

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА**

**ОСНОВЫ
ТЕНЗОМЕТРИИ
ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

САМАРА 2004

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА

**ОСНОВЫ
ТЕНЗОМЕТРИИ
ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Методические указания

САМАРА 2004

Составитель: Е.А.Панин

УДК 531.781.2:621

Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов.: Метод. указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. *Е.А.Панин*. Самара, 2004. 39 с.

Изложены основные методы и средства современной тензометрии, применяемые при создании двигателей летательных аппаратов. Определены задачи тензометрического эксперимента и его особенности.

Рассмотрены методики прямой и непрямой градуировок тензометрической измерительной аппаратуры. Уделено внимание метрологическим характеристикам и назначению различных типов тензорезисторов в зависимости от условий их использования.

Приведен статистический анализ результатов измерений.

Методические указания предназначены для студентов факультетов 2 и 3, очной и очно-заочной формам обучения по специальностям 130 200 – Авиационные двигатели и энергетические установки и 130 300 - Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей, изучающих дисциплины: «Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок», «Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок», «Конструкция и прочность авиационных двигателей».

Разработаны на кафедре «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева.

Рецензент: *Лежин С.М.*

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Основные сведения о тензометрии	6
Тензометрический эксперимент	10
Особенности тензометрического эксперимента ДЛА	13
Градуировка	18
Прямая градуировка	18
Косвенная градуировка	21
Методика проведения и обработка результатов измерений	24
Прямая градуировка	24
Косвенная градуировка	26
Содержание отчета и анализ измерений	29
Контрольные вопросы	29
Список использованных источников	30

ПРЕДИСЛОВИЕ

При создании двигателей летательных аппаратов (ДЛА) возникает необходимость в определении реальных деформаций и напряжений в деталях и элементах конструкции. Эта потребность связана с обеспечением основополагающего требования, предъявляемого к конструкции ДЛА – *прочностной надежности*. Проблема прочностной надежности занимает особое место при создании ДЛА. Она означает отсутствие отказов по причине разрушения или недопустимой деформации силовых деталей и элементов, входящих в конструкцию ДЛА.

К наиболее ответственным силовым деталям и элементам можно отнести рабочие лопатки, диски, валы, корпуса, трубопроводы, оболочки и др. Деформации и напряжения в них вызываются нагрузками различной физической природы: газовыми, инерционными, тепловыми, механическими.

В зависимости от характера изменения во времени они могут быть *статическими и динамическими*. Статистика показывает, что наиболее опасными являются динамические нагрузки.

Оценка напряженно-деформированного состояния деталей и элементов конструкции ДЛА может производиться теоретическими и экспериментальными методами.

Теоретические методы могут оказаться неэффективными из-за сложности напряженно-деформированного состояния реальных конструкций, достоверности действующих нагрузок, специфических условий работы и необоснованных упрощений расчетных схем. Например, трудно учесть такие факторы, как: концентраторы напряжений, остаточные напряжения, нестабильный характер и многокомпонентность нагружения и др.

Поэтому для нахождения действительных деформаций и напряжений в реальных условиях эксплуатации широко используется экспериментальный метод *тензометрии* [1].

Детали и элементы конструкции ДЛА, которые исследуются методом тензометрии, в дальнейшем изложении будем называть *объектами исследования*.

Метод основан на применении специального преобразователя – *тензорезистора*, который закрепляется на поверхности объекта исследования, воспринимает его относительные деформации (входной сигнал) и преобразует их в приращение электрического сопротивления. Тензорезистор относится к классу *первичных преобразователей*, так как он первым преобразовывает измеряемую величину – относительную деформацию.

Тензорезистор включается в электрическую схему *тензометрической измерительной аппаратуры*, где приращение электрического сопротивления вызывает возникновение усиленного электрического сигнала (выходной сигнал) величина которого пропорциональна относительной деформации поверхности объекта исследования.

Процедура определения относительной деформации в заданных точках или сечениях объекта исследования называется *тензометрическим экспериментом*.

С помощью специальной метрологической операции - *градуировки* тензометрической измерительной аппаратуры, находится зависимость между относительной деформацией (входным сигналом) и выходным усиленным электрическим сигналом. Эта зависимость называется *градуировочной характеристикой* тензометрической измерительной аппаратуры.

Однако, при прочностных исследованиях, чаще всего требуется определить механические напряжения объекта исследования. Например, для одноосного напряженно-деформированного состояния они легко находятся по относительной деформации, используя закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала объекта исследования;

ε - относительная деформация тензорезистора;

σ - механическое напряжение в месте закрепления тензорезистора.

Благодаря малой массе, тензорезисторы имеют незначительную тепловую и механическую инерционность, работают при воздействии на них различных сред и потоков тепла, а также в условиях широких изменений деформаций и спектров частот динамических процессов.

Современный тензометрический эксперимент требует синхронной регистрации и обработки не только относительных деформаций, но также других величин, например, сил, давлений, температуры, частот вращения, необходимых для сравнительного анализа динамических процессов. Поэтому, в настоящее время, находят применение *автоматизированные тензометрические измерительные системы*. В состав этих систем, кроме тензометрической измерительной аппаратуры, могут входить компьютеры с различными внешними устройствами и программными аналоговыми и цифровыми средствами, регистраторы, спектроанализаторы, обеспечивающие сбор, регистрацию, сохранение, обработку и анализ измеряемой информации.

Цель работы – ознакомление с физическими основами тензометрии, овладение навыками самостоятельного проведения тензометрического эксперимента, проведение градуировки тензометрической измерительной аппаратуры при динамических процессах.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕНЗОМЕТРИИ

Тензометрия – это способ экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния объектов исследования при статических и динамических процессах.

Тензорезисторы являются первичными преобразователями тензометрических измерительных систем, и представляют собой измерительное средство, позволяющее регистрировать весьма малые деформации. Главной функцией тензорезисторов является преобразование входного сигнала - деформации в выходной сигнал – приращение электрического сопротивления. Эта особенность тензорезисторов основана на свойстве проводников менять свое электрическое сопротивление при упругих деформациях растяжения и сжатия. Изменение сопротивления является следствием изменения геометрических размеров и удельного сопротивления материала проводника, используемого в качестве чувствительного элемента тензорезисторов.

Для выполнения своих функций чувствительные элементы тензорезисторов должны, по возможности, иметь:

- высокую *тензочувствительность*, т.е. высокое отношение приращения электрического сопротивления к изменению геометрических размеров при деформациях растяжения и сжатия;
- повышенное удельное электрическое сопротивление;
- низкий температурный коэффициент сопротивления;
- широкий диапазон линейной зависимости между относительной деформацией и приращением электрического сопротивления;
- химическую и физическую стойкость при внешних воздействиях;
- статическую и динамическую прочность.

В связи с разнообразием решаемых задач и условий измерений существует несколько видов тензорезисторов, различных по форме, характеристикам и назначению. Например, тензорезисторы классифицируют по виду чувствительного элемента на *проволочные, фольговые и полупроводниковые*.

Проволочные тензорезисторы (рис. 1) содержат *чувствительный элемент 2*, выполненный из тонкой калиброванной проволоки в виде плоской зигзагообразной *решетки*, к концам *3* которой припаиваются или

привариваются выводные проводники 4. Решетка помещается внутри *основы* 1, состоящей из слоев специальной бумаги или полимерной пленки.

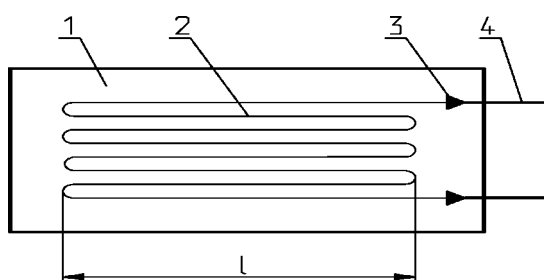


Рис.1. Проволочный тензорезистор: 1 – основа; 2 – чувствительный элемент; 3 – место пайки (сварки); 4 – выводные проводники

Основа удерживает на себе чувствительный элемент и электрически изолирует его от поверхности исследуемой детали.

Фольговые тензорезисторы имеют *чувствительный элемент* в виде тонких полосок фольги различной формы, выполненный методом фотолитографии, прикрепленных на основу - полимерную пленку или специальную бумагу.

