

УДК 621.452.3.03:620.17

doi: 10.32620/akt.2021.4sup.2.06

С. С. КРЫГИН, Ю. И. ТОРБА

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ АГТД МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИИ

Предметом изучения в статье являются различные способы измерения напряженно деформированного состояния деталей АГТД методом тензометрии. Выявлены отличия при проведении измерений НДС роторных и статорных деталей, в различных частотных диапазонах (исследование статических, статодинамических и динамических деформаций). Обозначены способы компенсации или снижения влияния внешних факторов на результаты измерений, таких как изменение температуры и электромагнитные помехи. Целью является разработка рекомендаций при проведении исследований деталей АГТД в условиях испытательного стенда в градиенте изменяющихся температур и в сложной электромагнитной обстановке двигателя. Выполнен обзор источников неточностей, погрешностей и помех, возникающих при подготовке к испытаниям и непосредственно при измерении НДС деталей АГТД. Влияния схемы подключения, разводки кабелей, системы заземления и экранирования может не только повысить уровень погрешностей, но и могут нивелировать достоинства дорогой и крайне надежной электронной части системы. Представлены преимущества и недостатки наиболее распространенных схем подключения тензорезисторов, а также области их применения. Возможные способы компенсации мнимых деформаций при температурах вне диапазона термокомпенсации первичных преобразователей. Приведён перечень распространенных тензометрических систем с их преимуществами и недостатками, для каждого вида деталей и частотных диапазонов измерений. При тензометрировании роторных деталей для вывода сигнала от тензорезистора к регистрирующей аппаратуре применяются разнообразные токосъёмники. Также обозначена возможность применения беспроводных интерфейсов для связи первичного преобразователя и регистрирующей аппаратуры. Описанными методами являются: способы компенсации мнимых деформаций, вызванных изменением температуры исследуемой детали и соединительных проводов. Исключение или минимизация электромагнитных помех на измерительный канал. Приведена оценка суммарной погрешности измерения деформации для конкретного исследуемого объекта для конечного цикла нагружения, специфики стендового тензоизмерительного тракта, погрешностей токосъёмника в стендовых условиях и других в процессе статического тензометрирования.

Ключевые слова: измерение напряженно-деформированного состояния; тензометрирование; погрешности измерения; схемы подключения тензорезисторов.

Введение

При проектировании АГТД, для достижения необходимой прочности и обеспечения требуемого ресурса, применяются расчеты уровня напряжений в математических моделях основных деталей двигателя в местах концентрации. Для подтверждения достоверности модели и расчётов необходимо проводить верификацию математических моделей.

Сложность конструктивных форм узлов и деталей, современных АГТД, многообразие действующих нагрузок не позволяют зачастую точно определить напряженное состояние расчетным путем.

Исследования прочностных характеристик деталей и конструкций АГТД базируются на многочисленных экспериментальных измерениях НДС. Поэтому для подтверждения расчетной прочности детали наряду с теоретическими методами широко

используются экспериментальные исследования. Проведение комплексных исследований предполагает применение многоканальных измерительных систем, обеспечивающих получение экспериментальной информации.

Постановка задачи

При измерении статических деформаций деталей и конструкций АГТД в условиях изменяющихся температур на испытательном стенде (ИС) или на летательном аппарате (ЛА) возникает проблема в исключении мнимых деформаций вызванных температурным расширением соединительных проводов и ограниченным диапазоном термокомпенсации тензорезистора. Существующие тензорезисторы имеют диапазон термокомпенсации в пределах от $-196...+10$ до $80...150$ °С.

Другая проблема, часто зустрічаючися при проведенні досліджень на повнорозмерному АГТД в умовах іспитального стенда (ИС) или на летальном апараті (ЛА), состоїть в підвищеному рівні шумів зв'язаному з електромагнітною обстановкою (ЭМО) двигача, виникаючому из-за присутствия в ИС большого количества различных агрегатов и систем, необходимых для функционирования АГТД. В настоящее время из-за технических особенностей ИС, расположения испытываемого объекта и особенностей измерительной аппаратуры, она вынуждена соединяться с проверяемым объектом длинными кабелями.

