

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»

**В.А. ГРИГОРЬЕВ, С.К. БОЧКАРЕВ, А.В. ЛАПШИН,
С.А. ИЛЬИНСКИЙ**

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГТД

САМАРА 2007

УДК 627.7.018.(075)

ББК 39.55

Г 834



Инновационная образовательная программа "Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий"

Авторы: ***В.А. Григорьев, С.К. Бочкарев,
А.В. Лапшин, С.А. Ильинский***

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А.Н. Первышин
к.т.н., доц. А.А. Диденко

Г834 Автоматизация испытаний и научных исследований ГТД:
учеб. пособие / [В.А. Григорьев и др.]. - Самара:
Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - 180 с.

ISBN 5-7883-0441-0

Рассмотрена структура построения и устройство автоматизированных систем испытаний авиационных ГТД. Показан принцип работы и конструкция датчиков различного типа, устройств связи с объектом, промышленных компьютеров, которые используются в настоящее время в АСИ ГТД. В данном пособии рассмотрены также типовые операции при экспериментальных исследованиях ГТД и способы их автоматизации, современные методы обработки результатов испытаний.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям "Авиационные двигатели и энергетические установки".

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

ГЛАВА 1 Типовые операции при испытаниях ГТД

- 1.1. Подготовительно - заключительные операции
- 1.2. Испытания по заданной программе
- 1.3. Управление режимами работы двигателя
- 1.4. Отладка параметров двигателя
- 1.5. Обработка результатов испытаний и их анализ

Вопросы

ГЛАВА 2. Основные задачи АСИ ГТД.

- 2.1. Основные задачи испытаний, решаемые автоматизированной системой
- 2.2. Основные требования к АСИ ГТД
- 2.3. Типовая схема АСИ ГТД

Вопросы

ГЛАВА 3 Основные измерительные элементы АСИ ГТД.

- 3.1. Первичные преобразователи АСИ ГТД
- 3.2. Измерение температуры
- 3.3. Измерение давления
- 3.4. Датчики измерения частоты вращения
- 3.5. Датчики измерения расхода топлива
- 3.6. Датчики измерения усилий (тяги)
- 3.7. Датчики измерения крутящего момента
- 3.8. Датчики измерения зазоров, перемещений
- 3.9. Зонды для измерения пульсаций давления газовых сред

Вопросы

ГЛАВА 4. Устройства связи с объектом

- 4.1. Основные функциональные элементы модулей УСО
- 4.2. Модули УСО
- 4.3. Стандарты на УСО

Вопросы

ГЛАВА 5. ЭВМ и периферийные устройства

- 5.1 Основные характеристики ПЭВМ
- 5.2. Периферийные устройства ПЭВМ
- 5.3 Математическое обеспечение
- 5.4 Промышленные компьютеры

Вопросы

ГЛАВА 6. Особенности обработки экспериментальных данных при автоматизации испытаний.

- 6.1. Контроль качества измерений
- 6.2. Восстановление характеристик по экспериментальным данным
- 6.3. Идентификация математической модели двигателя
- 6.4. Общая процедура автоматизированной обработки и термогазодинамического анализа результатов испытаний

Вопросы

ГЛАВА 7. Автоматизация научных исследований

7.1. Классификация научных исследований

7.2. Автоматизированные системы научных исследований

7.3 Система сбора и обработки информации при испытаниях ГТД, автоматизация испытаний.

7.4 Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК)

7.5 Назначение и устройство автоматизированной системы экспресс- анализа для испытаний ТРДД АИ-25

7. 6. Измерительно-вычислительный комплекс с комплексной автоматизацией процесса испытаний ТРДД АИ-25

7.7. Процесс испытания двигателя с использованием комплексной АСИ

7.8. Структура программного обеспечения измерительно-вычислительного комплекса с полной автоматизацией процесса испытаний ТРДД АИ-25

Вопросы

Список литературы

Сокращенные наименования

АСНИ - автоматизированная система научных исследований;
АСИ – автоматизированная система испытаний;
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
АРМ – автоматизированное рабочее место;
БД – база данных;
БОС – базовая операционная система;
ВДУ – вспомогательная двигательная установка;
ВРД – воздушно-реактивные двигатели;
ВД – высокое давление;
ГТД – газотурбинный двигатель;
ИВК – измерительно-вычислительный комплекс;
МГТД – малоразмерный газотурбинный двигатель;
КНД – компрессор низкого давления;
КС – камера сгорания;
КВД – компрессор высокого давления;
ЛА – летательный аппарат;
ММ – математическая модель;
НД - низкое давление;
ОС – операционная система;
ОТД – основные технические данные;
ПДО – подсистема диалоговой обработки;
ПО – программное обеспечение;
ППП – пакет прикладных программ;
РК – рабочее колесо;
СА – силовой аппарат;
САУ – стандартные атмосферные условия;
СУБД – система управления базами данных;
ТЗ – техническое задание;
ТП – техническое приложение;
ТРДД - турбореактивный двухконтурный двигатель;
ПЗ – проектное задание;
ТК – турбокомпрессор.
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;

ВВЕДЕНИЕ

Большую роль в процессе создания ГТД имеют экспериментальные исследования на испытательных стендах. Испытания ГТД и их узлов проводят: при проведении научно-исследовательских работ (НИР), в процессе доводки новых двигателей, при серийном производстве, в эксплуатации.

