

# Обеспечение единства измерений параметров вибрации при технической эксплуатации воздушных судов



В процессе лётной эксплуатации воздушных судов (ВС) – как самолётов, так и вертолётов отечественного и зарубежного производства, оснащенных газотурбинными двигателями (ГТД), – важнейшими контролируемыми величинами являются параметры вибрации. На воздушном транспорте (ВТ) к основным контролируемым параметрам вибрации в полёте относятся виброскорость (мм/с), виброускорение (мм/с<sup>2</sup>) или виброперемещение (в единицах ускорения свободного падения “g”). Особую информативность они несут для самолётов с турбовинтовыми двигателями, а также вертолётов, на которых – из-за особенностей конструкции – вибрация значительно выше, чем на самолётах с турбореактивными двигателями.

## Требования к контролю вибрации ГТД

Общие требования к контролю вибрации и допустимым ее уровням на все виды главных и вспомогательных ГТД гражданской авиации регламентированы в ГОСТ 26382 [1]. Требования установлены, исходя из обеспечения достаточной прочности конструкции, виброустойчивости и вибро-

прочности агрегатов и оборудования, закреплённых на ГТД, при длительной работе во всём диапазоне частот вращения роторов и для всех режимов, как при стендовых испытаниях, так и в условиях эксплуатации.

Нормирование вибрации двигателя проводится [1] по составляющим амплитудно-частотного спектра, возникающего в результате взаимодействия сложной механической системы ГТД, имеющей большое число собственных частот и форм колебаний, со случайно связанными между собой различными источниками возбуждения механического и газодинамического происхождения переменной интенсивности.

Интенсивность источника возбуждения и вибрационную напряженность ГТД и его элементов характеризуют частота и амплитуда каждой составляющей спектра. В зависимости от источников возбуждения нормируют отдельно вибрацию ГТД с частотой первой роторной гармоники и вибрацию с частотой, отличающейся от частоты первой роторной гармоники. К числу основных источников возбуждения вибрации ГТД с частотой первой роторной гармоники относят [1]: а) массовую неуравновешенность роторов двига-

**А. А. Богоявленский,**  
кандидат технических наук,  
член-корреспондент  
Метрологической Академии,  
ФГУП ГосНИИ ГА, Москва

**Ключевые слова:** авиационная техника, воздушный транспорт, воздушное судно, газотурбинный двигатель, виброскорость, виброускорение, виброперемещение, метрологический риск, метрологическое обеспечение

**Keywords:** aviation engineering, air transport, aircraft, gas-turbine engine, vibration velocity, vibration acceleration, vibration displacement, metrological risks, metrological support

теля; б) несоосность роторов, соединённых последовательно между собой; в) торцевые биения подшипников на цапфах роторов; г) аэродинамическую неуравновешенность рабочих ступеней роторов, преимущественно рабочих ступеней вентилятора; д) тепловой дисбаланс роторов, вызванный неравномерностью охлаждения оставленного ГТД.

Допустимые уровни вибрации ГТД установлены:

- в диапазоне частот вибрации от 20 до 2000 Гц;
- в каждом из трех ортогональных направлений – осевом (параллельно оси ГТД), поперечного-горизонтальном и вертикальном;
- на корпусах двигателя в плоскостях крепления узлов подвесок двигателя на силовой установке ВС и в плоскостях расположения опор роторов, имеющих непосредственную силовую связь с корпусами двигателя.

На установившихся режимах максимальная амплитуда величин вибрации ГТД при предельных испытаниях, а также в эксплуатации при контроле в наземных условиях и в условиях полета ВС не должна превышать значений, указанных в таб. 1:

### Бортовая аппаратура контроля вибрации

Для контроля вибрации авиационных ГТД в процессе лётной эксплуатации на каждом типе ВС применяется аппаратура индивидуальной конструкции. Так, для вертолётов Ми-8, Ми-17 и их модификаций – это аппаратура ИВ-500А, самолётов Ил-76 – аппаратура ИВ-200МК, самолётов Ту-154М – ИВ-50П-А-3 (сер. 2) и так далее.