Данные полученные с тензорезисторов могут оказаться недостоверными, если монтаж системы измерения выполнен без учета требований электромагнитной совместимости и правил заземления. Следствием неправильного заземления могут быть иногда появляющиеся сбои в работе системы, повышенная погрешность измерений, нестабильность измеряемых параметров, ошибки в собираемых данных.

ГОСТ 30372-95/ГОСТ Р 50397-92 дает следующее определение электромагнитной помехи: это электромагнитное явление, процесс, которые снижают или могут снизить качество функционирования технического средства. Для нормального функционирования электронных устройств необходимо обеспечивать их электромагнитную совместимость (ЭМС) измерительного канала диагностики с электромагнитной обстановкой (ЭМО) двигателя. Под электромагнитной обстановкой понимается совокупность электромагнитных процессов в заданной области пространства, частотном и временном диапазоне.

Измерительный канал является наиболее сложной частью системы диагностики и требует глубоких знаний для получения достоверных результатов измерений. Качество полученных данных зависит не только от погрешности средств измерений, вовремя выполненной поверки или калибровки, но, в большей степени, от корректности методики измерений, правильности выполнения системы заземления, экранирования и кабельной разводки. Измерительный канал системы диагностики создается на повнорозмерном двигаче в условиях іспитального стенда, что является причиной появления ошибок, наличие которых не всегда удается обнаружить.

Для получения достоверных результатов требуются знания в области метрологии, математической статистики, теории случайных процессов, теории информации и электроники. Это самостоятельные объемные области знаний, которые являются темой множества учебников и монографий. Поэтому ниже рассматриваются только наиболее важные

вопросы при проведении измерений НДС деталей АГТД.

Решение проблемы

Методы тензометрирования различают по физическим принципам, положенным в основу средств преобразования деформации - тензометров и тензометрических преобразователей. Тензометры и тензометрические преобразователи делят на механические, оптические, пневматические, струнные (акустические) и электрические. Наибольшее распространение получили методы тензометрирования, использующие электрические тензометры и преобразователи. Их действие основано на изменении параметров электрической цепи тензометра (сопротивления, емкости или индуктивности) или генерирования электрических сигналов в соответствии с измеряемой деформацией. Среди электрических тензометров - тензометры сопротивления, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические и индукционные. Наиболее массово используются тензометры сопротивления (тензорезисторы), действие которых основано на изменении сопротивления металлов или полупроводников при деформациях [2].

Электротензометрирование осуществляют с помощью комплекса средств измерений. Они включают (ГОСТ 16263-70) первичные преобразователи (тензометры), промежуточные преобразователи (электрические схемы), измерительные приборы (регистраторы) и меры.

Первичные преобразователи (тензометры) тензорезисторы различаются: материалом чувствительного элемента, материалом подложки, базой, рабочим диапазоном температур, диапазоном температурной компенсации.

Промежуточные преобразователи (электрические схемы) различают схемы подключения тензорезисторов: различные тензометрические мосты, потенциометры, делители напряжения.

Измерительные приборы и регистраторы должны обладать соответственной схемой подключения, обеспечивать необходимое питание первичного преобразователя и иметь достаточную точность измерения.

В процессе подготовки и непосредственно при проведении исследований, на достоверность результатов могут влиять следующие внешние факторы, источники погрешностей измерений НДС, представленные на рисунке 1.

Для получения достоверных результатов с минимальной погрешностью измерений, нужно учитывать все источники погрешностей.

Для исключения человеческого фактора необходимо тщательно контролировать подготовку к

исследованиям и последовательно выполнять все этапы работ.