Несмотря на современные методологии создания ГТД, в перспективе сводящие экспериментальные исследования к минимуму, в настоящее время их объем весьма значителен. Поэтому повышение эффективности испытаний на всех этапах жизненного цикла двигателя имеет большое значение и способствует ускорению получения новых научных результатов и внедрения их в практику. Основным направлением повышения эффективности испытаний ГТД является их автоматизация и применение автоматизированных систем испытаний ГТД (АСИ ГТД). При этом сокращается время и трудоёмкость проведения испытания и обработки его результатов, повышается информативность испытания и достоверность получаемых результатов.

В конечном итоге это способствует сокращению сроков создания двигателей, снижению материальных затрат на их разработку и производство, повышению качества и надёжности двигателей.

В настоящее время автоматизированные системы научных исследований применительно к испытаниям ГТД имеются на всех двигателестроительных предприятиях и в НИИ.

Основой современных АСИ ГТД являются измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), в свою очередь основой ИВК являются ЭВМ и программное обеспечение.

ИВК являются сложными объектами. Их созданием занимаются специалисты различных отраслей, естественно, включая инженеров - механиков по авиационным двигателям и энергетическим установкам.

В пособии подробно рассмотрены датчики различного типа, устройства связи с объектом, промышленные компьютеры, которые используются в настоящее время в АСИ ГТД.

В данном пособии рассмотрены также типовые операции при экспериментальных исследованиях ГТД и способы их автоматизации, принципы построения АСИ ГТД и принцип работы таких систем, современные методы обработки результатов испытаний, показаны способы и приемы эффективного использования АСИ ГТД на примере учебного экспериментального стенда для испытаний ТРДД АИ-25.

Дано описание и структура программного обеспечения измерительно – вычислительного комплекса с полной автоматизацией процесса испытаний ТРДД АИ-25.

ГЛАВА 1. ТИПОВЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГТД

В различных видах испытаний ГТД можно выделить следующие повторяющиеся операции:

1. Подготовительно-заключительные операции.
2. Испытания по заданной программе.
3. Отладка параметров двигателя в пределах технических норм и требований.
4. Обработка результатов эксперимента и их анализ.

Повышение требований к надежности ГТД приводит к необходимости организовывать дополнительно к системе стендовых испытаний систему постоянного контроля за состоянием двигателей в эксплуатации на протяжении всего ресурса.

Этот контроль обеспечивается наличием на летательных аппаратах многоканальной системы регистрации параметров (МСРП), а на наземных станциях (ГПА, ГТЭ) – многоканальных систем контроля и управления (МСКУ).

Схема технологического процесса проведения испытания представлена на [рис.1.1](#).

Трудоемкость отдельных операций технологического цикла для одного вида испытаний различна. Отличается она и для различных видов испытаний. Доля трудоемкости различных видов испытаний в процентах от общей трудоемкости приведена в [табл.1.1](#).

Каждая из перечисленных операций может быть автоматизирована. Целесообразность и глубина автоматизации той или иной операции зависит от вида испытания и частоты его проведения.

1.1. Подготовительно - заключительные операции

К подготовительно-заключительным операциям (ПЗО) относятся:

- подготовка стенда к испытанию;
- расконсервация двигателя и монтаж его на стенде;
- подключение топливной и др. магистралей, систем управления и измерения;
- демонтаж двигателя и консервация

Анализ этих операций показывает, что они мало пригодны для автоматизации. При обычной организации ПЗО требуют около 12 часов работы непосредственно на испытательном стенде. Такое непроизводительное его использование крайне невыгодно.

Для уменьшения времени непроизводительного использования испытательного стенда предпринимаются следующие меры по автоматизации ПЗО.

Подготовительно-заключительные операции переносятся из бокса в так называемый «зал подготовки». Здесь производится внешний осмотр и расконсервация двигателя. Применяются специальные «подмоторные рамы». На нее двигатель монтируется в зале подготовки. На раму устанавливаются первичные преобразователи и другое необходимое оборудование.

Все коммуникации двигателя выводятся на специальный щиток рамы. Проверяется контрольно-измерительная и вторичная аппаратура. Применяются быстродействующие соединения для подключения стендовых систем (топливных, воздушных, гидравлических и др.) к щиту подмоторной рамы.