Таблица 1

Диапазон частот вибрации двигателя $f$ , Гц	Допустимая амплитуда		
	виброперемещения, м	виброскорости, м/с	виброускорения, м/с <sup>2</sup>
От 20 до 72	$8,75 \times 10^{-3} \times 1/f$	$55 \times 10^{-3}$	$0,345 \times f$
От 72 до 100	$0,633 \times 1/f^2$	$3,97 \times 1/f$	25
От 100 до 637	$6,36 \times 10^{-3} \times 1/f$	$40 \times 10^{-3}$	$0,251 \times f$
От 637 до 2000	$4,053 \times 1/f^2$	$25,47 \times 1/f$	160

### Термины и определения:

- **вибрация:** движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин (ГОСТ 24346 [2]);
- **вибрационная устойчивость:** свойство объекта при заданной вибрации выполнять заданные функции и сохранять в пределах норм значения параметров (ГОСТ 24346 [2]);
- **вибрационные испытания:** испытания объекта при заданной вибрации (ГОСТ 24346 [2]);
- **виброперемещение:** составляющая перемещения, описывающая вибрацию (ГОСТ 24346 [2]);
- **виброскорость:** производная виброперемещения по времени (ГОСТ 24346 [2]);
- **виброускорение:** производная виброскорости по времени (ГОСТ 24346 [2]);
- **виброперегрузка:** физическая величина, характеризующая нагрузку, действующую на механическую систему и физические тела при колебаниях. Значение виброперегрузки равно значению виброускорения, выраженному в единицах ускорения свободного падения [3];
- **лётная эксплуатация:** часть эксплуатации воздушного судна, включающая планирование и подготовку к полёту, полёт, а также необходимые послеполётные процедуры, выполняемые лётным экипажем (ОСТ 102791 [4]);
- **техническая эксплуатация авиационной техники:** часть эксплуатации, включающая транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт изделия авиационной техники (ГОСТ Р 53863 [5]);
- **техническое обслуживание авиационной техники:** комплекс работ или работа по поддержанию работоспособности или исправности изделия авиационной техники при использовании по назначению, ожидании, хранении, транспортировании (ГОСТ Р 53863 [5]);
- **ремонт авиационной техники:** комплекс работ по восстановлению исправности или работоспособности изделий авиационной техники и (или) восстановлению ресурсов изделий или их составных частей (ГОСТ Р 53863 [5]);
- **риск метрологический:** мера опасности и последствий наступления неблагоприятных событий, обусловленных применением недостоверных методов, средств и способов достижения требуемой точности измерений (ГОСТ Р 55588 [6]).

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Аппаратура ИВ-500А (рис. 1 и 2) предназначена для контроля вибрации ГТД, а также сигнализации о возникновении уровня вибрации, превышающего допустимый. Напряжение от каждого из двух датчиков МВ-03 из комплекта ИВ-500А через согласующие устройства УсС-6 подаются на электронный блок БЭ-9А, где усиливается до величины, необходимой для работы указателя сигнализации о достижении заданного опасного уровня вибрации, а также выдачи сигналов в систему автоматизированного контроля. Указатель вибрации (рис. 1) представляет собой миллиамперметр магнитоэлектрической схемы, шкала которого отградуирована в процентах. Диапазон измерений 0–100%, оцифрованные отметки шкалы 0, 2, 4, 6, 8, 10, что соответствует виброскорости 0–100 мм/с. В верхней части указателя имеется механический индекс, устанавливаемый на деление, соответствующее опасному уровню вибрации. При возникновении вибрации корпуса ГТД и её нахождении в рабочем диапазоне частот, в катушке датчика, жёстко связанной с его корпусом, индуцируется электродвижущая сила, величина которой пропорциональна скорости относительного перемещения магнита и катушки.

В полёте указатель в каждый конкретный момент времени индуцирует фактический уровень вибрации. Диапазон контролируемых вибраций составляет 5–100%. В аппаратуре предусмотрена световая сигнализация “повышенная вибрация двигателя”, настроенная на срабатывания при уровне вибрации 50% и сигнализация “опасная вибрация”, настроенная на 65%. Имеется так называемый встроенный контроль, при включении которого срабатывает сигнализация



Рис. 1  
Указатели вибрации УК-68В правого и левого двигателей из комплекта аппаратуры ИВ-500А в кабине экипажа вертолета Ми-8



Рис. 2  
Комплект аппаратуры ИВ-500А (без УК-68В) при лабораторной проверке: слева направо – датчики вибрации МВ-03 правого и левого двигателей; устройства согласующие УсС-6; блок БЭ-9А; стойка с монитором оператора комплекса проверочного КПК-6

и стрелка указателя отклоняется на отметку 60–100%.

При этом если на вертолётах Ми-8, Ми-17 на один ГТД установлено по одному датчику, то на самолётах, как правило, по два датчика: один на разделительном корпусе ГТД, второй – на его задней подвеске.

Для таких систем основная относительная погрешность каналов контроля и срабатывания сигнализаторов на превышение допустимого уровня вибрации в нормальных условиях обычно находится в диапазоне  $\pm 10\%$  от верхнего предела нормируемого значения контролируемой вибрации.