Рис. 1. Возможные источники погрешностей

На погрешность измерительной аппаратуры могут влиять следующие факторы:

- разброс параметров тензорезисторов (в пределах допусков паспортных значений),
- нелинейность аналогового тракта,
- уровень собственных шумов,
- шумы тензорезистора и инструментального усилителя (Резистивный шум, шум напряжения, токовый шум, влияние питающего напряжения на выходной сигнал) зависят в основном от схемотехники.

Внешние факторы — это все помехи, воздействующие на кабели, датчики, и контроллеры в большинстве случаев протекают в виде тока по заземляющим проводникам, создавая вокруг них паразитное электромагнитное поле и падение напряжения помехи на проводниках. Источниками и причинами помех может быть статическое электричество, электромагнитное излучение, "шумящее" оборудование, сеть переменного тока, переключаемые сетевые нагрузки, трибоэлектричество, гальванические пары, термоэлектрический эффект, электролитические процессы, движение проводника в магнитном поле и др.

Так как уровень измеряемого сигнала с тензорезистора: при исследовании статических деформаций находится в диапазоне ± 5 мВ, а измеряемая величина динамических деформаций в диапазоне ± 1 мВ, для обеспечения достаточной точности изме-

рений (относительная погрешность не должна превышать 1% от измеряемой величины в диапазоне 0,1 мВ ... 1 мВ), суммарный уровень помех должен находится ниже 1 мкВ. При таких уровнях полезного сигнала необходимо устранять, учитывать и компенсировать все возможные источники помех.

Для снижения воздействия внешних факторов применяются следующие меры:

- минимизация длины проводников от тензорезистора до АЦП измерительной системы,
- правильное экранирование трассы,
- применение витой пары и дифференциального входа измерительной схемы,
- компенсация температурного расширения детали и тензорезистора;
- использование схемы с компенсацией сопротивления трассы.

Для авиационных двигателей тензометрирование в первую очередь используется при оценке прочностных свойств валов, лопаток, дисков, корпусов двигателя и агрегатов, трубок топливных и масляных систем.

Исследования НДС подразделяются на следующие смежные категории: статические, статодинамические и динамические (рисунок 2).

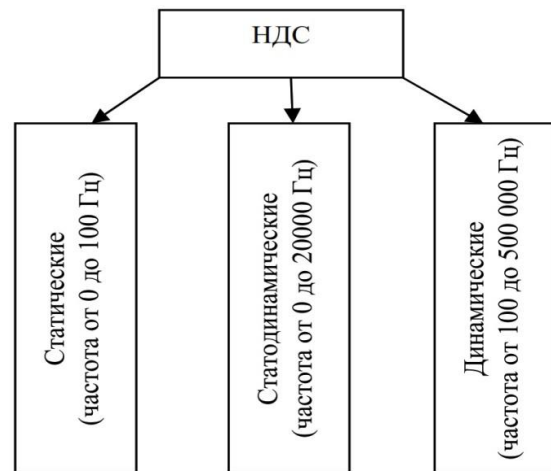


Рис. 2. Виды тензометрирования применяемые при исследовании НДС

При измерениях НДС применяются преимущественно схемы с одиночным тензорезистором, подключенным 2-х, 3-х и 4-х проводными схемами.

Для преобразования изменения сопротивления тензорезистора в сигнал напряжения используют преимущественно мостовую схему Уинстона, в которой одно плечо моста состоит из тензорезистора, а три остальные представлены компенсационными сопротивлениями измерительной системы (ИС). Для подключения тензорезистора к ИС можно использовать 2-х жильный провод (рис. 3, а) Но при изменении тем-

пературы проводов будет фиксироваться мнимая деформация, даже если фактическая деформация отсутствует. По этой причине четвертьмостовая схема с 2-х проводным подключением используется только в лаборатории при условии, что температура за время испытаний не меняется или при динамических исследованиях, где влияние температурного изменения сопротивления допускается не учитывать.