Двигатель, смонтированный на подмоторной раме, доставляется из зала подготовки на стенд. Здесь производится быстрое крепление рамы на силоизмерительный станок. Щит подмоторной рамы соединяется со стендовыми системами.

Для монтажа и демонтажа двигателя с подмоторной рамы в боксе требуется обычно по одному часу на монтаж и демонтаж. Следовательно подготовительно-заключительные операции в этом случае требуют два часа работ на испытательном стенде.

Таким образом, такая автоматизация подготовительно-заключительных операций примерно на 10 часов сокращает непроизводительную загрузку стенда.

Особенно целесообразна автоматизация подготовительно - заключительных операций при испытаниях серийных ГТД. В этом случае относительное время подготовительно - заключительных операций достигает 30-40% от общего времени предъявительских, или приемо-сдаточных испытаний. В год на предприятии проводится до нескольких тысяч таких испытаний.

Поэтому в серийном производстве автоматизация подготовительно - заключительных операций позволяет значительно снизить непроизводительную загрузку стендов, увеличить пропускную способность и сократить потребное их количество, получив большую экономию материальных средств.

1.2. Испытания по заданной программе

Испытания по заданной программе включает следующие операции:

- регистрация параметров;
- управление режимами.

Регистрация параметров - это одна из самых главных операций при испытании авиационных двигателей. Отметим основные особенности неавтоматизированной («ручной») регистрации параметров:

1. Большая трудоемкость. Развитие авиадвигателестроения всегда сопровождается усложнением конструкции двигателей, и обычно приводит к более «жестким» условиям работы всех его узлов и элементов. В свою очередь это обуславливает постоянное увеличение количества параметров, контролируемых при испытаниях. В [табл.1.2](#) показан существенный рост каналов связи двигателя с измерительной аппаратурой.

Для записи такого количества параметров вручную при испытании двигателя потребовалось бы 30...40 операторов.

2. Процесс регистрации параметров во время испытания двигателя чрезмерно длителен и доходит до десятков минут.

Вследствие этого расходуется ресурс (особенно важно для опытных двигателей), увеличивается расход топлива, снижается пропускная способность стендов.

3. Возникают дополнительные погрешности измерений параметров. Они могут быть обусловлены, например, неодновременностью измерения (возможны погрешности, вызванные колебаниями режима и внешних условий), рис. 1.2 и субъективностью отсчетов показаний приборов.

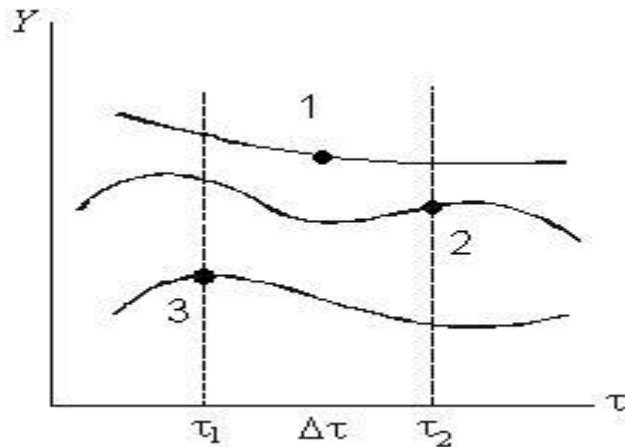


Рис. 1.2. Влияние времени измерения на соответствие измеряемых параметров:
1-первый оператор; 2- второй оператор; 3-третий оператор

К основным способам автоматизированной регистрации параметров относят:

а) дискретные

фотографирование показаний приборов;

применение самопишущих приборов типа ЭПП- 09, КСП - 4;

б) непрерывные

запись параметров на магнитофоне или светолучевом осциллографе;

в) дискретный с высокой частотой опроса

применение автоматизированных систем измерения и регистрации параметров на основе ИВК.

Необходимо отметить, что в настоящее время на стендах по испытанию газотурбинных двигателей и их узлов, как авиационного, так и наземного применения используются автоматизированные системы контроля и управления технологическим процессом испытания.

Системы измерения на базе автономных приборов отошли в прошлое.

Автономные приборы используются только на стендах малым объемом измеряемых параметров и простым алгоритмом обработки.

Современные системы стендовых испытаний позволяют принять и обработать информацию, поступающую с 2000 и более датчиков, (см. [табл.1.2](#)).

Объем измеряемых параметров существенно зависит от вида испытаний. На серийных испытаниях объем меньше, а на исследовательских может существенно вырасти.

В [табл.1.3](#) приведен объем измеряемых параметров в зависимости от вида испытаний. Сбор данных и управление процессом проведения испытания выполняются обычно автоматически или полуавтоматически под управлением оператора или инженера-испытателя. Однако, заполнение протоколов испытания проводится вручную.