Фольговые тензорезисторы имеют увеличенное сцепление с поверхностью детали, что повышает их теплопередачу в деталь. Это дает возможность увеличить ток и напряжение питания тензорезистора без существенного перегрева, вследствие чего растет его тензочувствительность.

Для увеличения точности измерений сложных напряженно-деформированных состояний объектов исследования чувствительные элементы фольговых и проволочных тензорезисторов изготавливают *многоэлементными* в виде *розеток*. Розетки могут иметь разнообразную форму. Пример многоэлементной фольговой розетки приведен на рисунке 2. На общей основе размещаются несколько чувствительных элементов, ориентированных под определенными углами друг к другу. По трем замеренным деформациям могут быть без труда определены как величины, так и направления главных осей и главных напряжений.

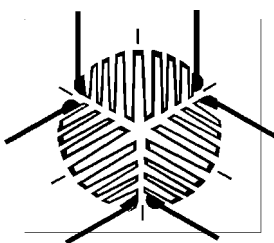


Рис.2. Тензорезистор фольговый: многоэлементная розетка

Полупроводниковые тензорезисторы (рис. 3) изготавливают в основном из монокристаллов германия и кремния, толщина которых колеблется от 20 до 50 мкм.

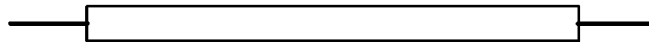


Рис.3. Полупроводниковый тензорезистор

Особенностью этих тензорезисторов является их высокая тензочувствительность, превышающая на порядки тензочувствительность проволочных и фольговых тензорезисторов. Они имеют широкий диапазон электрических и механических параметров, выдерживают температуру до 400...500 °С.

К существенным недостаткам полупроводниковых тензорезисторов можно отнести их пониженную механическую прочность, хрупкость, чувствительность к внешним воздействиям и значительный разброс *метеорологических характеристик*.

Метеорологическими характеристиками тензорезисторов являются:

База l – длина активной части чувствительного элемента (см. рис. 1). Проволочные и фольговые тензорезисторы имеют базы от 1 до 10 мм. Поскольку тензорезисторы фиксируют среднюю деформацию на поверхности, занятой чувствительным элементом, то для уменьшения погрешности измерения при больших градиентах деформаций желательно использовать тензорезисторы с малой базой.

Электрическое сопротивление R – значение активного номинального сопротивления тензорезистора до деформации. Оно должно быть высоким, не менее 50...200 Ом.

Коэффициент тензочувствительности S – отношение относительного приращения электрического сопротивления $\Delta R/R$ к относительной деформации ε тензорезистора в направлении его продольной оси (базы):

$$S = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}, \quad (2)$$

где ΔR – абсолютное приращение электрического сопротивления, обусловленное относительной деформацией тензорезистора

$$\varepsilon = \Delta l/l,$$

где Δl – абсолютное приращение базы.

Значения коэффициентов тензочувствительности могут меняться от температуры. Это изменение зависит от материала чувствительного элемента.

Поперечная тензочувствительность – измеряется в направлении поперечной оси тензорезистора. Обычно она мала, достигает 2% от продольной тензочувствительности и вносит незначительную погрешность в измерениях.

Предельно допустимая деформация – наибольшее значение относительной деформации, при которой сохраняется линейная зависимость между измеренной и действительной деформациями, или происходит обрыв электрической цепи. Величина предельно допустимой относительной деформации зависит от многих факторов, например, от материала чувствительного элемента, материала основы, типа крепления, влажности и

температуры среды, конструктивных особенностей тензорезистора и составляет, примерно, величину 0,004.

Наряду с основными метрологическими характеристиками тензорезисторов не менее важными являются и такие характеристики, которые определяют области возможного их использования в реальных условиях эксплуатации.

К этим характеристикам можно отнести:

Ползучесть – характеризуемую уменьшением воспринимаемой тензорезистором относительной деформации в зависимости от времени и температуры. Как правило, явление ползучести связано с несовершенством способа крепления тензорезистора к объекту исследования.

Усталостную прочность – измеряемую количеством циклов знакопеременной деформации заданной амплитуды;

Влагостойкость – определяемую временем, в течение которого коэффициент тензочувствительности или электрическое сопротивление изоляции, находящегося в среде с высокой влажностью (95%) тензорезистора, не превышает допустимых пределов;

Гистерезис – характеризуемый разностью относительного приращения электрического сопротивления тензорезистора за цикл нагружения (нагрузка – разгрузка).

На основные метрологические характеристики тензорезисторов установлен ГОСТ.

Выбор тензорезисторов осуществляется с учетом целей тензометрического эксперимента, условий работы, диапазона температур, предполагаемого напряженно-деформированного состояния, уровня

измеряемых деформаций, частоты и длительности испытаний.

Ориентация тензорезисторов на поверхности объекта исследования должна быть такой, чтобы *их продольная ось совпала с направлением измеряемой деформации*. В зависимости от вида напряженно-деформированного состояния объекта исследования на его поверхности может закрепляться определенное число тензорезисторов или розеток с заданной ориентацией. Это дает возможность по совокупности показаний относительных деформаций тензорезисторов или розеток расчетным путем найти *главные оси и главные напряжения*. Основные соотношения, по которым они вычисляются, приводятся в справочной литературе, например, их можно найти в книге А.Н.Серьезнова [1] или справочнике [2].

Монтаж и закрепление тензорезисторов на объекте исследования определяется условиями работы и диапазоном рабочей температуры и может осуществляться приклеиванием, цементированием или привариванием.

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Тензометрический эксперимент является одним из практических методов опытного определения действительных деформаций и напряжений объекта исследования. Процедура определения полей действительных деформаций и напряжений в заданных точках или сечениях объекта исследования называется *тензометрическим экспериментом*.

С помощью этого метода исследуется напряженно-деформированное состояние как сложных, так и простых объектов, имеющее целью определить, подтвердить, уточнить величину и характер распределения деформаций и напряжений в различных условиях и заданных режимах.

Алгоритм проведения тензометрического эксперимента заключается в следующем:

- формулируется цель, определяется объект исследования;
- выясняются условия работы, оценивается напряженно-деформируемое состояние и влияния на метрологические характеристики тензорезисторов;
- создается необходимая структурная схема тензометрической измерительной системы;
- выбираются и монтируются тензорезисторы, тензометрическая измерительная аппаратура, коммуникационные линии и системы;
- проводится градуировка и контроль тензометрической измерительной аппаратуры;
- обеспечивается сбор, регистрация, сохранение, обработка и анализ информации.

Настоящие методические указания предназначены для учебных целей и не охватывают детально все этапы проведения тензометрического эксперимента.

Остановимся на основных процедурах, обеспечивающих протекание главных физических процессов при его проведении

Включение тензорезисторов в электрическую схему тензометрической измерительной аппаратуры осуществляется с помощью различных электрических *мостовых схем*. Они позволяют достаточно точно преобразовать весьма малую величину абсолютного приращения электрического сопротивления тензорезистора в электрический сигнал и усилить его.

Кроме деформации, на изменение сопротивления тензорезисторов могут влиять внешние условия, например, температура. Для устранения

температурной, погрешности измерений в мостовую цепь включают, так называемые, *компенсационные* тензорезисторы. Они находятся в одинаковых температурных условиях с рабочими тензорезисторами. На компенсационные тензорезисторы воздействует только температура, а на рабочие – измеряемая деформация и температура, поэтому, изменение температуры не приводит к изменению баланса мостовой схемы.

На погрешности измерений могут оказывать влияние соединительные провода, кабели, клеммные устройства к рабочим и компенсационным тензорезисторам, которые также необходимо учитывать при создании тензометрических измерительных систем.

Для измерения *статических* и *динамических* процессов используются различные электрические мостовые схемы включения тензорезисторов и соответствующая тензометрическая измерительная аппаратура.

В настоящих методических указаниях предлагается проводить тензометрический эксперимент с помощью учебной *многоканальной тензометрической измерительной системы*, специально предназначенной только для *динамических* процессов.

Основные сведения по тензометрическому эксперименту для *статических* процессов были изложены в лабораторном практикуме при изучении курса сопротивления материалов.