Для документальной регистрации контролируемых вибраций на борту ВС в полёте работает параметрический бортовой накопитель (так

называемый “чёрный ящик”) – устройство для регистрации и накопления полётной информации в течение одного или нескольких полётов. Например, устанавливаемая на самолётах Ту-154М система МСРП-64М-2 регистрирует разовую команду: “вибрация велика” двигателей № 1, 2, 3, поступающую со штатных датчиков МВ-04–1 системы ИВ-50П-А-3 (сер. 2) при выдаче сигнала повышенной вибрации любого из ГТД. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для эксплуатационного контроля и при расследовании лётных происшествий.

Таким образом, в процессе лётной эксплуатации ВС на воздушном транспорте обеспечивается необходимый и достаточный контроль параметров вибрации.

## Лабораторные проверки бортовой аппаратуры контроля вибрации

Для лабораторных проверок бортовой аппаратуры контроля вибрации ИВ-500А, ИВ-200МК, ИВ-50П-А-3 (сер. 2), ИВ-41 и других, в организациях по техническому обслуживанию широко распространена такая аппаратура, как устройства наземного контроля типа УПИВ-П, УПИВ-У, УПИВ-200, УПИВ-300 и целый ряд им подобных. Все они относятся к категории специальных средств измерений (ССИ). В последние годы на отечественном ВТ наметилась положительная тенденция на замену устаревших типов ССИ. Успешно применяются две отечественные разработки в части проверок бортовой аппаратуры контроля вибрации, изготовленные на основе современной элементной базы и с применением компьютерных технологий – это наземная автоматизированная система НАСКД-200

[7, 8] и контрольно-проверочный комплекс КПК-6 (рис. 2).

Комплекс КПК-6 – помимо аппаратуры контроля вибрации ИВ-500А, обеспечивает возможность проведения лабораторных проверок такого авиационного оборудования вертолётов как системы сигнализации пожаротушения ССП-ФК и аварийной сигнализации САС-4, датчики углового перемещения МУ-615 и перегрузки АДИС-2, термоэлектрические термометры ТСТ-282 и другие. Проверяемое оборудование подключается к КПК-6 с помощью соединительных жгутов. Управление процессом проверки оборудования осуществляется с помощью программного обеспечения комплекса, на основе которого оператору представляется пользовательский интерфейс и осуществляется управление аппаратной частью комплекса.

Пользовательский интерфейс позволяет: 1) вводить паспортные данные проверяемого оборудования, номер вертолета, данные о наработке; 2) управлять процессом проверки; 3) наглядно представлять измеренные параметры оборудования; 4) информировать оператора о недопустимых значениях параметров; 5) предлагать оператору возможные варианты устранения неисправности по признаку проявления дефекта, а также редактировать и добавлять новые признаки и дефекты; 6) по завершению проверки имеется возможность распечатать результаты проверки на бланке отчёта установленной формы (оформить протокол испытаний); 7) сохранять результаты проверки и сведения об оборудовании в базе данных.

Аппаратная часть комплекса осуществляет измерение параметров проверяемого оборудования,

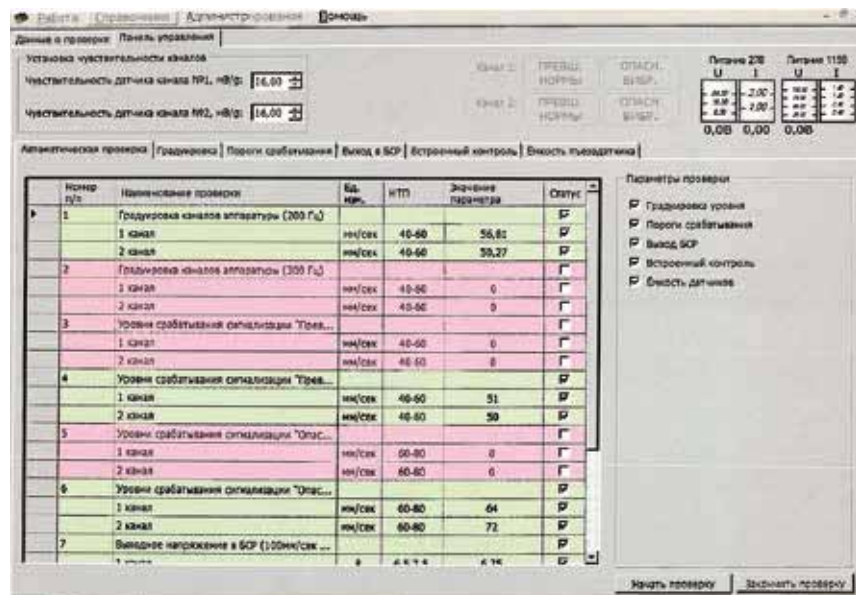


Рис. 3  
Внешний вид активной панели управления подпрограммы проверки аппаратуры ИВ-500А на мониторе оператора комплекса КПК-6

формирование управляющих воздействий, необходимых для проверки оборудования. Состав аппаратной части: 1) промышленный компьютер; 2) платы сбора данных; 3) модули ввода/вывода; 4) управляемые источники питания; 5) релейные платы; 6) дополнительные устройства.