В процессе испытания инженер-испытатель следит не только за значениями параметров на табло, за аварийной сигнализацией, но и по мере возможности за состоянием материальной части, находящейся в боксе стенда. Такой контроль осуществляется по экрану монитора

Телевизионные камеры устанавливаются таким образом, чтобы можно было видеть двигатель со всех сторон. Таким способом могут быть обнаружены течи, прорыв газов, возгорание.

Системы, основанные на мощных компьютерах, работающих в режиме разделения функций, выдают физические значения параметров, приведенные значения параметров, расчетные величины в виде таблиц и графиков.

При проведении серийного испытания по его окончании выдается протокол.

Время испытаний двигателя существенно сокращается при использовании АСИ даже с частичной автоматизацией процесса регистрации параметров.

1.3. Управление режимами работы двигателя

Наиболее ответственная и часто повторяющаяся операция при испытании ГТД – вывод двигателя на заданный режим.

При испытаниях серийных ТРДД, эта операция повторяется более 150 раз. При эквивалентно-циклических ресурсных испытаниях двигателя смена режимов происходит более 5000 раз, так как ускоренные длительные испытания предусматривают, изменение режимов по циклам, в том числе имитирующим работу двигателя на самолете (т.е. включением и отключением режимов отбора воздуха, загрузки агрегатов, включения реверса и системы противообледенения).

Ручное управление режимами осуществляется оператором путем перемещения рычага управления двигателя (РУД). Процесс при этом контролируется визуально по стрелочным приборам. Время ручной установки режима зависит от квалификации оператора и может достигать 40 секунд.

К недостаткам ручного управления режимами относятся:

- а) большая трудоемкость;
- б) значительное время на установку режима;
- в) повышенные погрешности в установке и поддержании заданного режима.

Для автоматизации управления режимами работ двигателя необходимо на испытательном стенде установить исполнительный механизм управлением РУД, блок автоматики управления исполнительным механизмом и разработать соответствующие алгоритмы управления работой двигателя.

1.4. Отладка параметров двигателя

Отладка параметров двигателя является одной из главных операций при предъявительских и приемо-сдаточных испытаниях. Она необходима для настройки параметров двигателя до значений, установленных техническими нормами или условиями.

Отладка осуществляется путем целенаправленного изменения положения регулирующих элементов, размещенных на двигателе (регулирующих винтов насоса-регулятора, лопаток регулируемых направляющих аппаратов компрессора, створок регулируемого сопла и т.п.). Например, на двухвальном ТРДД имеется свыше десяти регулировочных элементов, на трехвальном ТРДДФ более 2-х десятков.

При ручном перемещении регулировочных элементов производится последовательное регулирование параметров двигателя (n , $P_{\text{дв}}$, G_T , T^* и др.) - фактически это означает, что приходится делать последовательные приближения. Для ручного перемещения регулировочных элементов двигатель останавливается.

Количество операций при перемещении регулируемых элементов и качество отладки параметров зависит от квалификации оператора. Опыт свидетельствует, что часто необходимы многократные повторные перемещения и, следовательно, многократные остановки и запуски двигателя, выходы его на заданные режимы. Отсюда вытекают основные недостатки ручной отладки параметров ГТД:

- большая трудоемкость;
- удлинение цикла испытания;
- негарантированное качество отладки.

Для автоматизации отладки двигателя необходимо:

1. Применение исполнительных органов дистанционного регулирования (при этом конструкция двигателей должна позволять устанавливать такие исполнительные механизмы);
2. Применение специальных математических методов определения оптимального перемещения регулировочных элементов с учетом их воздействия на все параметры ГТД.

Автоматизация отладки ГТД в процессе испытаний даст возможность производить перемещение регулировочных элементов без остановки двигателя, уменьшить количество регулировок и наилучшим образом отладить одновременно все параметры двигателя.

1.5. Обработка результатов испытания и их анализ

При обработке результатов испытаний производят следующие операции:

- а) расчет физических значений параметров например, p^* , G_T , ρ , $P_{дв}$ и др;
- б) расчет осредненных параметров по сечению (p^* , T^*);
- в) приведение параметров к САУ (с учетом поправок на t_n , p_n , d , R_e и т.п.);
- г) построение экспериментальных характеристик двигателя, например,
 $I_{пр}, P_{пр}, G_{T пр}, T_{T*пр} = f(p_{пр})$.
- д) Определение расчетных не измеряемых параметров двигателя и узлов, например, $T_{Г}^*$, G_B , η_k^* и др;
- е) статистический анализ полученных результатов.

Результаты таких расчетов не однозначны, требуют увязки между собой различных параметров двигателя и узлов. Эта операция часто называется термодинамическим анализом результатов испытания.