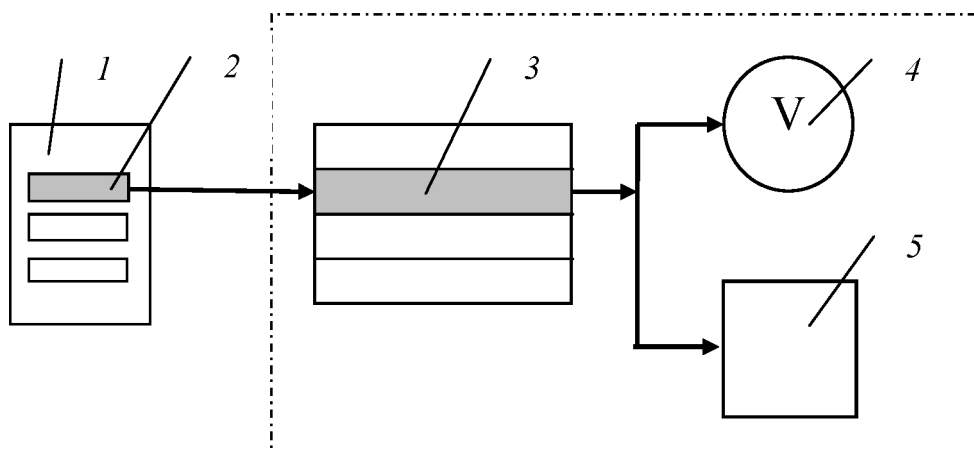


Рис. 4. Структурная схема многоканальной тензометрической измерительной системы: 1 – объект исследования; 2 – тензорезисторы; 3 – нормирующий преобразователь; 4 – вольтметр; 5 – осциллограф

Структурная схема учебной многоканальной тензометрической измерительной системы приведена на рис.4.

Она включает в себя объект исследования *1* с первичными преобразователями – тензорезисторами *2*, и тензометрическую измерительную аппаратуру (на схеме показана штрихпунктирной линией), состоящую из многоканального нормирующего преобразователя *3* и регистраторов информации – электронного вольтметра *4* и осциллографа *5*.

Нормирующий преобразователь предназначен для преобразования входных сигналов тензорезисторов при динамических процессах в стандартные сигналы *Государственной системы приборов*. Он может иметь несколько каналов, каждый из которых представляет собой аналоговое усилительное устройство, которое преобразовывает электрическое приращение сопротивления тензорезисторов в электрическое напряжение и усиливают его. На структурной схеме один из каналов нормирующего преобразователя и включенный в него рабочий тензорезистор выделены более темным фоном.

Электронный вольтметр 4 регистрирует выходной сигнал (электрическое напряжение), а осциллограф 5 служит для визуальной оценки и контроля формы динамических процессов.

В учебной многоканальной тензометрической измерительной системе применена наиболее распространенная, так называемая, *потенциометрическая схема* [4] включения тензорезисторов в тензометрическую измерительную аппаратуру. Эта схема включения для одного из каналов тензометрической измерительной аппаратуры показана на рисунке 5.

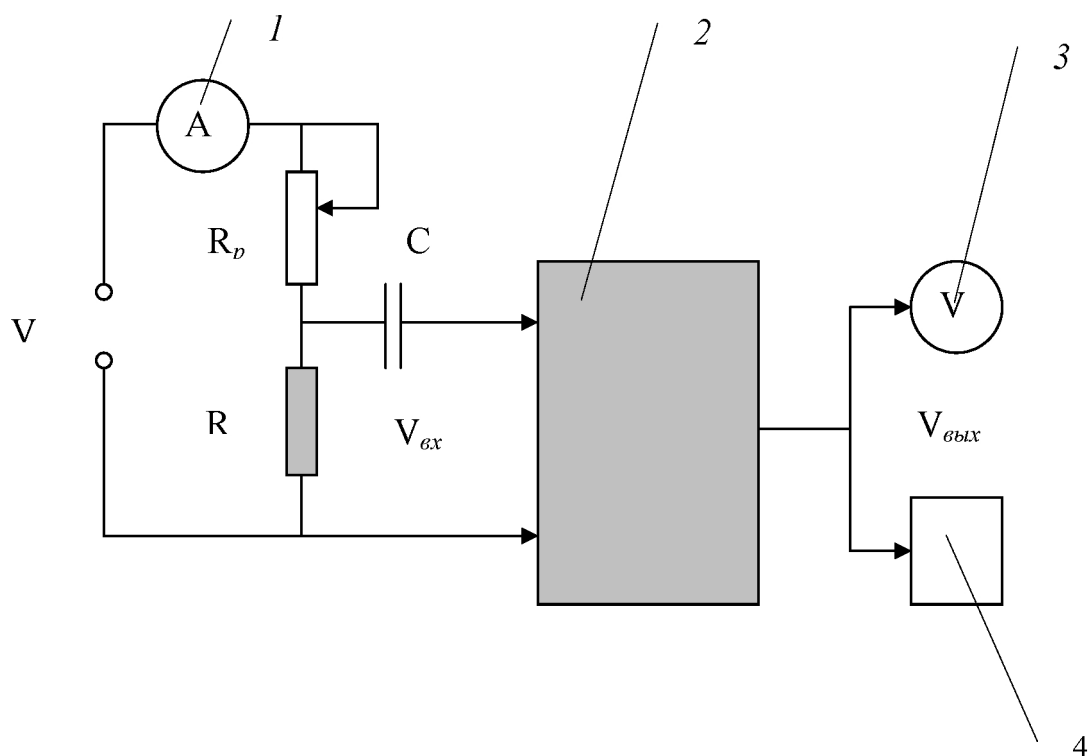


Рис. 5. Потенциометрическая схема включения тензорезистора в канал тензометрической измерительной аппаратуры: 1 – амперметр; 2 – канал нормирующего преобразователя; 3– вольтметр; 4– осциллограф

На схеме изображен рабочий тензорезистор R и последовательно соединённый с ним регулировочный резистор R_p , которые питаются от источника постоянного тока напряжением V и силой I , замеряемой амперметром 1. Тензорезистор включен в канал нормирующего преобразователя 2, выходной сигнал которого регистрируется электронным вольтметром 3 и осциллографом 4.

Такая схема включения позволяет производить измерение в широком диапазоне частот.

При динамических процессах, вследствие изменения электрического сопротивления тензорезистора, в нём возникает переменное напряжение $V_{вх}$, которое подаётся через конденсатор C на вход в канал нормирующего преобразователя тензометрической измерительной аппаратуры, где сигнал усиливается до величины $V_{вых}$. Конденсатор пропускает переменную составляющую входного сигнала и задерживает постоянную. Контроль за формой сигнала осуществляется по его изображению на экране осциллографа 4 а напряжение $V_{вых}$ замеряется вольтметром 3.

Тензометрический эксперимент проводится после всех подготовительных процедур и сводится к замеру амплитуд выходных сигналов, их обработке и анализу. Используя градуировочную характеристику тензометрической измерительной аппаратуры можно определить не только действительные деформации, но и по формуле (1) напряжения в месте закрепления тензорезисторов.

ОСОБЕННОСТИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ

Рассмотрим особенности тензометрического эксперимента на примере газотурбинных двигателей (ГТД). Эти двигатели относятся к *сложным техническим объектам*, содержат ротор (или роторы) и статор со связывающими их опорами. Силовые детали и элементы конструкции ротора (или роторов) и статора, входящие в состав структурных элементов (компрессора, турбины, камеры сгорания, входного и выходного устройств) двигателя, выполняют определенные функции и обеспечивают ему необходимую *прочностную надежность* и жесткостные характеристики, воспринимая потоки нагрузок, возникающих при его работе.

По характеру изменения по времени, нагрузки могут быть *статическими* и *динамическими*. Наибольшее количество отказов происходит по причине воздействия динамических нагрузок, и достигает 70% от всех прочностных отказов. Поэтому проблема повышения динамической прочности ГТД является наиболее важной и актуальной.

Динамические нагрузки вызываются множеством разнообразных процессов, происходящих при работе двигателя, что позволяет их классифицировать по физической природе на газовые, инерционные, тепловые, механические.

Эти нагрузки являются источниками силового и кинематического возбуждения объектов исследования ротора и статора, вызывая в них опасные резонансные колебания. У ротора чаще всего подвержены опасному воздействию динамических нагрузок рабочие лопатки компрессоров и турбин, вентиляторные лопатки, диски, валы, а у статора - оболочки, трубопроводы, направляющие аппараты компрессоров, системы подвески агрегатов и др.