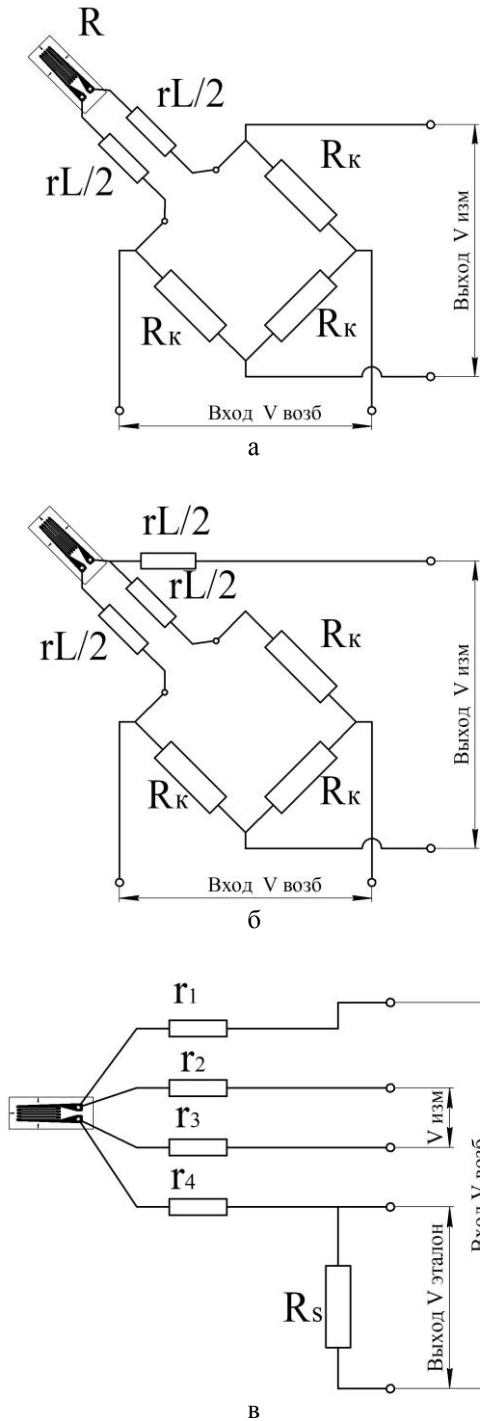


Рис. 3. Схемы подключения тензорезисторов:
 а – четвертьмостовая 2-х проводная схема,
 б – четвертьмостовая 3-х проводная схема,
 в – 4-х проводная потенциометрическая схема

Влияние сопротивления проводов на коэффициент тензочувствительности 2-х проводной схемы учитывается формулой (1):

$$K'_{2пр} = K \cdot \frac{R}{R + rL} \quad (1)$$

Четвертьмостовая схема с 3-х проводным подключением (рис. 3, б) позволяет компенсировать температурное изменение сопротивления проводов.

Корректировка коэффициента тензочувствительности 3-х проводной схемы по формуле (2):

$$K'_{3пр} = K \cdot \frac{R}{R + \frac{rL}{2}} \quad (2)$$

где $r_1 \dots r_4$ – сопротивление проводов, Ом;
 R – номинальное сопротивление тензорезистора, Ом;
 R_k – компенсационное сопротивление, Ом;
 R_s – эталонное сопротивление, Ом;
 r – суммарное сопротивление провода на метр длины;

L – длина провода, м;
 $V_{возб}$ – напряжение возбуждения, В;
 $V_{изм}$ – измеренное напряжение, мВ;
 K' – скорректированный коэффициент тензочувствительности;
 K – паспортный коэффициент тензочувствительности.

В 4-х проводной схеме измерения (рис. 3, в) деформации с одним тензорезистором применяется последовательная цепь с сопротивлением тензорезистора и эталонным сопротивлением. Деформацию определяют с помощью сравнения напряжения (V) на тензорезисторе и на эталонном сопротивлении ($V_{э}$).