Термодинамический анализ ГТД необходим для:

- определения оптимального направления доводки опытных двигателей;
- оценки эффективности осуществляемых доработок в конструкции;
- оптимизации отладки параметров опытных двигателей;
- контроля технического состояния эксплуатируемых двигателей (и проходящих длительные испытания).

В настоящее время для статистического анализа результатов испытаний широко применяется частичная автоматизация обработки с применением ЭВМ, что позволяет уменьшить время на обработку параметров, сократить трудоемкость расчетов с гарантированной точностью расчетов.

При этом появляется возможность применения наиболее совершенных математических методов обработки результатов измерений.

Наиболее эффективна полная автоматизация обработки результатов испытаний на ЭВМ (АСИ ГТД).

На различных этапах проведения эксперимента на АСИ ГТД возлагают разнообразные задачи.

Фактически на реальных конструкциях затруднен доступ к агрегатам, регулировочные элементы кроме изменения их положения необходимо «контрить», для регулировки процесса запуска необходимо устанавливать сменные жиклеры для регулирования приемистости подбирать дроссельные пакеты и т.п.

Перед испытанием это:

- осуществление оптимального планирования предстоящего эксперимента исходя из его задач (определяется номенклатура измеряемых параметров количество и расположение экспериментальных точек);
- метрологическая аттестация измерительных каналов (определение градуировочных зависимостей и их погрешностей).

В процессе испытания это:

- первичная обработка экспериментальных данных;
- выявление грубых ошибок, промахов, выбросов в измерении параметров;
- выдача оператору информации о полученных результатах обработки в наглядном виде (на экране дисплея, на печатающем устройстве, на специальной панели индикации);
- расчет и реализация оптимальных перемещений регулировочных элементов двигателя;
- печать протокола испытания.

Задачи, решаемые в реальном масштабе времени, т.е. в ходе эксперимента называются экспресс-анализом.

После проведения испытаний это:

- точное восстановление характеристик двигателя по экспериментальным данным;
- определение оценок неизмеряемых параметров двигателя и его узлов;
- накопление статистических материалов о проведенных испытаниях;
- выдача необходимой документации в виде текстов, таблиц и графиков.

Очевидно, что для повышения эффективности обработки результатов необходимо:

1. Применение современных математических методов обработки наблюдений устойчивых по отношению к погрешностям измерения; методов оценивания параметров, методов идентификации математической модели двигателя.

2. Идентификация математической модели - это увязка расчетных и измеренных значений параметров двигателя за счет изменения наименее достоверных параметров узлов.

3. Формализация опыта предыдущих испытаний, результаты которых хранятся в базе данных.

4. Использование неформализованного опыта исследователя путем применения диалогового (интерактивного) взаимодействия с ЭВМ.

В целом можно отметить, что автоматизация обработки результатов испытаний позволяет:

- повысить оперативность обработки результатов испытания;
- повысить точность и достоверность полученных данных.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ АСИ ГТД

2.1 Основные задачи испытаний, решаемые автоматизированной системой

Различают частичную и комплексную автоматизацию испытаний авиационных двигателей.

Частичная автоматизация это автоматизация отдельных операций испытания, например, регистрация параметров и обработка результатов испытания.

Комплексная автоматизация это автоматизация сразу всех операций испытания, включая управление работой двигателя и стендовых систем.

К основным задачам испытаний, решаемым с помощью АСИ ГТД, относятся:

1. Оптимальное планирование предстоящего испытания.
2. Измерение и регистрация параметров.
3. Непрерывный контроль за аварийно-опасными параметрами (n , T_{Γ}^* , $t_{\text{М}}$, $p_{\text{М}}$ и т.д.).
4. Обработка наиболее важной информации в реальном масштабе времени (в темпе испытания) и выдача результатов экспресс-анализа на устройство отображения информации (принтер, дисплей, панели индикации, графопостроитель).
5. Управление двигателем и его системами по заданной программе, перемещения регулировочных элементов без остановки двигателя.
6. Проведение полной обработки результатов испытания и подготовки необходимой документации.
7. Хранение необходимой информации в базе данных.

2.2. Основные требования к АСИ ГТД

При разработке АСИ ГТД необходимо учитывать ряд требований во многом определяющих облик системы.

1. *Высокая точность измерения параметров.* Допустимые погрешности измерения основных параметров при вероятности $p=0,95$ должны быть не более 0,2....0,5 %.

Такая точность может быть обеспечена за счет градуировок измерительных каналов перед каждым испытанием, одновременности регистрации всех параметров многократности опросов датчиков (за цикл измерений длительностью не более 0,1 сек производится не менее 10 опросов каждого датчика), после этого производится отбраковка возможных выбросов и осреднение оставшихся результатов.