Удовлетворение требованиям прочностной надежности этих объектов исследования является важнейшей составной частью общей проблемы повышения надежности ГТД. Известно, что *надежность обеспечивается на*

всех стадиях жизненного цикла ДЛА. Согласно высказыванию академика Н.Д.Кузнецова: «Надежность машин закладывается на стадии проектирования, обеспечивается в процессе производства, достигается при экспериментальной отработке (доводке), совершенствуется и реализуется при эксплуатации».

Наибольший объем исследований приходится на стадию экспериментальной отработки. На этой стадии проверяется заложенная при проектировании прочностная надежность, и выявляются неудачные конструктивные и технологические решения.

Процесс экспериментальной отработки осуществляется путем специальных исследовательских, сравнительных, натурных, контрольных, стендовых и летных испытаний опытных и серийных образцов двигателей. Одним из современных методов экспериментальной отработки, позволяющим сократить ее сроки и стоимость, является *поузловая доводка*. Она заключается в раздельной, на специальных стендах, экспериментальной отработке структурных элементов и деталей ГТД.

Необходимый уровень прочностной надежности определяется *конструкционной прочностью* силовых деталей и элементов ДЛА, под которой понимается прочность в реальных условиях эксплуатации с учетом геометрических, технологических, металлургических и конструктивных факторов. Основным критерием прочностной надежности служит *запас прочности*.

При динамических процессах обычно имеют дело с запасом прочности *по переменным напряжениям (запасом усталостной прочности)*. Определяется он по-разному, в зависимости от характера нагружения и асимметрии цикла. Для простого симметричного нагружения, например, он находится из соотношения:

$$k = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\max}}, \quad (3)$$

где σ_{-1} - предел выносливости при симметричном цикле, под которым понимается наибольшее переменное напряжение, которое может выдержать материал объекта исследования без разрушения от усталости при определенном числе циклов и заданной температуре; σ_{\max} - амплитуда наибольших действующих напряжений объекта исследования.

Определение запасов прочности по переменным напряжениям осуществляется путем специальных вибрационных испытаний и является трудоемкой и сложной задачей. Это связано с тем, что необходимо с требуемой точностью иметь данные о числителе и знаменателе выражения (3), которые окончательно оцениваются только при проведении тензометрического эксперимента. Причем, эти напряжения существенно меняются в зависимости от режимов работы и условий эксплуатации двигателя. Учет этих факторов увеличивает трудоемкость и значительно усложняет тензометрический эксперимент.

Выбор запасов по переменным напряжениям обеспечивает прочностную надежность объектов исследования и строго оговаривается *нормами прочности*.

Оценка запасов прочности по переменным напряжениям, относится к главной особенности тензометрического эксперимента.

В тех случаях, когда замеренные запасы прочности по переменным напряжениям не удовлетворяют нормам, проводят исследования по повышению предела выносливости и снижению амплитуд наибольших действующих напряжений объекта исследования. Совокупность методов и средств уменьшения вибрационных напряжений и деформаций, воспринимаемых защищаемыми объектами исследования, называют *вибрационной защитой*. Для этого разработано достаточное количество конструктивных и технологических методов и средств. Эти методы и средства применяются комплексно и представляют собой сложные технические разработки и исследования, требующие большого объема проведения тензометрических экспериментов.

Например, одним из детерминированных средств вибрационной защиты является *конструкционное демпфирование*. В настоящее время оно успешно развивается и применяется для снижения максимальных резонансных напряжений объектов исследования ротора (роторов) и статора – лопаток, трубопроводов, роторов, оболочек и систем подвески агрегатов.

Вибрационная защита средствами конструкционного демпфирования – это важная особенность, которая может быть решена только с использованием тензометрического эксперимента.

Наибольший объем проводимых на двигателе тензометрических экспериментов приходится на рабочие лопатки компрессоров и турбин. Это связано с их конструкцией, интенсивностью внешних переменных нагрузок и многочисленностью.

Лопатка представляет собой упруго-массовую колебательную систему с распределенными по длине параметрами, и под воздействием различных источников возбуждения имеет в рабочем диапазоне частот вращения ротора плотный спектр резонансов.

Ввиду отсутствия достоверных методов расчетного определения напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток, тензометрический эксперимент является определяющим в оценке их прочностной надежности.

Для нахождения запасов прочности (3) необходимо с помощью тензометрического эксперимента определить величины σ_{-1} и σ_{\max} для различных собственных форм в опасных сечениях лопатки в диапазоне генерируемых двигателем частот возбуждения. Например, для построения только одной *кривой усталости* лопатки требуется от 10 до 50 и более образцов этих лопаток, при базе испытаний до 10^8 циклов. Число лопаток для определения предела выносливости может быть увеличено в зависимости от методов испытаний, которые позволяют применить статистическую обработку результатов и получить вероятностные уточненные данные. При необходимости установления количественной зависимости характеристик выносливости от различных технологических, конструктивных или эксплуатационных факторов объем испытаний значительно вырастает!

Исследования *вибрационных характеристик* лопаток проводятся на специальных экспериментальных стендах. В зависимости от целей исследования и возможности возбуждения с необходимой амплитудой напряжений, источниками возбуждения лопаток на стенде могут быть *электродинамический* или *воздушный* вибраторы, *пьезоэлектрический* преобразователь. Собственные формы и частоты исследуются методом *голографической интерферометрии* или *с помощью песчаных фигур*.

Построением *частотных* и *резонансных* диаграмм лопаток определяются опасные гармоники возбуждения и резонансы в рабочем диапазоне частот вращения ротора.

Распределение напряжений по перу лопатки для различных форм колебаний осуществляется с помощью тензометрического эксперимента. Тензорезисторы монтируются и закрепляются в опасных точках: вдоль входной и выходной кромок со стороны корытца, а также в местах максимальной толщины профиля и на торце пера со стороны спинки.

Кроме того, если учитывать асимметрию цикла нагружения за счет статической составляющей от действия центробежных и газовых сил, повышенную температуру, особенности конструкции и технологии изготовления, то тензометрический эксперимент превращается в сложную научно-техническую проблему. Число тензорезисторов на этих объектах исчисляется тысячами.

Вибрационные характеристики лопаток обычно находятся в диапазоне частот от 100 до 15000 Гц. В настоящее время чаще всего используются фольговые тензорезисторы с базой 3 или 5 мм., благодаря их удовлетворительным метрологическим характеристикам и малой стоимости.

К важной особенности тензометрического эксперимента относятся температурные условия работы тензорезисторов. Объекты исследования могут находиться в «холодных», «умеренных» и «горячих» зонах. В зависимости от диапазона рабочей температуры, условно можно разделить тензорезисторы на три группы: тензорезисторы, способные работать при температуре до 200 °С, от 200 до 600 °С и от 600 до 950 °С.

Для нормальных температур при изготовлении чувствительных элементов наиболее часто применяют медно-никелевые сплавы (КОНСТАНТАН - 60% меди и 40% никеля), а при повышенных температурах – хромоникелевые сплавы (НИХРОМ - 80% никеля и 20% хрома) или никель-молибденовые сплавы (НМ23ХЮ-ВИ).

От температуры зависит и способ крепления тензорезистора к объекту исследования. Например, при температуре от – 50 до + 70 °С применяют клеи БФ-2 и циакрин. При температуре до 200 °С - клеи на основе фенолформальдегидной смолы. Для высокотемпературных тензорезисторов специальные клеи и цементы (до 600 °С) или точечную контактную сварку (до 950 °С).

Привариваемые тензорезисторы имеют металлическую основу и термостойкие провода, которые свариваются лазерной микросваркой. Точность измерений этих тензорезисторов ниже фольговых и проволочных.

От воздействия окружающей среды (агрессивный газ, топливо, масло и

т.д.) тензорезисторы защищают с помощью специальных устройств.

Коммуникационные провода и кабели подбираются в зависимости от условий тензометрического эксперимента, сложности трассы и ее длины.

Существенным дополнением ко всем особенностям тензометрического эксперимента ГТД является то, что он должен проводиться во *всем диапазоне частот вращения ротора (роторов)* от малого газа до максимального режима, а регистрация деформаций и напряжений должна вестись *непрерывно*.

Другой особенностью обычно считают сложность передачи электрического сигнала от тензорезисторов, закрепленных на роторных объектах исследования, к тензометрической измерительной аппаратуре. Проблема заключается в том, что сигналы очень малы, и должны передаваться без существенных помех. Для этой цели используют специальные *токоъемники*. Задача значительно усложняется в многовальных двигателях с многокаскадными компрессорами и турбинами.

