособности ИВ непосредственно на борту ЛА.

Метрологическое обеспечение измерений вибрации

С целью обеспечения единства виброизмерений Госстандартом разработаны руководящие документы, в которых указаны методы и средства проверки метрологических (точностных) характеристик датчиков и измерителей вибрации, а также нормативы на их допустимые погрешности.

Датчики вибрации (ВП) проверяют при помощи устройств воспроизведения вибрации (вибростендов) различной конструкции и назначения. Параметры колебаний вибростола, на котором закрепляют ВП, контролируют с помощью образцовых ИВ или оптическим методом.

Электронные блоки и приборы, входящие в состав ИВ, проверяют с помощью образцовых генераторов электрических сигналов и электроизмерительных приборов.

К нормируемым метрологическим характеристикам авиационных ИВ и ВП относят: диапазон рабочих частот и амплитуд контролируемого вибропараметра, функцию преобразования, а также основную приведенную (абсолютную) погрешность измерений уровня вибрации. В рабочем диапазоне частот (30 ... 150 Гц) и амплитуд виброскорости (5 ... 100 мм/с) основная приведенная погрешность в рабочем диапазоне измерений (10.....50 мм/с) обычно не превышает 5%.

Нормируемые метрологические характеристики ИВ проверяют перед установкой на ЛА, а также периодически в процессе эксплуата-

ции. Результаты проверок фиксируют в формуляре (паспорте), так как они служат основанием для использования аппаратуры по назначению.

Проверки работоспособности ИВ (УПУ, ПП и системы сигнализации) проводят перед каждым полётом с использованием системы встроенного контроля (путём нажатия кнопки КП). Проверки технических характеристик компонентов ИВ (ВП, УПУ, ПП и других) проводят с помощью специализированной установки для проверки ИВ (УПИВ-300М), как на борту ЛА, так и в лабораторных условиях.

Комплексные проверки характеристик ИВ в эксплуатации не проводят из-за отсутствия устройств воспроизведения вибрации.

Бортовые измерители вибрации (ИВ)

Бортовые ИВ используют для контроля уровня вибрации ГТД, трансмиссий вертолётных ВСУ и других изделий АТ. Контролируемыми параметрами при этом служат вибросмещение, виброскорость или виброускорение (виброперегрузка).

У изделий АТ, генерирующих низкие частоты колебаний (до 50 Гц), обычно контролируют уровень вибросмещения, генерирующих средние частоты (до 150 Гц) – уровень виброскорости, а у изделий, генерирующих высокие частоты (более 200 Гц) – уровень виброперегрузки. У современных ГТД чаще всего контролируют виброскорость, которая лучше других параметров вибрации характеризует силовую нагрузку конструкций.

Бортовые ИВ включают в себя один или несколько (до 6) ВП, которые жёстко закрепляют на корпусе двигателя. Электронный блок размещают в приборном отсеке, а ПП и ЛС (сигнальные табло) – на приборной доске в кабине экипажа. В качестве датчиков вибрации используют индукционные или пьезоэлектрические ВП различной конструкции.

Большая часть авиационных ИВ (ИВ-154, ИВ-50 и др.) предназначена для контроля роторной вибрации ГТД и выполнена по типовой схеме (см. рис. 24). Они различаются типом и числом используемых ВП, диапазоном рабочих частот и амплитуд измерения вибрации, а также точностными характеристиками.

Аппаратура контроля вибрации ИВ –154

Аппаратура ИВ-154 предназначена для непрерывного контроля уровня вибрации (виброскорости) ГТД, а также для световой сигнализации о возникновении вибрации, превышающей предельно-допустимые значения. Информация об уровне вибрации двигателя поступает на ПП, в СС и МСРП.

Аппаратура выполнена по типовой схеме (см. рис. 24). В её состав входит двухканальный электронный блок типа БЭ-8, два ВП типа МВ-28А (или другого типа) и показывающий прибор типа ИВ-200.

Устройство и работа

Аппаратура ИВ-154 содержит два независимых канала, на вход которых поступают сигналы от соответствующих датчиков вибрации (ВП). В каждом канале сигнал от ВП проходит через полосовой фильтр (30...150 Гц), усиливается, выпрямляется, усредняется и поступает на сравнивающее устройство, которое автоматически выбирает максимальный из двух сигналов. Выбранный сигнал после дополнительного усиления поступает на показывающий прибор и в систему сигнализации.

Датчик вибрации представляет собой ВП индукционного типа, который закрепляется на корпусе двигателя. Электрическое соединение датчика с электронным блоком осуществляется экранированным кабелем.

Электронный блок выполнен на металлическом шасси, на котором установлены блок питания и платы каналов усиления. На лицевой панели блока под планкой с надписью «Настройка каналов» находятся элементы регулировки ИВ. К разъему «Сигнал» подведены входные и выходные сигналы, а также цепи питания переменным и постоянным током. Разъем «Контроль» обеспечивает проверку работоспособности ИВ с помощью поверочной установки (УПИВ-300М).

Показывающий прибор предназначен для измерения уровня вибрации двигателя. Шкала прибора проградуирована в единицах виброскорости (0 ... 100 мм/с) с ценой деления 5 мм/с.

Основные технические данные

Рабочий диапазон частот вибрации, Гц	30...150
Диапазон контроля вибрации, мм/с	5...100
Основная приведенная погрешность измерений (γ_n):	
в рабочем диапазоне (5...50 мм/с), %	5
во всём диапазоне, %	не более 15
Питание от сети	=(27В),~(115 В)

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Определение точности измерений вибрации

Ниже рассмотрена методика определения точности измерений вибрации ГТД аппаратурой ИВ-154. При этом определение точности измерений заключается в сравнении показаний рабочего и образцового ИВ, подключённых к одному датчику вибрации.