Поскольку путь протекания тока и измерения напряжения различаются, на измерение не влияют ни сопротивление проводов, ни сопротивление контактов. Коэффициент тензочувствительности при 4-х проводной схеме не зависит от сопротивления проводов.

При статических исследованиях измеряются медленно протекающие процессы, от постоянного тока до 100 выборок в секунду. При таких частотах на измеряемый параметр решающее влияние имеет исходное сопротивление соединительных проводников и изменение их сопротивления во время работы от температурного расширения сигнальных проводов.

Для статических исследований применяются тензорезисторы с термокомпенсацией, диапазон которой находится в пределах от $-196 \dots +10$ до $80 \dots 150$ °С.

При температурах вне диапазона термокомпенсации применяются следующие решения:

– измерение температуры непосредственно в месте наклейки тензорезистора с компенсацией при обработке сигнала;

– применение полумостовой схемы, когда один тензорезистор установлен вдоль линии нагружения, а второй перпендикулярно с корректировкой результата;

– установка компенсирующего тензорезистора воспринимающего только мнимые деформации от влияния температуры, с последующей корректировкой данных полученных с рабочих тензорезисторов.

При динамических исследованиях роторных деталей измеряются быстро протекающие процессы с частотой измерения от 100 до 500 000 выборок в секунду. При таких частотах исходное сопротивление линии может быть скомпенсировано, а скорость изменения температуры трассы сигнальных проводов находится ниже минимальной частоты сигнала, т.е. не учитывается. Основной проблемой являются помехи и наводки в тензорезисторе и сигнальных проводах. Измеренный сигнал может содержать значительный уровень аддитивных шумов по уровню сопоставимых с полезным сигналом и часть полученных данных может быть испорчена.

При статодинамических исследованиях возникает необходимо компенсировать и температурные погрешности, и электромагнитные помехи, а также широкополосный шум тензорезистора.

В настоящее время при испытаниях НДС деталей АГТД используется крупногабаритное лабораторное оборудование, которое невозможно установить вблизи испытуемого объекта. При использовании малогабаритных универсальных мостовых тензометрических усилителей, есть возможность установки измерительной аппаратуры в непосредственной близости к объекту, а регистрирующая аппаратура с оператором может находиться на удалении.

Несмотря на это, невозможно применять (изготовить длину) слаботочную линию меньше 2-3 м. Это приводит к искажению измеряемого сигнала: повышенная шумовая полка, мнимые статические напряжения, вызванные температурным расширением проводника (при 2-х проводной схеме), изменение коэффициента тензочувствительности (при 2-х и 3-х проводной схеме), электромагнитные помехи, вызванные агрегатами АГТД.

Новым в [4] указанной расчетно-экспериментальной методике статического тензометрирования и оценки погрешности измерения деформации вращающихся дисков на переходных режимах является учет трения вращающихся дисков о воздух в условиях вакуумирования, его влияния на нагрев дисков и тензорезисторов, расчет суммарной погрешности измерения деформации для конечного цикла нагружения, специфики стендового тензоиз-

мерительного тракта, погрешностей токосъемника в стендовых условиях и других при автоматизации специального процесса статического тензометрирования с применением автоматизированной компьютерной системы.

Рабочие лопатки турбин газотурбинных двигателей (ГТД) испытывают воздействие высокоскоростных (до 600м/с) и химически агрессивных газовых потоков с температурой до 1300-1500 °С, что приводит к значительным механическим нагрузкам и эрозионным явлениям. Высокие обороты роторов вызывают предельно высокие растягивающие напряжения от центробежных сил. Так у современных малоразмерных ГТД частоты вращения турбокомпрессора (ТК) могут составлять 57000 об/мин и более.

Для исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин применяются высокотемпературные проволочные и пленочные тензорезисторы.