В настоящее время известны *контактные* (торцевые ртутные и щеточные) и *бесконтактные* токоъемники. Контактные токоъемники чувствительны к помехам, имеют ограниченную частоту вращения ротора и обладают небольшим ресурсом, однако, доступны и широко применяются. Бесконтактные токоъемники сложные и имеют высокую себестоимость. Например, на двигателе НК-93 применена бесконтактная передача сигнала с помощью инфракрасного излучения от лопаток двухкаскадного винтовентилятора, вращающегося в противоположные стороны.

Рассмотренные особенности тензометрического эксперимента обуславливают, в зависимости от целей и задач исследований, разработку и применение специальных структурных схем многоканальных автоматизированных тензометрических измерительных систем. Эти системы должны функционировать на базе производительных компьютеров и иметь соответствующее программное обеспечение.

В составе аппаратной части автоматизированных тензометрических измерительных систем, например, должно входить электронное оборудование для ввода и вывода аналоговых и цифровых сигналов, поступающих от многоканального нормирующего преобразователя измерительной тензометрической аппаратуры.

Система должна обеспечивать сбор и регистрацию измерений в реальном масштабе времени непрерывно с одновременной архивацией и визуализацией экспериментальных данных для просмотра, хранения и анализа результатов. Вся первичная информация должна быть оцифрована, проходить математическую обработку измеряемых деформаций и сохраняться в формате базы данных и быть доступной для последующей обработки и анализа. Использование современных компьютерных технологий и программного обеспечения гарантирует качественное проведение тензометрического эксперимента в кратчайшие сроки.

Градуировка измерительных каналов является одной из важных процедур, которая обеспечивает достоверность и точность проводимых измерений.

ГРАДУИРОВКА

Перед проведением измерений проводится *градуировка* тензометрической измерительной аппаратуры.

Градуировкой *тензометрической измерительной аппаратуры* называется процедура нахождения **градуировочной характеристики** - зависимости измеряемой амплитуды относительной деформации от амплитуды выходного электрического сигнала при различных частотах динамических процессов.

Частотная зависимость выходного сигнала является особенностью градуировки. Она характеризуется *динамическим диапазоном измерений* - диапазоном частот динамических процессов, при которых динамическая градуировка представляется линейной зависимостью.

Обсудим два вида динамической градуировки тензометрической аппаратуры – *прямую и косвенную*.

ПРЯМАЯ ГРАДУИРОВКА

Прямая градуировка по своей сути сводится к двум процедурам: проведению собственно тензометрического эксперимента специального объекта исследования - градуировочного устройства, и теоретическому определению измеряемых деформаций.

В настоящих методических указаниях для проведения градуировки многоканальной тензометрической измерительной системы в качестве объекта исследования используется *камертонное градуировочное устройство*. Название «камертонное» оно получило от прибора, служащего эталоном высоты звука при настройке музыкальных инструментов и в пении.

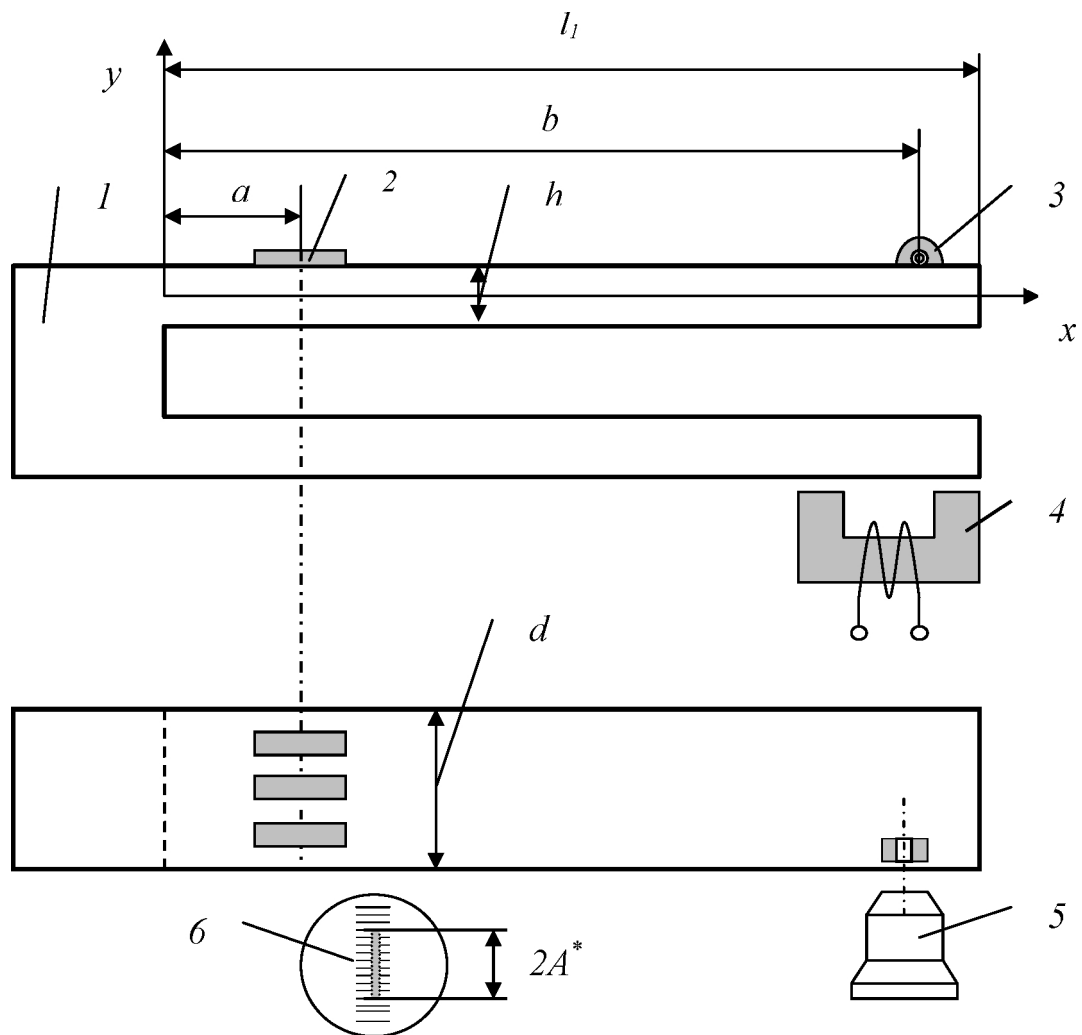


Рис.6. Камертонное градуировочное устройство: 1 – камертон; 2 – тензорезистор; 3 – риска; 4 – электромагнитный вибратор; 5 – микроскоп; 6 – шкала окуляра микроскопа

Схема камертонного градуировочного устройства приведена на рисунке 6.

Оно состоит из упругого колебательного элемента в виде камертона 1 и электромагнитного вибратора 4, с помощью которого происходит возбуждение изгибных автоколебаний первой собственной формы двух ножек камертона с фиксированной частотой.

На расстоянии a от заделки на поверхность ножки камертона закрепляются исследуемые тензорезисторы 2. Они включаются в электрическую схему тензометрической измерительной аппаратуры. Их относительная деформация определяется расчетным путем по величине амплитуды колебаний ножки камертона.

Амплитуда колебаний измеряется визуально с помощью микроскопа по риске 3, расположенной на расстоянии b от заделки. Риска представляет собой отверстие небольшого диаметра в тонкой пластине, закрепленной на ножке камертона, освещаемое встречным пучком света от электрической лампочки.

Достоинством прямой градуировки является то, что тензометрическая измерительная аппаратура градуируется совместно с тензорезисторами, поэтому возникающие погрешности измерений связаны только с погрешностью метрологических характеристик используемых тензорезисторов.