В конструктивном плане КПК-6 изготавливается по модульному принципу; из отдельных частей формируется рабочее место оператора. В состав КПК-6 входят: измерительно-вычислительный комплекс (ИВК); сенсорный монитор оператора; клавиатура; стол для размещения тестируемого оборудования и другие вспомогательные элементы и модули. ИВК укомплектован промышленными компьютерами, источниками питания, измерительными платами, платами управляющих сигналов. Монитор оператора вмонтирован в специальную оптипанель, что обеспечивает возможность изменять углы поворота и наклона. Ин-

терфейс монитора комплекса позволяет оперативно и наглядно (рис. 3) контролировать ход тестирования. Номенклатура проверок и регулировок измерителя ИВ-500А, выполняемых на КПК-6, соответствует регламенту технического обслуживания. Она включает в себя: 1) проверку градуировки каналов блока; 2) регулировку усиления каналов блоков аппаратуры; 3) проверку и регулировку срабатывания сигнализации блока; 4) проверку выходных напряжений блока и наличия ёмкости датчика; 5) регулировку встроенной системы контроля (ВСК) и проверку работоспособности по ВСК.

Устройства наземного контроля УПИВ-П, УПИВ-У, УПИВ-200, УПИВ-300 и подобные им, являются компактными переносными устройствами, обеспечивающими проверку работоспособности бортовой аппаратуры контроля вибрации. Структурная схема, например УПИВ-П, включает в себя четыре

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

функциональных блока [9]: генератор, блок проверки пьезодатчиков, блок измерения и индикации, а также блок питания. Блок генератора используется при проверке электронного блока бортовой аппаратуры ИВ-41, в нем имитируется сигнал пьезоэлектрического датчика аппаратуры. Генератор вырабатывает синусоидальное напряжение переменного тока плавной перестройкой частоты и амплитуды выходного сигнала. Выходное устройство генератора преобразует выходное напряжение для обеспечения выдачи в электронный блок аппаратуры синусоидального меняющего электрического заряда заданной частоты и амплитуды, а также для обеспечения измерения выдаваемых параметров.

Блок проверки пьезодатчиков осуществляет проверку входящих в состав бортовой аппаратуры пьезоэлектрических датчиков вибрации. Заложенный в блоке проверки метод [9] основан на использовании обратного пьезоэлектрического эффекта. Если на датчик в течение определённого времени подавать электрическое напряжение, то это приведёт к деформации его пьезоэлектрических пластин. После отключения воздействующего напряжения пьезоэлектрические пластины стремятся восстановить свою форму, при этом на их поверхности возникает электрический заряд, который после соответствующего преобразования используется как сигнал отклика датчика, свидетельствующий о работоспособности. Достоверность проверки повышается в случае периодического повторения подачи возбуждающих импульсов достаточной амплитуды через определённое время. За время одного цикла проверки на датчик вибрации

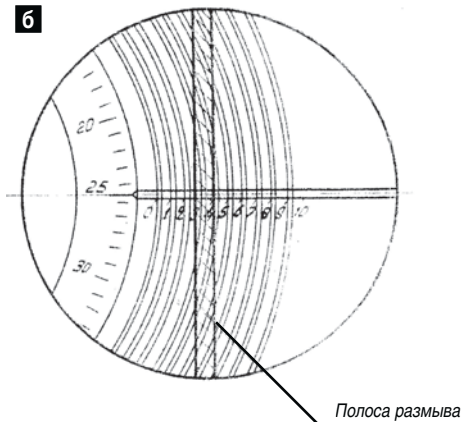
поступает периодическая последовательность импульсов заданной длительности и амплитуды с выхода устройства формирования импульсов возбуждения. На время прохождения этих импульсов приённое устройство анализа сигналов отклика датчика закрыто.

Преобразование сигнала отклика датчика позволяет произвести с большой степенью вероятности исключение возможных случайных помех, усилить сигнал и выдать индикацию, характеризующую работоспособность датчика “исправен” или “не исправен”. Контроль всех параметров (кроме частоты) производится в режиме измерения напряжения постоянного тока путём перевода аналогового сигнала в кодированный эквивалент, осуществляемого схемой с двойным интегрированием.