2. *Обеспечение сохранности экспериментальной информации при аварийных ситуациях.* Для этого используют параллельная запись всей информации во время испытаний, (однако в безаварийных испытаниях такая запись является избыточной); выборочную запись на режимах вероятной аварийности; Запись информации на «кольцо» (замкнутая магнитная лента на которую в течение одной минуты ведется запись с последующим стиранием, если аварийной ситуации не возникло).
3. *Обеспечение возможности управления запуском двигателя, режимами его работы и остановом по заданной программе от ЭВМ.*
4. *Применение наиболее совершенных математических методов обработки экспериментальных данных.* Это позволяет увеличить информативность испытания, повысить точность и достоверность получаемых результатов.
5. *Обеспечение диалогового взаимодействия оператора с АСИ.* Позволяет оператору активно вмешиваться в код проведения испытаний, основываясь на получаемой информации.
6. *Представление результатов испытаний в наиболее полном и наглядном виде текстов, таблиц, графиков.*
7. *Применение серийных технических средств (первичных преобразователей, устройств связи с объектом (УСО), и.т. д.).* Должны использоваться средства измерения, допущенные Госстандартом РФ к применению после их государственной или ведомственной метрологической аттестации.
8. *Возможность модульного наращивания системы без изменения ее общей схемы и математического обеспечения.*
9. *Высокая надежность.* Одной из количественных характеристик надежности является время наработки на отказ. Для АСИ ГТД требуется, что бы время наработки на отказ, устраняемый в эксплуатации, было не меньше 24 ч.

Одной из главных мер по обеспечению надежности АСИ является резервирование ненадежных элементов (УСО, периферийных устройств, ЭВМ).

10. *Небольшие габариты и масса.* Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) должны размещаться в кабине наблюдения испытательных стендов. Современные ИВК на базе промышленных персональных ЭВМ занимают 2....3 м² площади пола и имеют относительно небольшую массу. Это позволяет использовать их и на летающих лабораториях.
11. *Небольшая стоимость*

2.3. Типовая схема АСИ ГТД

На рис. 2.1 представлена структурная схема АСИ ГТД. Она состоит из следующих элементов:

ГТД - газотурбинный двигатель;

ДАТ – первичные преобразователи, служат для преобразований физических параметров в электрический сигнал;

КОМ - коммуникаторы для последовательного подсоединения датчиков к нормализаторам;

НОРМ - нормализаторы, предназначенные для усиления или ослабления электрического сигнала до определения уровня $U=0.....5В$;

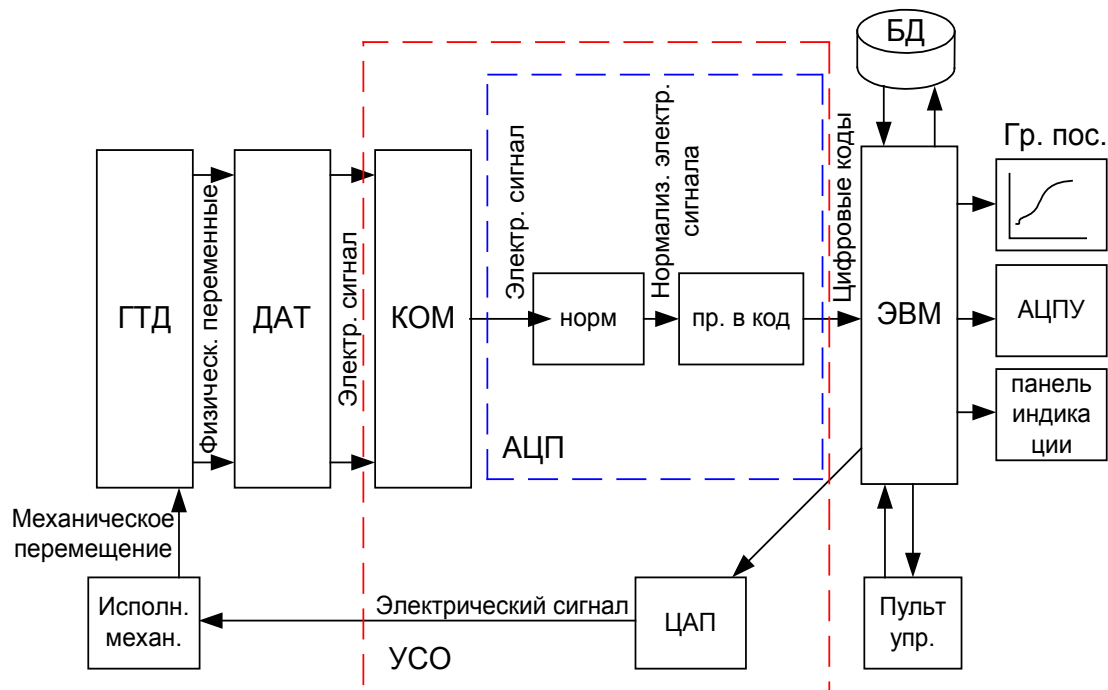


Рис 2.1. Структурная схема АСИ ГТД

АЦП - аналого-цифровой преобразователь аналогового напряжения в цифровой код;