Созданные в Харьковском национальном аэрокосмическом университете высокотемпературные пленочные тензорезисторы (ВПТ) отличаются повышенной вибростойкостью при температуре 1000 °С.[3]

Для тензометрирования роторных деталей необходимо применять разнообразные токосъемники, которые подразделяются на несколько подгрупп:

– контактные токосъемники конструктивно очень похожи на питание якоря щеточного электродвигателя. Различия лишь в количестве контактных дорожек и материале контактов. Графитовые щетки или контакты из драгоценных металлов прижимаются к круглым дорожкам, изолированным друг от друга. Датчики подключаются обычными проводами;

– ртутные токосъемники отличаются тем, что материалом контактных площадок является ртуть.

При использовании контактных токосъемников возникает проблема присутствия электрического сопротивления контактов, которое может изменяться от температуры, от частоты вращения ротора и от механического износа контактных площадок, что вносит погрешности не только при статических исследованиях, но и вносит высокочастотные помехи в динамический сигнал.

– беспроводные токосъемники. Беспроводная передача данных позволяет избавиться от контактных токосъемников и совсем убрать лишние провода. Такое решение не уступает в скорости и передаче данных, и при этом позволяет размещать оборудование в самых труднодоступных местах. Система может питаться как при помощи постоянного тока с контактного токосъемника, так и от аккумулятора;

– малогабаритные накопительные измерительные устройства с системой сбора и записи данных, недостаток такого решения в невозможности кон-

тролировать измерения в реальном времени.

Все вышеописанные решения не исключают необходимость использования длинных сигнальных проводников.

В настоящее время распространены следующие тензометрические системы:

Для статорных деталей:

– статические измерения: МИС-300, МИС-026 модули МС-212 НПП «Мера». Частота опроса до 1200 Гц (реализована только 2-х проводная схема);

– статодинамические измерения: Модуль МХ-340 НПП «Мера». Частота опроса до 216000 Гц (реализована 2-х и 3-х проводная схема);

– НВМ МХ1615В, МХ840В. Частота опроса до 40 000 Гц (малогабаритный модуль, используется 2-х, 3-х и 4-х проводная схема);

– Динамические измерения: НВМ GN840В, GN1640В Частота опроса до 500 000 Гц (дорогостоящий, невозможно установить в непосредственной близости к объекту испытания, используется 2-х, 3-х и 4-х проводная схема).

Для роторных деталей:

– статические измерения: не существует;

– статодинамические измерения: Комплекс телеметрический многоканальный МИС-1500 НПП «Мера». Частота опроса до 105468 Гц (необходима доработка роторной и статорной части двигателя для установки, (реализована только 2-х проводная схема);

– динамические измерения: Бесконтактная телеметрическая система ТМС-БВ-8 производства НПО «Резонанс ЛТД» Частота опроса до 52000 Гц (реализована только 2-х проводная схема). Габаритные и присоединительные размеры корпуса измерительного модуля системы соответствуют размерам распространенного ртутного токосъемника типа РТ-14, что позволяет устанавливать систему на двигатель, доработанный под использование ртутного токосъемника, без дополнительной доработки двигателя.

Опыт торсиографирования большого числа судов с использованием современного оборудования в испытательном центре «Marine Technology Service»

Астраханского государственного технического университета показал необходимость применения именно беспроводных датчиков в измерительных системах на судах в связи с простотой их установки и обслуживания.

Основой датчика является микроконтроллер, содержащий в себе функции Bluetooth интерфейса, инструментальный усилитель для тензомоста, радиомодуль и антенный усилитель (рис. 4). Помимо этого, датчик содержит в себе литиево-ионную батарею.

Деформация, снимаемая с вала, тензомостом преобразуется в электрический сигнал, который усиливается дифференциальным усилителем 1 и нормируется усилителем 2 до нужного значения, фильтруется фильтром 3 и передается на аналого-цифровой преобразователь микроконтроллера, кодируется, составляется нужный протокол передачи. Далее цифровой сигнал поступает в радиомодуль, после усиливается усилителем 4 и передается на компьютер [1].