## Испытания авиационного оборудования и агрегатов после ремонта на вибрационную устойчивость

Для испытаний на виброустойчивость авиационного оборудования (например, авиационных радиоконпасов АРК-9, радиостанций Р-842, радиовысотомеров РВ-3, РВ-5; гироскопических приборов) и агрегатов (например, гидравлического усилителя КАУ-30) в организациях по ремонту применяются стенды. Испытания проводятся при задании значений виброперемещений 0,15–0,4 мм в диапазонах частот 10–20; 60–80 и 250–300 Гц. Как испытательное оборудование они с положительными результатами должны пройти аттестацию с учетом положений ГОСТ Р 8.568 [10], директивы Авиационной администрации [11] и ОСТ 54–3–1572.80 [12].

При работе вибростенда механические колебания вибростола, преобразованные из вырабатываемых тарированным усилителем электрических колебаний, передаются испытываемому объекту, установленному и закреплённому на специальном кронштейне на вибростоле. Измерение размаха вибрации подвижной системы вибростола с испытываемым объектом на некоторых моделях стендов осуществляется спиральным окулярным микрометром ОМС-6 (рис. 4а) по так называемому измерительному ножу. Частота задающего низкочастотного генератора сигналов контролируется по частотометру электронно-счётному. Устройство и принцип работы микрометра окулярного (оптического канала) при измерении величины размаха вибрации следующие. По истечении двух – трёх минут после подключения питания к тарированному усилителю в окуляре ОМС-6 будет видна ярко освещённая полоса размыва, ширина которой характеризует величину размаха вибрации (рис. 4б). При измерении полосы размыва двойная спираль окулярной головки микрометра наводится попеременно, то на один, то на другой край полосы размыва с таким расчетом, чтобы двойная спираль располагалась симметрично относительно границ края. Разность показаний при двух положениях двойной спирали по краям полосы размыва характеризует её ширину, а, следовательно, – размах колебаний. Так как в эту величину входит ширина риски ножа (7 мкм), то размах колебаний рассчитывается с учетом её вычитания из результата измерений. При этом делается несколько измерений, и за результат принимается среднее арифметическое значение.



**Рис. 4**  
Микрометр окулярный спиральный ОМС-6: а) внешний вид ОМС-6 на стенде для виброиспытаний авиационного оборудования в одной из организаций по ремонту б) вид линий в окуляре ОМС-6 при измерении амплитуды виброперемещения (частота колебаний – фиксированная)

При приобретении вибростенда организацией по ремонту и подготовке объекта к испытаниям следует обращать особое внимание на массу испытуемых изделий вместе с установочными кронштейнами – она не должна превышать предельной величины для применяемого типа стенда. Автором при проведении инспекционных проверок организаций по ремонту на соответствие Федеральным авиационным правилам ФАП-145 было выявлено несколько такого рода случаев, что недопустимо, поскольку может привести к не обеспечению условий режимов испытаний, регламентированных ремонтной документацией.

### Измерения вибрации вертолётов при лётных испытаниях после ремонта

Вибрация при проведении испытательного полёта вертолёта после ремонта помимо визуального контроля с помощью бортовой аппаратуры ИВ-500А (рис. 1) дополнительно измеряется виброускорение с применением нештатной аппара-

туры, размещаемой внутри кабины вертолёта. Такое требование включено в Программы лётных испытаний вертолётов, разработанные ФГУП ГосНИИ ГА и введённые в действие Авиационной администрацией для организаций по ремонту. Программы разработаны отдельно для каждого типа вертолётов отечественного производства и содержат требования к нормам допускаемых значений параметров вибрации, а также характеристикам применяемой для этих целей аппаратуры.

В качестве рекомендуемой в Программах названа шестиканальная аппаратура ВИ-6-6ТН, обладающая повышенной чувствительностью, укомплектованная индуктивными датчиками ДУ-5С и обеспечивающая возможность для измерений параметров виброускорения в диапазоне 0,1–20 g. В основе работы аппаратуры заложен принцип амплитудной модуляции несущей частоты индуктивными датчиками, включенными по дифференцированной (полумостовой) схеме. Частотный диапазон работы ДУ-5С составляет от 0 до 200 Гц. Отклонение точек

амплитудно-частотной характеристики от среднего уровня в указанном частотном диапазоне не превышает  $\pm 5\%$  в диапазоне частот от 0 до 160 Гц и  $\pm 12\%$  в диапазоне от 160 до 200 Гц. Температурный диапазон работы ДУ-5С составляет от  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что идеально подходит для применения при проведении лётных испытаний.

### Измерения вибрации при стендовых испытаниях авиационных ГТД на мотороиспытательных станциях в организациях по ремонту

В начале данной статьи приведены сведения о ГОСТ 26382 [1], содержащем общие требования к контролю вибрации и допустимым её уровням на все виды главных и вспомогательных ГТД, которыми руководствуются также и при проведении их стендовых испытаний.