ЧЦП - частотно-цифровые преобразователи частоты переменного тока;

БД - база данных;

Гр. Пост. - графопостроитель;

АЦПУ - алфавитно-цифровое печатное устройство;

Пульт упр. - пульт управления;

ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь;

Исп. Механ. - исполнительный механизм;

УСО - устройство связи с объектом.

Нормализаторы и преобразователи аналогового сигнала в цифровой код являются измерительными элементами системы.

Цифровые коды, соответствующие величинам измеряемых параметров поступают в ЭВМ. ЭВМ является главным элементом АСИ.

Оснащенная соответствующим математическим (программным) обеспечением ЭВМ осуществляет сбор измерительной информации, ее обработку и управление процессом испытания.

Все эти операции выполняются по определенным алгоритмам. В данном случае, алгоритм – набор формальных правил описывающих способ преобразования исходных данных для получения результата.

При обработке измерительной информации могут использоваться данные о результатах предыдущих испытаний, которые хранятся в БД. Полученные результаты могут быть также помещены в БД. Взаимодействие оператора с ЭВМ осуществляется через пульт управления.

Наиболее эффективным методом общения оператора с ЭВМ является диалоговое (интерактивное) взаимодействие. Диалоговое взаимодействие может применяться при работе системы как в темпе эксперимента, так и при обработке результатов после эксперимента.

Для управления РУД и регулировочными элементами цифровой код, которым оперирует ЭВМ, преобразуется в электрический сигнал. Это преобразование осуществляется с помощью ЦАП.

Электрические сигналы поступают в исполнительные механизмы (это как правило малые электрические двигатели с редукторами). Они преобразуют электрические сигналы в механике перемещения РУД и регулировочных элементов. Комплекс аппаратных средств, включающий коммутаторы, нормализаторы, АЦП, ЧЦП, ЦАП, и др., образует так называемое устройство связи с объектом (УСО).

Для возможности сопряжения между собой отдельных блоков АСИ, их входы и выходы необходимо выполнять по определенным правилам. Эти правила оговариваются принятыми стандартами на сопряжения, называемые интерфейсами. Интерфейс это сопряжение двух блоков выполненное по определенному стандарту.

Интерфейс определяет: тип разъемов, число сопрягаемых линий, назначение каждой линии, содержание информации, передаваемой по каждой линии, кодировку информации, характеристики сигналов, передаваемых по каждой линии.

Главный интерфейс АСИ - это стык УСО с ЭВМ. Если какие-либо элементы системы не имеют стандартного интерфейса, то они подключаются через адаптеры (переходники).

Функционально законченные элементы системы, имеющие одинаковый интерфейс входа-выхода называются модулями.

При наличии типовых модулей различного назначения (коммутаторы, нормализаторы, АЦП, ЧЦП, ЦАП и т. д.). АСИ могут быть составлены из них полностью или частично.

Комплекс УСО и ЭВМ с периферийными устройствами образуют вместе с программным обеспечением измерительно-вычислительный комплекс (ИВК).

Важнейшим элементом АСИ является прикладное математическое обеспечение (программное обеспечение). С его помощью осуществляется градуировка и метрологическая аттестация измерительных каналов, сбор измерительной информации, ее обработки, общение с БД, вывод результатов на устройства отображения информации (дисплей АЦПУ, графопостроитель, панели индикации), диалоговое взаимодействие с оператором, управление двигателем.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АСИ ГТД

3.1. Первичные преобразователи при автоматизированных испытаниях ГТД.

Автоматизированные испытания немыслимы без датчиков (первичных преобразователей). Датчик – это устройство, которое под воздействием измеряемой физической величины формирует у себя на выходе эквивалентный сигнал, чаще всего электрической природы, являющейся функцией измеряемой величины

$$P = f(X_{\text{изм}}), \quad (3.1)$$

где P – эквивалентный сигнал на выходе датчика;

$X_{\text{изм}}$ – значение измеряемой величины.

Датчики делятся на две группы:

- генераторные;
- параметрические.

Генераторные датчики обеспечивают на выходе изменяющийся электронный сигнал в виде электрического заряда, напряжения или тока.

Параметрические датчики изменяют свои электрические свойства (сопротивление, индуктивность, емкость и т.п.) при изменении физической величины.

В процессе испытания авиационных двигателей используются различные типы первичных преобразователей, которые необходимы для сбора информации об объекте испытания на основе преобразования изменения различных физических параметров в соответствующие изменения электрических сигналов.