Теоретическое определение относительной деформации в месте закрепления тензорезисторов осуществляется по величине амплитуды перемещений (прогиба) упругой линии ножки камертона. Для этого необходимо решить задачу о свободных изгибных колебаниях консольного стержня постоянного сечения. Эта задача решена многими авторами, например, Бабаковым И.М. [3]. Воспользуемся готовым решением дифференциального уравнения свободных колебаний стержней:

$$y = B \left[U(kx) - \frac{S(kl_1)}{T(kl_1)} V(kx) \right], \quad (4)$$

где x, y – система прямоугольных координат;

$$k^4 = 4\pi^2 m f^2 / EJ;$$

f – собственная частота первой изгибной формы колебаний;

m – масса единицы длины ножки камертона;

J – момент инерции сечения ножки камертона;

l_1 – длина ножки камертона;

функции *А.Н.Крылова*, представляющие собой комбинацию тригонометрических функций [3]:

$$S(kl_1) = \frac{1}{2} (\cos kl_1 + ch kl_1), \quad T(kl_1) = \frac{1}{2} (\sin kl_1 + sh kl_1),$$

$$U(kl) = \frac{1}{2} (ch kx - \cos kx), \quad V(kx) = \frac{1}{2} (sh kx - \sin kx);$$

B – постоянная интегрирования, определяющая масштаб колебаний.

Из решения дифференциального уравнения (4), можно найти связь между амплитудами колебаний в сечениях a и b и определить относительную деформацию ε в месте закрепления тензорезисторов (сечение a) в зависимости от амплитуды A колебаний ножки камертона (сечение b):

$$\varepsilon = 2Ah \frac{(kl_1)^2 \theta_\alpha}{(2l_1)^2 \theta_\beta}, \quad (5)$$

где h – толщина ножки камертона;

$kl_1 = 1,875$ – частотный коэффициент, соответствующий первой форме изгибных колебаний камертона;

$$\theta_\alpha = S(ka) - \frac{S(kl_1)}{T(kl_1)} T(ka); \quad \theta_\beta = U(kb) - \frac{S(kl_1)}{T(kl_1)} V(kb). \quad (6)$$

Безразмерные величины Q_a, Q_b меняют свои значения в зависимости от места закрепления a тензорезисторов и расположения b риски, их удобно находить по графикам на рисунке 7.

Посредством изменения возбуждения камертонного градуировочного устройства задается ряд различных значений амплитуды A^* , по которым по формуле (5) рассчитываются величины относительных деформаций. Одновременно, для выбранных значений амплитуд ε , замеряются

соответствующие показания выходного сигнала – электрического напряжения $V_{\text{вых}}$.

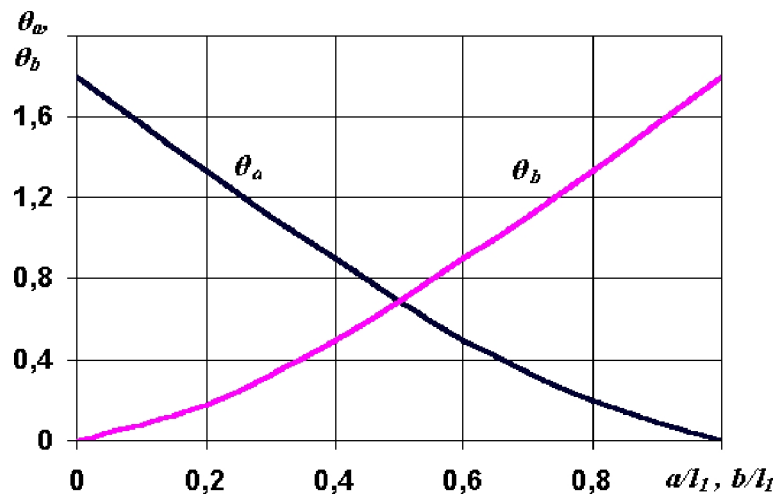


Рис.7. Графики зависимости Q_a, Q_b

Градуировочная характеристика представляется в виде линейной зависимости:

$$\varepsilon = \beta V_{\text{вых}}, \quad (7)$$

где β – искомый коэффициент пропорциональности при прямой градуировке.

КОСВЕННАЯ ГРАДУИРОВКА

Косвенная градуировка многоканальной тензометрической измерительной системы производится путем нахождения и анализа *функциональной* зависимости между амплитудой относительной деформации и величиной выходного электрического сигнала в динамическом диапазоне измерений. Вид этой функциональной зависимости определяется типом мостовой электрической схемы, в которую включены тензорезисторы, параметрами тензометрической измерительной аппаратуры и метрологическими характеристиками тензорезисторов.

Найдём функциональную связь между входным сигналом – относительной деформацией ε и величиной выходного сигнала – напряжением $V_{\text{вых}}$.

Из рассмотрения потенциметрической схемы (см. рис.5.), согласно закону Ома, можно записать:

$$V = I(R + R_p); \quad (8)$$

$$V_{\text{ex}} = IR, \quad (9)$$

где V_{ex} – падение постоянного напряжения в цепи тензорезистора;
 I – сила тока в цепи.

Из полученных выражений (8), (9) получим

$$V_{ex} = \frac{RV}{R + R_p}. \quad (10)$$

При динамических процессах можно считать R , R_p независимыми переменными, а V_{ex} – зависимой переменной, поэтому ее дифференциал:

$$dV_{ex} = V \left(\frac{dR}{R} - \frac{dR_p}{R_p} \right) \frac{RR_p}{(R + R_p)^2}. \quad (11)$$

Для конкретного измерения, в уравнении (11) от дифференциалов можно перейти к приращениям:

$$dV_{ex} \rightarrow V_{ex}; \quad dR_p = 0, \quad (R_p = const); \quad dR \rightarrow \Delta R,$$

и получить зависимость:

$$V_{ex} = \frac{I}{V} (V - IR) \Delta R. \quad (12)$$

Из выражения (2), определяющего коэффициент тензочувствительности, найдем искомую относительную деформацию ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta R / R}{S}. \quad (13)$$

Подставив в уравнение (13) приращение ΔR , выраженное из формулы (12), определим функциональную зависимость между амплитудой относительной деформации и величиной входного электрического сигнала:

$$\varepsilon = \frac{V}{SRI(V - IR)} V_{ex}. \quad (14)$$

Приведем эту зависимость в удобный для использования вид. Для этого введём понятие *коэффициента усиления* канала нормирующего преобразователя тензометрической измерительной аппаратуры. Под коэффициентом усиления q будем понимать отношение амплитуды выходного гармонического напряжения $V_{вых}$ к значению амплитуды входного гармонического напряжения V_{ex} :

$$q = \frac{V_{вых}}{V_{ex}}. \quad (15)$$

Подставив в уравнение (14) величину V_{ex} , выраженную из отношения (15), и учитывая поправку на пиковое значение напряжения, окончательно будем иметь функциональную искомую связь между относительной деформацией ε и амплитудой выходного напряжения $V_{вых}$ в динамическом диапазоне измерений. Эта зависимость и будет выражать градуировочную характеристику:

$$\varepsilon = \frac{V}{0,707qSRI(V - IR)} V_{вых}. \quad (16)$$

Ввиду того, что метрологические характеристики тензорезисторов (S , R) и параметры канала тензометрической измерительной аппаратуры (V , I) можно считать постоянными и известными величинами, то процесс проведения косвенной динамической градуировки сводится к экспериментальному нахождению коэффициента усиления в динамическом диапазоне измерений.

Определение коэффициента усиления канала нормирующего преобразователя тензометрической измерительной аппаратуры ведется согласно структурной схемы, приведенной на рис. 8.

Определение коэффициента усиления производится путём одновременного измерения амплитуд напряжений $V_{вх}$ входного гармонического сигнала, подаваемого от звукового генератора 1 на вход канала нормирующего преобразователя 3 , и выходного гармонического сигнала – напряжения $V_{вых}$. Замеряются эти напряжения двумя вольтметрами 2 и 4 .