Измерения вибрации производятся в организациях по ремонту для подтверждения соответствия авиационных ГТД допустимым уровням с применением для этой

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

цели измерительных каналов (ИК), входящих в комплект стенда. Каждый ИК состоит из нескольких компонентов. Например, в состав ИК виброперегрузок одного из типов турбовинтового ГТД входят:

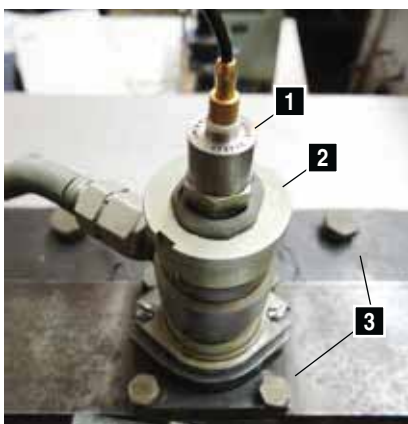
- блок указателей вертикального и горизонтального направления (рис. 5), обеспечивающий поочередное измерение виброперегрузок роторных и винтовых гармоник ГТД в горизонтальном и вертикальном направлениях. Указатели на блоке отградуированы в единицах “g”; ИК имеют две полосовые частотные характеристики:  $f = 202\text{--}208$  Гц обеспечивает измерение виброперегрузок по первой роторной гармонике;  $f = 170\text{--}176$  Гц — в режиме малого газа;
- датчики вибрации МВ-25В (рис. 6, поз. 2) и МВ-25Г — соответственно для измерения виброперегрузок в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Конструктивно датчики МВ-25В (Г) представляют собой стальной корпус, являющийся одновременно и магнитопроводом, внутри которого находится катушка с разделённой на две секции обмоткой. Катушка жёстко связана с корпусом датчика. Внутри катушки помещена сбалансированная масса в виде постоянного магнита, который связан с корпусом датчика посредством шариковых подшипников. Среднее положение магнита в направлении оси датчика, совпадающей с направлением измерения режимов вибрации, обеспечивается двумя цилиндрическими пружинами. Датчик снабжен однопроводным экранированным кабелем. Вторым проводом является экранная оплётка в резиновой трубке.

При этом для получения дополнительной информации при стандо-



**Рис. 5**  
Лицевая панель блока указателей вертикального и горизонтального направления аттестуемых ИК виброперегрузок испытательного стенда турбовинтового ГТД



**Рис. 6**  
Элементы эталонного и аттестуемого ИК виброперегрузки (1 – эталонный вибродатчик; 2 – рабочий вибродатчик вертикального направления; 3 – стол вибростенда)

вых испытаниях количество датчиков вибрации, монтируемых на ГТД, как правило, на один больше, чем на двигателе в процессе лётной эксплуатации ВС.

Для подтверждения возможности и достоверности результатов проводимых испытаний с учетом положений ГОСТ Р 8.568 [10], директивы Авиационной администрации [11], ОСТ 54–3–1572.80 [12], а также ОСТ 101021 [13], проводится комплексная аттестация стендов мотороиспытательных станций (МИС), которая включает в себя, в том числе, и аттестацию ИК вибрации. В развитие ОСТ 101021 [13] специалистами метрологической службы ФГУП ГосНИИ ГА разработаны ме-

тоды проведения аттестации ИК параметров вибрации стендов МИС ГТД в организациях по ремонту. Методы успешно применяются при проведении под руководством и при непосредственном участии автора, первичных и периодических аттестаций МИС двигателей Д-30КУ, Д-30КУ-154, Д-30КП, АИ-20, АИ-24, ТВ2–117, ТВ3–117, АИ-9, РУ-19-А300, ТА-6 (6А), ТГ-12, ТГ-16 в отечественных организациях по ремонту. Блок-схема аттестации ИК параметров вибрации представлена на рис. 7, а реальные элементы, входящие в неё, — на рис. 5, 6 и 8.

При выборе элементов эталонного ИК параметров вибрации для исключения возникновения метрологических рисков [14] следует учитывать, что ИК должен иметь суммарную относительную погрешность измерений, обеспечивающую в соответствии с МИ 2070 [15] наличие запаса по точности относительно погрешности аттестуемого канала. Кроме того, для повышения достоверности аттестуемые характеристики исследуются и нормируются с доверительной вероятностью 0,95.