Лабораторное оборудование

Эксперимент проводят на установке, позволяющей производить измерения вибрации в условиях, приближенных к реальным условиям проведения измерений на ЛА.

Установка (рис. 3.30) состоит из устройства воспроизведения вибрации (вибростола), рабочего измерителя вибрации (ИВ-154), цифрового милливольтметра, электронного осциллографа и вспомогательного оборудования, необходимого для проведения эксперимента.

На вибростоле 1 закреплён датчик вибрации 2, который используют для измерения величины виброскорости. Регулирование амплитуды колебаний вибростола осуществляют путем изменения величины напряжения переменного тока (50 Гц), подаваемого на обмотку вибростола от автотрансформатора 3. Вольтметр 4 служит для измерения подаваемого на вибростол напряжения.

«Истинное» значение виброскорости определяют по величине напряжения (ЭДС) генерируемой датчиком вибрации, которую измеряют цифровым вольтметром 5. Наблюдение формы ЭДС осуществляют с помощью электронного осциллографа 6.

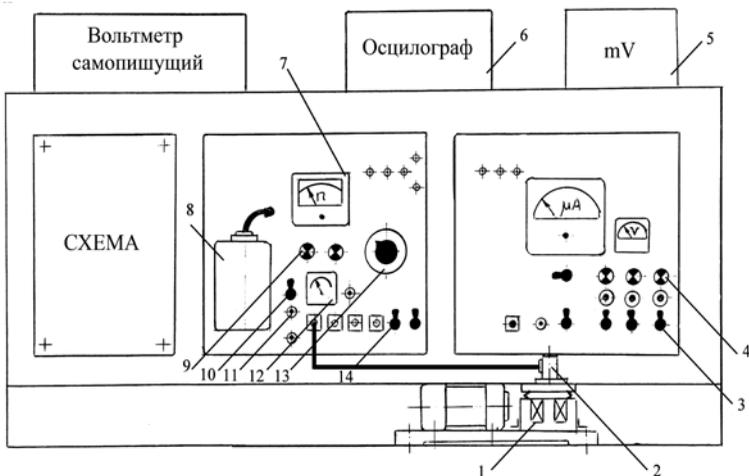


Рис. 3.30. Установка для определения точности измерений уровня вибрации:

- 1 – вибростол; 2 – рабочий датчик вибрации (ВП); 3 – ручка управления автотрансформатора (ЛАТР); 4 – контрольный вольтметр; 5 – цифровой милливольтметр; 6 – осциллограф; 7 – электронный блок (БЭ); 8 – указатель вибрации (ПП); 9 – лампы сигнализации опасной вибрации (ЛС); 10 – кнопки встроенного контроля (КП); 11 – выключатель электропитания ИВ; 12,13 – выключатель электропитания установки; 14,15 – сигнальная лампа подачи питания

Датчик вибрации включён на вход электронного блока 7, к выходам которого подключены указатель вибрации 8, сигнальные лампы опасной вибрации 9 и кнопки встроенного контроля 10. Питание на ИВ поступает через выключатель 11, а на установку (220, 115 и 27 В) – через выключатели 12 и 13. Сигнализация подачи питания осуществляется лампами 14 и 15.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент по определению точности измерений вибрации проводят в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.3, в следующей последовательности (см. рис. 3.30):

1. Выбрать в диапазоне изменения напряжения питания вибростола (0...100В) 8...10 контрольных точек и занести их значения в

протокол испытаний (X_i^*).

2. Установить ручку управления ЛАТР на нулевое деление шкалы; подать питание на установку и ИВ.

3. Наблюдая за показаниями контрольного вольтметра, ручкой управления ЛАТР последовательно задать выбранные значения напряжения питания вибростола; в каждой контрольной точке произвести отсчёт и регистрацию в протокол соответствующих показаний указателя вибрации (Y_i) и цифрового вольтметра (Π_i).

4. Возвратить рукоятку ЛАТР на нулевое деление шкалы; отключить питание ИВ и установки.

5. Произвести расчёт «истинных» значений виброскорости в контрольных точках $X_i = K_{\Pi} \Pi_i$, мм/с, где K_{Π} – коэффициент пропорциональности по вибрации; Π_i – показания цифрового вольтметра, мВ.

6. Провести обработку полученных данных согласно методике, изложенной в разделе 2.3.

7. Провести анализ результатов эксперимента, дать оценку точности измерений вибрации и оформить отчёт по лабораторной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение вибрационных измерений?
2. Каковы природа и источники вибрации изделий?
3. Какие параметры вибрации используют для контроля состояния изделий АТ?
4. Каковы принцип работы и область применения индукционных и пьезоэлектрических ВП ?
5. Каковы устройство, работа и основные технические данные аппаратуры ИВ-154?
6. Как определяют точность измерений вибрации?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Авиационные приборы и измерительные системы / под ред. В.Г. Воробьева.* – М.: Транспорт, 1981. – 391 с.
2. *Селиванов, М.Н.* Качество измерений. Метрологическая справочная книга / *М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшева.* – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
3. *Макаровский, И.М.* Основы технической эксплуатации и диагностики авиационной техники: учеб. пособие / *И.М. Макаровский.* – Самара: СГАУ, 2004. – 115 с.

Учебное издание

**ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Электронные методические указания

Составители:

Игонин Николай Николаевич

Макаровский Игорь Мстиславович

Киселев Денис Юрьевич

Редактор И.И. Спиридонова
Довёрстка И.И. Спиридонова

Арт. 70/2014.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.