Выводы

Выполнен обзор существующих способов тензометрирования деталей АГТД. Особенности схем подключения тензорезисторов при исследовании медленно и быстро протекающих процессов. Выявлено влияние различных факторов на точность измеряемого сигнала и помехозащищенность канала в целом.

К проблеме помехозащищенности систем при проведении исследований на полноразмерном АГТД следует относиться с максимальным вниманием. Поскольку неправильный выбор схемы подключения, разводки кабелей, системы заземления и экранирования могут нивелировать достоинства дорогой и крайне надежной электронной части системы. В то же время правильное понимание описанных проблем позволит в ряде случаев достичь хороших результатов с применением относительно недорогого оборудования.

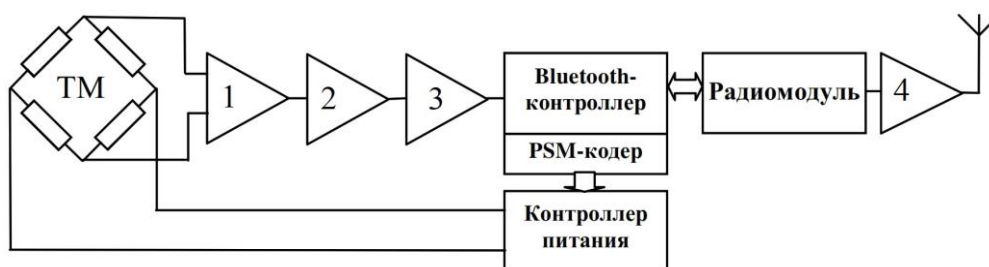


Рис. 4. Функциональная схема датчика

Література

1. Покусаев, М. Н. Тензометрирование с применением беспроводных интерфейсов [Текст] / М. Н. Покусаев, В. А. Юницкий. – Вестник АГТУ. 2007. – № 2. – С. 95-97.
2. Воробьев, С. А. Электрические измерения неэлектрических величин [Текст] : учеб. пособие / С. А. Воробьев. – Изд-во УПИ, 1975. – 231 с.
3. Гусев, Ю. А. Высокотемпературный пленочный тензорезистор [Текст] / Ю. А. Гусев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 9. – С. 23–27.
4. Лепешкин, А. Р. Методика статического тензометрирования дисков ГТД на разгонных стендах с учетом неравномерного нагрева [Текст] / А. Р. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 6. – С. 168–173.

References

1. Pokusaev, M. N., Yunitskii, V. A. *Tenzometrirovaniye s primeneniem besprovodnykh interfeisov* [Strain measurement using wireless interfaces]. *Vestnik AGTU*, 2007, no. 2, pp. 95-97.
2. Vorob'ev, S. A. *Elektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin* [Electrical measurements of non-electrical values]. *Izd-vo UPI Publ.*, 1975. 231 p.
3. Gusev, Yu. A. *Vysokotemperaturnyi plenochnyi tenzorezistor* [High temperature film strain gauge]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 9, pp. 23–27.
4. Lepeshkin, A. R. *Metodika staticheskogo tenzometrirovaniya diskov GTD na razgonnykh stendakh s uchetom neravnomernogo nagreva* [Method of static strain gauging of gas turbine engine disks on booster stands with the uneven heating] *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2003, no. 6, pp. 168–173.

Поступила в редакцію 12.07.2021, рассмотрена на редколлегии 20.08.2021

ВИМІР НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ АГТД МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРІЇ

С. С. Кригін, Ю. І. Торба

Предметом вивчення в статті є різні способи вимірювання напружено деформованого стану деталей АГТД методом тензометрії. Виявлено відмінності при проведенні вимірювань НДС роторних і статорних деталей, в різних частотних діапазонах (дослідження статичних, статодинамічних і динамічних деформацій). Позначені способи компенсації або зниження впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань, таких як зміна температури і електромагнітні перешкоди. Метою є розробка рекомендацій при проведенні досліджень деталей АГТД в умовах випробувального стенду в градієнті змінюються температур і в складній електромагнітній обстановці двигуна. Виконано огляд джерел неточностей, похибок і перешкод, що виникають при підготовці до випробувань і безпосередньо при вимірюванні НДС деталей АГТД. Впливу схеми підключення, розводки кабелів, системи заземлення та екранування може не тільки підвищити рівень похибок, але і можуть нівелювати переваги дорогою і вкрай надійної електронної частини системи. Представлені переваги і недоліки найбільш поширених схем підключення тензорезисторів, а також сфери їх застосування. Можливі способи компенсації уявних деформацій при температурах в межах дії термокомпенсації первинних перетворювачів. Наведено перелік поширених тензометричних систем з їх перевагами і недоліками, для кожного виду деталей і частотних діапазонів вимірювань. При тензометрируванні роторних деталей для виведення сигналу від тензорезистора до реєструючої апаратури застосовуються різноманітні струмознімачі. Також позначена можливість застосування бездротових інтерфейсів для зв'язку первинного перетворювача і реєструючої апаратури. Описаними методами є: способи компенсації уявних деформацій викликаних зміною температури досліджуваної деталі і сполучних проводів. Виняток або мінімізація електромагнітних завад на вимірювальний канал. Наведено оцінку сумарної похибки вимірювання деформації для конкретного досліджуваного об'єкта для кінцевого циклу навантаження, специфіки стендового тензовимірювального тракту, похибок токоз'ємника в стендових умовах і інших в процесі статичного тензометрирування.

Ключові слова: вимірювання напружено-деформованого стану; тензометрирування; похибка вимірювання; схеми підключення тензорезисторів.

MEASUREMENT OF STRESS-DEFORMED STATE OF AGTE PARTS BY TENSOMETRY METHOD

S. Krygin, Ju. Torba

The subject of study in the article is various methods of measuring the stress-strain state of AGTE parts by the tensometry method. Differences were revealed when measuring the stress-strain state of rotor and stator parts, in different frequency ranges (study of static, static-dynamic and dynamic deformations). Methods for compensating or reducing the influence of external factors on the measurement results, such as temperature changes and electromag-

netic interference, are indicated. The aim is to develop recommendations for research of AGTE parts in a test bench in a gradient of varying temperatures and in a complex electromagnetic environment of the engine. A review of the sources of inaccuracies, errors and interference arising during preparation for testing and directly during the measurement of the SDS of AGTE parts is performed. The effects of wiring, cabling, grounding and shielding can not only increase the level of errors, but can also negate the advantages of an expensive and extremely reliable electronic part of the system. The advantages and disadvantages of the most common schemes for connecting strain gages, as well as their areas of application are presented. Possible ways to compensate for imaginary deformations at temperatures outside the range of thermal compensation of primary converters. A list of common strain gauge systems with their advantages and disadvantages is given for each type of parts and frequency ranges of measurements. When strain measurement rotary parts to output the signal from the strain gauge to recording equipment used various current collector. The possibility of using wireless interfaces for communication between the primary converter and the recording equipment is also indicated. The described methods are: ways to compensate for imaginary deformations caused by changes in the temperature of the investigated part and connecting wires. Elimination or minimization of electromagnetic interference on the measuring channel. An estimate is given of the total error in measuring the deformation for a particular object under study for the final loading cycle, the specificity of the bench strain gauge path, the errors of the current collector in bench conditions, and others in the process of static strain gauging.

Keywords: measurement of the stress-strain state; strain measurement; measurement error; strain gauge connection diagrams.

Крыгин Сергей Сергеевич – ведущий инженер-исследователь, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Торба Юрий Иванович – начальник комплекса, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Sergey Krygin – leading research engineer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: sergice1984@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7139-3815.

Yuri Torba – head of the complex, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: TorbaYuI@zmdb.ua, ORCID: 0000-0001-8470-9049.