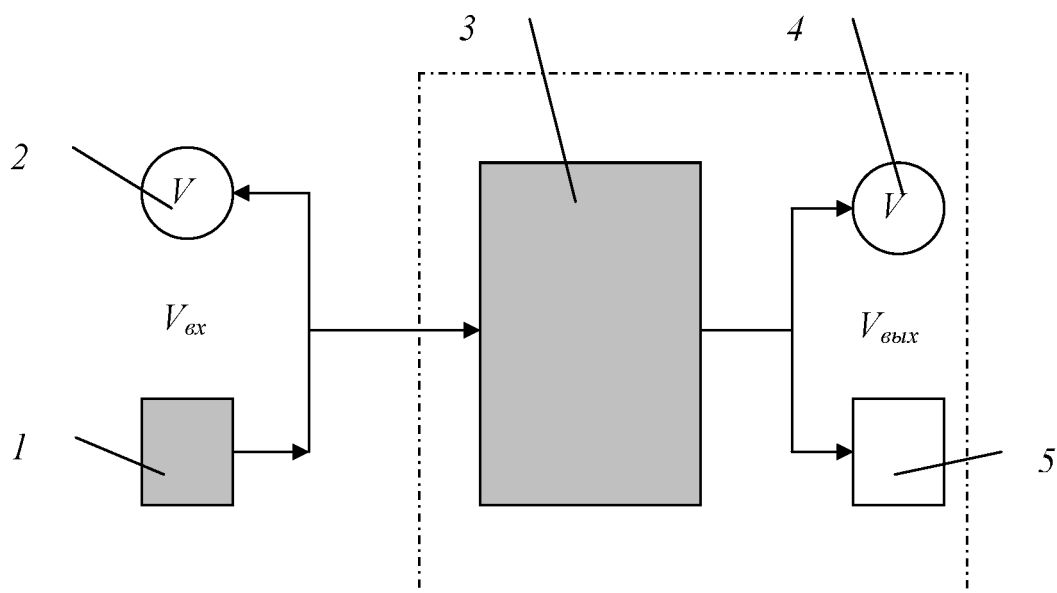


Рис.8. Структурная схема определения коэффициента усиления канала нормирующего преобразователя тензометрической измерительной аппаратуры: 1 – звуковой генератор; $2, 4$ – вольтметр; 3 – канал нормирующего преобразователя; 5 – осциллограф

Для контроля динамического диапазона измерений, при котором отсутствуют искажения формы выходных сигналов, другими словами, сохраняется синусоида, как во входном, так и в выходном сигналах, производятся измерения в предполагаемом диапазоне частот f . Обычно этот диапазон указывается в паспортных данных нормирующего преобразователя. Управление амплитудой и частотой динамического входного сигнала осуществляются звуковым генератором 1 .

Используя функциональную связь (16), метрологические характеристики тензорезисторов (S, R), параметры тензометрической измерительной аппаратуры (q, V, I), можно определить градуировочную характеристику в линейной форме (7) и экспериментально подтвердить динамический диапазон измерений.

Погрешность случайных измерений при косвенной градуировке связана с классом точности тензометрической измерительной аппаратуры и уровнем измеряемых амплитуд.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Лабораторная работа проводится на специальном экспериментальном стенде, на котором установлена необходимая аппаратура учебной тензометрической измерительной системы.

После ознакомления с физическими основами тензометрии, для овладения навыками самостоятельного проведения тензометрического эксперимента, необходимо провести градуировку тензометрической измерительной аппаратуры при динамических процессах.

Максимальная амплитуда деформаций или напряжений должна быть ограничена и не превышать величин пределов выносливости объекта исследования и исследуемого тензорезистора.

Результаты обеих градуировок сопоставить между собой и объяснить причины, если они не совпадают.

ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

1. подключить стенд к электрической сети напряжением 220 В.
2. на пульте управления стендом включить приборы: тензометрическую измерительную аппаратуру, камертонное градуировочное устройство, звуковой генератор, осциллограф и вольтметр;
3. произвести прогрев аппаратуры не менее 20 мин. перед началом эксперимента.

ПРЯМАЯ ГРАДУИРОВКА

Прямая градуировка представляет собой тензометрический эксперимент, где объектом исследований является градуировочное устройство. Процесс проведения градуировки сводится к одновременному замеру входного сигнала - деформации ε в заданных сечениях ножки камертона и выходного сигнала – амплитуды электрического напряжения $V_{\text{вых}}$.

Прямая градуировка производится в соответствии со структурной схемой многоканальной тензометрической измерительной системы, показанной

на рис.4. с применением специального камертонного градуировочного устройства, схема которого приведена на рис. 6.

На рабочую поверхность одной из ножек камертона закреплены (наклеены) исследуемые тензорезисторы. Эти тензорезисторы включаются в тензометрическую измерительную аппаратуру по потенциометрической схеме, как показано на рисунке 5.

При изгибных колебаниях камертона, ему задают необходимую амплитуду относительной деформации ε в месте закрепления тензорезисторов (входной сигнал), и измеряют соответствующее этой амплитуде электрический выходной сигнал – напряжение $V_{\text{вых}}$. Камертонное градуировочное устройство имеет фиксированную частоту колебаний 130 Гц. Производя замер различных амплитуд входного и выходного сигналов можно определить *градуировочную характеристику* в виде линейной зависимости (7).

Последовательность проведения градуировки

Градуировка проводится по указанию преподавателя для одного из каналов нормирующего преобразователя тензометрической измерительной аппаратуры.

- для выбранного канала нормирующего преобразователя тензометрической измерительной аппаратуры переключатель «*Под работы*» поставить в положение, когда один из испытуемых тензорезисторов включается в потенциометрическую схему;
- поворотом ручек грубой и точной настроек камертонного градуировочного устройства возбудить колебания ножек и, убедившись в стабильности процесса, замерить по шкале микроскопа величины размаха $2A^*$ и по шкале вольтметра выходное напряжение $V_{\text{вых}}$.

Первичные результаты измерений занести в таблицу 1, где слева направо в вертикальных графах обозначены: N° *изм.* - порядковый номер измерения (опыта); $2A^*$ *дел.* - двойная амплитуда (размах) ножки камертона; выраженная в делениях микроскопа; $V_{\text{вых}}$ - выходной сигнал в вольтах; β – коэффициент пропорциональности градуировочной характеристики (вычисляется); n – число проведенных измерений.

Таблица I
Результаты измерений при прямой градуировке

N° <i>изм.</i>	$2A^*$, <i>дел.</i>	$V_{\text{вых}}$, <i>B</i>	ε	β
1				
2				
3				
...				
<i>n</i>				

- повторить измерения не менее чем для десяти различных размахов амплитуды ножки камертона $2A^*$, используя *весь диапазон* шкалы микроскопа b (см. рис.6). Шкала микроскопа линейная. Цена деления $1,0 \frac{мм}{дел}$. Максимальное число делений шкалы микроскопа $6,5$.

- вычислить для каждого измерения величину относительной деформации ε . Для вычисления ε воспользуемся зависимостью (5), подставив в нее **основные данные камертонного градуировочного устройства**: $a=15$ мм; $b=158,5$ мм; $l_1=200$ мм; $d=20$ мм; $h=6,3$ мм; $E=2,04 \cdot 10^{-5}$ МПа. После вычислений получим связь между амплитудой относительной деформации в месте наклейки исследуемого тензорезистора и амплитудой ножки камертона в виде:

$$\varepsilon = 1,7 \cdot 2A^* \cdot 10^{-5} \quad (17)$$

Обработка результатов измерений

Завершив измерения и имея данные первичных результатов, можно путем их обработки определить градуировочную характеристику тензометрической измерительной аппаратуры.

Представим градуировочную характеристику в линейной форме (7). Среднюю величину коэффициента пропорциональности β найдем по n измерениям. Для этого воспользуемся методом *наименьших квадратов*. Он является одним из методов теории ошибок, который дает наилучшие результаты при исследованиях, подверженных только случайным ошибкам и не содержащих систематических ошибок. Согласно этому методу в качестве приближенной оценки величины β принимают такое его значение, для которого будет наименьшей сумма квадратов отклонений:

$$\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \beta V_{выхi})^2,$$

где n – число измерений; i – порядковый номер измерения.

Для нахождения наименьшего значения суммы квадратов отклонений, исследуем эту функцию на экстремум. Для этого найдем ее производную и приравняем нулю:

$$\sum_{i=1}^n 2(\varepsilon_i - \beta V_{выхi})^2 V_{выхi} = 0.$$

Решив это уравнение, окончательно найдем по n измерениям среднее взвешенное значение коэффициента пропорциональности при прямой градуировке:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i V_{выхi}}{\sum_{i=1}^n V_{выхi}^2}. \quad (18)$$

КОСВЕННАЯ ГРАДУИРОВКА

Косвенная градуировка многоканальной тензометрической измерительной системы (см. рис.4) производится путем подстановки необходимых данных в функциональную зависимость (16) амплитуды

относительной деформации и выходного электрического сигнала в динамическом диапазоне измерений. Вид этой функциональной зависимости определяет градуировочную характеристику, и найден из рассмотрения потенциометрической схемы (см. рис.5) включения рабочего тензорезистора в канал тензометрической измерительной аппаратуры.