В основе метода аттестации ИК вибрации лежит определение погрешности путём сравнения результатов прямых измерений параметров вибрации по эталонному и аттестуемому ИК. Перед проведением аттестации проводятся подготовительные работы и внешний осмотр. При этом особое внимание обращается на состояние вибродатчиков: при наличии деформации корпусов и повреждений проводки они к аттестации не допускаются. Далее проверяется работоспособность ИК, эталонных и вспомогательных средств аттестации в соответствии с требованиями эксплуатационной документации на них. Подготавливается и собирается схема (рис. 7) соединений ИК, образцовых и вспомогательных

средств измерений. На столе вибростенда (рис. 6) монтируются переходные устройства с закреплённым рабочим и эталонным вибродатчиками. Аттестация ИК виброперегрузки — в соответствии с требованиями к техническим характеристикам ИК вибрации и нормированным уровням вибрации конкретного типа ГТД — проводится в точках, равномерно распределённых по всему рабочему диапазону.

При обработке экспериментальных данных по стандартизованным формулам рассчитываются среднее арифметическое значение ( $A_{cp}$ ) и абсолютное значение среднего квадратического отклонения результатов наблюдений ( $\sigma_n$ ). Затем по формуле 1 — относительное значение среднего квадратического отклонения результатов наблюдений ( $\sigma_{no}$ ):

$$\sigma_{no} = \frac{\sigma_n}{A_{cp}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

и для доверительной вероятности 0,95 по формуле 2 рассчитывается значение погрешности измерений ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = ts \cdot \sigma_{no}, \quad (2)$$

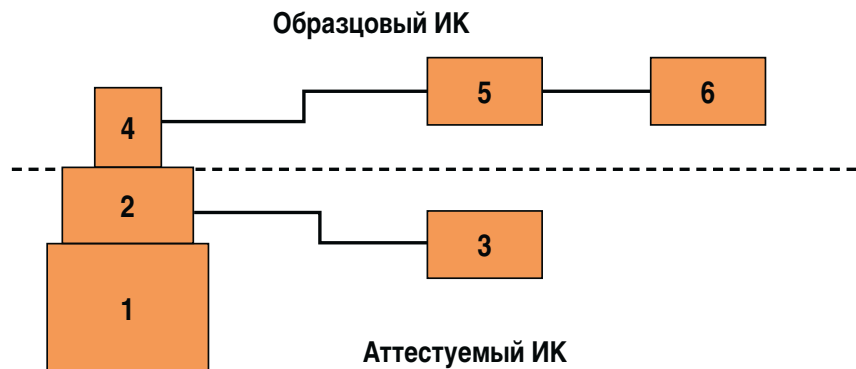
где  $ts$  — коэффициент Стьюдента, выбираемый из таблиц по математической статистике в зависимости от доверительной вероятности и числа наблюдений в выборке. Для  $P_d = 0,95$  и  $n = 6$  коэффициент  $ts = 2,015$ .

Максимальные значения суммарной погрешности ИК вибрации ( $\delta_{ик}$ ) рассчитываются по формуле 3:

$$\delta_{ик} = (D_c + \varepsilon_{0,95}) \max, \quad (3)$$

где:  $D_c$  — систематическая составляющая погрешности, %;

$\varepsilon_{0,95}$  — случайная составляющая суммарной погрешности, %.



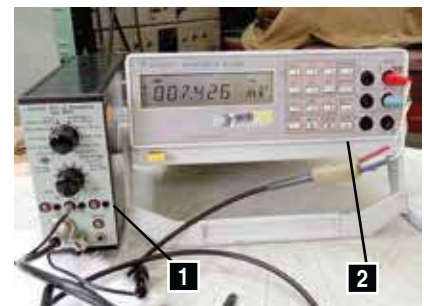
**Рис. 7**  
Блок-схема аттестации ИК параметров вибрации  
(1 — вибростенд; 2 — рабочий вибродатчик; 3 — блок указателей аттестуемого ИК; 4 — эталонный вибродатчик; 5 — усилитель заряда; 6 — вольтметр электронный)

За нормируемую величину погрешности аттестуемого ИК параметров вибрации принимается максимальное значение. Суммарная погрешность измерений аттестуемого ИК виброскорости, виброускорения или виброперегрузки — в соответствии с требованиями ОСТ 101021 [13] — не должна превышать  $\pm 12,0\%$  от верхнего предела для  $P_d = 0,95$ .

### Метрологическое обеспечение

Бортовая аппаратура контроля вибраций ИВ-500А, ИВ-200МК, ИВ-50П-А-3 (сер. 2) и другая, устанавливаемая на ВС, не является средством измерений — её обслуживание, согласно Воздушному Кодексу РФ, проводится в соответствии с регламентами технического обслуживания конкретных типов самолётов или вертолётов, разработанными конструкторскими организациями.

Специальные средства измерений (ССИ), такие как устройства наземного контроля типа УПИВ-У, УПИВ-П, УПИВ-200, УПИВ-300 и им подобные, не внесены в государственный реестр средств измерений, поскольку проходили испытания как изделия авиационной тех-



**Рис. 8**  
Элементы эталонного ИК виброперегрузки  
(1 — усилитель заряда; 2 — вольтметр электронный)

ники совместно с типами ВС, для которых они разрабатывались. Видом метрологического обслуживания для них (вне сферы государственного регулирования), согласно Федеральному закону РФ от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ [16], является калибровка. Процедуры организации и проведения калибровки ССИ в метрологических службах предприятий ВТ описаны в [17, 18].

В методиках метрологического обслуживания, как устройств наземного контроля типа УПИВ-У, УПИВ-П, УПИВ-200, УПИВ-300 и им подобных, так и КПК-6 и НАСКД-200, установлена периодичность его проведения с интервалом один год.



# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

## Заключение

1. На основе системного подхода представлена структура направлений авиационной деятельности на воздушном транспорте, связанных с контролем и измерениями параметров вибрации и проведён её анализ; рассмотрены вопросы обеспечения единства измерений параметров вибрации.

2. В развитие ОСТ 101021 [13] специалистами метрологической службы ФГУП ГосНИИ ГА разработаны методы проведения аттестации ИК параметров вибрации стенов МИС ГТД в организациях по ремонту. Методы внедрены при проведении под руководством и при непосредственном участии автора, первичных и периодических аттестаций стенов МИС таких ГТД, как Д-30КУ, Д-30КУ-154, Д-30КП, АИ-20, АИ-24, ТВ2-117, ТВ3-117, АИ-9, РУ-19-А300, ТА-6 (6А), ТГ-12, ТГ-16 в организациях по ремонту. При проведении работ по аттестации учитываются метрологические риски [14], возникающие в авиационной деятельности на ВТ.

3. При выполнении калибровки специальных средств измерений вибрации в метрологических службах предприятий ВТ для обеспечения связи с государственной поверочной схемой [15] – помимо индивидуальных методик под каждый тип ССИ – руководствуются ведомственной калибровочной схемой для средств измерений вибрации, разработанной ФГУП ГосНИИ ГА и утверждённой Авиационной администрацией.

4. Выполняемые на ВТ измерения параметров вибрации метрологически обеспечены: поддерживается единство измерений и их прослеживаемость от государственного первичного эталона до специальных средств измерений, испытательного оборудования и бортовых средств контроля воздушных судов.



## Литература

1. ГОСТ 26382–84. Двигатели газотурбинные гражданской авиации. Допустимые уровни вибрации и общие требования к контролю вибрации.
2. ГОСТ 24346–80. Вибрация. Термины и определения.
3. Авиация. Энциклопедия. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 736 с.
4. ОСТ 102791–2010. Воздушные суда гражданской авиации. Документация по лётной эксплуатации. Общие требования.
5. ГОСТ Р 53863–2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения.
6. ГОСТ Р 55588–2013. Воздушный транспорт. Система менеджмента безопасности авиационной деятельности. Термины и определения.
7. Богоявленский А. А., Боков А. Е., Матюхин К. Е. Метрологическое обеспечение эксплуатационных испытаний наземной автоматизированной системы контроля: методология и анализ результатов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 219 (9). – С. 137–143.
8. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Аттестация программного обеспечения специальных СИ на воздушном транспорте // Мир измерений. – 2012. – № 11. – С. 14–22.
9. Устройство наземного контроля УПИВ-П. Руководство по технической эксплуатации 6Л 2.763.023 РЭ.
10. ГОСТ Р 8.568–97. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
11. О внедрении в организациях гражданской авиации государственного стандарта Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. /Распоряжение Минтранса РФ от 13.11.2000 г. № 71/р.
12. ОСТ 54–3–1572.80–2001. Отраслевая система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Порядок проведения.
13. ОСТ 101021–93. Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. Общие требования.
14. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Постановка задачи разработки методов управления метрологическими рисками негативных ситуаций в авиационной деятельности // Мир измерений. – 2013. – № 10. – С. 3–7.
15. МИ 2070–90. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений вибропеременения, виброскорости и виброускорения в диапазоне частот (3 · 10<sup>-1</sup>–2 · 10<sup>4</sup>) Гц.
16. Федеральный закон от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ “Об обеспечении единства измерений”.
17. Богоявленский А. А., Ермолаева О. Л. Об организации и проведении работ по обеспечению единства измерений на воздушном транспорте // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2012. – № 2 (313). – С. 24–29.
18. Богоявленский А. А., Ермолаева О. Л. Оценка технической компетентности калибровочных лабораторий специальных средств измерений // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2013. – № 3 (314). – С. 33–40.