Основными данными для расчета градуировочной характеристики являются: параметры канала тензометрической измерительной аппаратуры – коэффициент усиления q , напряжение V , сила тока I и метрологические характеристики тензорезисторов – коэффициент тензочувствительности S , электрическое сопротивление R .

Обычно все эти данные приводятся в сопроводительных документах тензометрической измерительной аппаратуры и тензорезисторов, являются постоянными величинами.

В учебных целях будем считать коэффициент усиления неизвестным. Поэтому процесс проведения косвенной градуировки сводится к экспериментальному нахождению коэффициента усиления тензометрической измерительной аппаратуры и контролю динамического диапазона измерений.

Последовательность проведения градуировки

Градуировка проводится для того же канала нормирующего преобразователя, который был выбран для проведения прямой градуировки по указанию преподавателя.

- для выбранного канала нормирующего преобразователя тензометрической измерительной аппаратуры переключатель «Под работы» поставить в положение «КС» - контрольный сигнал;
- задать ручкой «Регул. выхода» звукового генератора необходимое выходное электрическое напряжение V_{ex} . Ввиду того, что электрическое напряжение, подаваемое от звукового генератора, поступает на вход нормирующего преобразователя через встроенный в него делитель напряжений, уменьшающий его в 1000 раз, то

$$V_{\text{ex}} = \frac{V_{32}}{1000}, \quad (19)$$

где V_{32} – электрическое напряжение на выходе звукового генератора;

- измерить по шкале вольтметра 4 (см. рис.4) величины входного V_{ex} и выходного $V_{\text{вых}}$ напряжений;
- повторить измерения для нескольких (не менее пяти) амплитуд V_{ex} в диапазоне от 0,5 до 1,5 мВ, установив частоту входного сигнала $f=130$ Гц (резонансная частота камертонного градуировочного устройства);
- повторить измерения, меняя частоту f выходного сигнала в динамическом диапазоне частот от 50 до 10000 Гц (не менее 5 различных частот.) Убедитесь, что в динамическом диапазоне измерений от 50 до 10 000 Гц тензометрической измерительной аппаратуры отсутствуют искажения формы выходных сигналов

и сохраняется постоянным коэффициент усиления. Форму сигнала контролировать осциллографом 5 (см. рис.8).

- вычислить для каждого измерения величину коэффициента усиления по формуле (15);
- первичные результаты измерений занести в таблицу 2;
- после окончания эксперимента на пульте управления стендом выключить приборы: тензометрическую измерительную аппаратуру, камертонное градуировочное устройство, звуковой генератор, осциллограф и вольтметр;
- выключить стенд от электрической сети.

Таблица 2
Результаты измерений при косвенной градуировке

<i>N</i> <i>изм.</i>	<i>f</i> , <i>Гц</i>	<i>V_{вх}</i> , <i>мВ</i>	<i>V_{вых}</i> , <i>мВ</i>	<i>q</i>	<i>β</i>
1					
2					
3					
...					
<i>n</i>					

Обработка результатов измерений

Завершив измерения и имея данные первичных результатов, можно путем их обработки определить градуировочную характеристику тензометрической измерительной аппаратуры в линейной форме (7). Для этого достаточно найти среднее значение коэффициента пропорциональности β . Выразим его из формулы (16) и подставим необходимые данные:

$$\beta = \frac{V}{0,707qSRI(V - IR)}. \quad (20)$$

Величину коэффициента усиления q вычислим по n измерениям как среднеарифметическое:

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i, \quad (21)$$

где q_i – коэффициент усиления i -го измерения.

Другими постоянными величинами, входящими в формулу (20), являются: параметры канала тензометрической измерительной аппаратуры – напряжение $V = 20 \text{ В}$; сила тока $I = 40 \text{ мА}$ и метрологические характеристики тензорезисторов – коэффициент тензочувствительности $S = 2$; электрическое сопротивление $R = 450 \text{ Ом}$.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- цели лабораторной работы;
- назначение и основные понятия тензометрического эксперимента.
- структурные схемы, изображенные на рисунках 4, 5, 6, 8 с необходимыми пояснениями;
- определения прямой и косвенной градуировок;
- первичные измерения, согласно таблицам 1, 2;
- обработку, сопоставление и анализ результатов прямой и косвенной градуировок.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные цели тензометрии;
2. Что понимается под понятием «тензометрический эксперимент»?
3. По каким признакам классифицируются тензорезисторы?
4. Каковы основные метрологические характеристики тензорезисторов?
5. Что такое градуировка?
6. В чем заключаются особенности прямой и косвенной градуировок?
7. Назовите состав и назначение тензометрической измерительной аппаратуры, входящей в учебный стенд;
8. Чем характерны особенности тензометрического эксперимента ГТД?
9. Какие случайные погрешности измерений возможны при прямой, и какие при косвенной градуировках?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Серьезнов А.Н. Измерения при испытаниях авиационных конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.
2. Методы и средства натурной тензометрии: Справочник / Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Хуршудов Г.Х. – Машиностроение, 1989. – 240 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Гостехиздат, 1958. – 525 с.
4. Костин В.И., Иванов Е.М. О динамической тарировке тензометрической аппаратуры потенциметрической схемы включения датчика // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. Тр. /Кубыш. Авиаци. Ин-т. – Куйбышев, 1972. – вып. 51. – С 193-199.

Учебное издание

**ОСНОВЫ
ТЕНЗОМЕТРИИ
ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Методические указания

Составитель: *Панин Евгений Александрович*

Самарский государственный аэрокосмический университет
им. Академика С.П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Рецензия

на методические указания Е.А.Панина

«Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов»

Методические указания составлены для самостоятельного выполнения лабораторных работ по дисциплинам «Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок», «Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок», «Конструкция и прочность авиационных двигателей» студентами 2 факультета специальности 130 200 – Авиационные двигатели и энергетические установки.

Подробно рассмотрены все виды работ, связанные с содержанием, объемом, последовательностью выполнения этапов лабораторной работы, обработкой и анализом результатов. Особенностью методических указаний является стремление автора выделить наиболее важные понятия и определения и дать ясный алгоритм проведения тензометрического эксперимента.

Достаточное место уделено использованию тензометрии при создании ДЛА, позволяющее расширить кругозор и наиболее полно и глубоко проработать заданную тему.

На основании изложенного, рекомендую методические указания Е.А.Панина «Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов» к изданию.

Доцент кафедры сопротивления материалов
Лежин С.М.

Выписка
из протокола № от 2003 г. заседания кафедры
“Конструкция и проектирование двигателей
летательных аппаратов”

Присутствовали:

члены кафедры, всего 17 человек.

Слушали:

доцента Е.А.Панина о рекомендации к изданию в ИПО СГАУ рукописи методических указаний «Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов» для студентов факультета 2 специальности 130 200 – Авиационные двигатели и энергетические установки.

Постановили:

рекомендовать методические указания Е.А.Панина «Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов» к изданию в ИПО СГАУ с минимально необходимым тиражом 200 экз.

Заведующий кафедрой
С.В.Фалалеев

Сведения об авторах

Ф.И.О. - Панин Евгений Александрович.

Место работы – СГАУ.

Занимаемая должность – доцент кафедры КИПДЛА.

Ученая степень – к.т.н.

Звание - доцент.

Телефоны: рабочий – 35-72-86; домашний – 34-02-51.

Проректору по учебной работе СГАУ Ф.В.Гречникову

Служебная записка

Для эффективной организации и проведения учебного процесса, прошу издать в ИПО СГАУ рукопись методических указаний доцента кафедры КИПДЛА «Основы тензометрии двигателей летательных аппаратов» для студентов факультета 2 специальности 130 200 – Авиационные двигатели и энергетические установки.

Обоснование необходимости разработки методических указаний:

- отсутствие современного методического указания, удовлетворяющего требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования РФ и Учебного плана СГАУ 2000 г.;
- внедрение новых методических разработок;
- оптимизация трудоемкости, объема, последовательности самостоятельного изучения «Основ тензометрии двигателей летательных аппаратов» и выполнения лабораторных работ.

В соответствии с контингентом обучающихся студентов, назначить тираж 200 экз.

Источник финансирования – СГАУ.

**Зав. кафедрой КИПДЛА
С.В.Фалалеев**