В состав системы измерения АСИ ГТД входят датчики для регистрации следующих параметров:

- тяги (крутящего момента мощности);
- расхода (топлива и масла);
- частоты вращения ротора;
- угловых перемещений (α РУД, регулировочных элементов);
- давлений и температур (до 90% от общего количества датчиков, применяемых при испытаниях ГТД);
- напряжений в деталях;
- температур;
- виброускорений.

Кроме того, при проведении исследований применяются специальные виды датчиков для измерения:

- зазоров и перемещений;
- пульсирующих давлений;
- углов поворота и др.

3.2. Измерение температуры

Для измерения температуры ГТД наиболее широко применяются термометры электрического сопротивления и термопары.

Принцип действия термометров сопротивления основан, на использовании свойств материалов изменять электрическое сопротивление при изменении температуры

$$\omega = \omega_0 [1 + \alpha (T - T_0)]. \quad (3.2)$$

Термопреобразователи сопротивления (ТС). Под ТС принято понимать термодатчик, у которого под действием окружающей температуры меняется электрическое сопротивление проводника.

Таким образом, с помощью ТС изменение температуры преобразуется в эквивалентное изменение электрического сопротивления проводника.

В практике обычно применяется два типа ТС:

- металлические, где в качестве материала проводника используются: платина, медь, никель;

- полупроводниковые, изготовленные на основе смеси оксидов или сульфидов различных металлов.

Металлические ТС, выпускаемые промышленностью, обычно изготавливаются с чувствительным элементом из следующих материалов: платина (ТСП), медь (ТСМ), никель (ТСН).

Чистая платина - наилучший и наиболее распространенный материал для изготовления чувствительных элементов. Неокисляющаяся платина длительное время сохраняет величину удельного электрического сопротивления. Платиновые чувствительные элементы хорошо работают в широком диапазоне температур, как отрицательных, так и положительных.

ТСП обычно используются в диапазоне от минус 260 до плюс 850°C и для единичного производства в диапазоне до 1100°C.

Применение ТСП для измерения высоких температур ограничивается эффектом испарения, приводящим к изменению сопротивления платиновой проволоки.

ТСП - наиболее точные приборы для измерения температуры, отличающиеся высокой воспроизводимостью показаний.

Медь, применяемая для изготовления проводников ТСМ, отличается очень высокой степенью чистоты. Поэтому ТСМ из этой проволоки очень хорошо взаимозаменяются. Сильная окисляемость меди при высокой температуре ограничивает температурный предел применения медных ТСМ.

Обычно ТСМ применяют в диапазоне от минус 200°C до плюс 200°C.

Технически чистый никель отличается высоким температурным коэффициентом сопротивления и практически линейной зависимостью удельного сопротивления от температуры в диапазоне до 400°C.

Значительная окисляемость никеля не позволяет применять его для измерения высоких температур. Обычно ТСН применяют в диапазоне от минус 50°C до плюс 180°C.

Полупроводниковые ТС отличаются тем, что их чувствительность к температуре значительно выше (приблизительно в 10 раз), чем у металлических.

Температурный коэффициент, как правило, отрицательный и сильно зависит от температуры.

Высокое удельное сопротивление материала ТС позволяет получить необходимое сопротивление уже в малых объемах вещества, из которого изготавливается ТС.

Полупроводниковые ТС могут иметь малые габариты, около 1 мм, в результате это

позволяет проводить измерение температуры практически в точке, причем с малой инерционностью.

Полупроводниковые ТС называют часто термисторами и используют обычно в диапазоне отрицательных температур и положительных до $\approx 300^\circ\text{C}$.

В общем случае уравнение преобразования термистора выражается соотношением:

$$R_t = A \cdot e^{B/t} \quad (3.3)$$

Следовательно, при увеличении температуры сопротивление термистора уменьшается.

К недостаткам полупроводниковых ТС относится следующее:

- значительная нелинейность зависимости сопротивления от температуры;
- нестабильность характеристики во времени;
- и, как следствие, высокая погрешность.

Внешний вид термопреобразователей сопротивления показан на [рис.3.1](#).

ТС состоит из чувствительного элемента, расположенного внутри защитной гильзы, резьбовой части с гайкой (для вворачивания в корпус объекта измерения температуры) и головки датчика (для размещения присоединительных контактов).

Защитная гильза выполняется из материала, обеспечивающего защиту чувствительного элемента от действия повышенного давления и воздействия агрессивных свойств среды.

Термопары. Под термопарой принято понимать два проводника из разнородных металлов (термоэлектроды), соединенных на одном конце и образующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерения температуры.

На рисунке 3.2 приведена схема подключения измерительного прибора (V) к концам термопары.

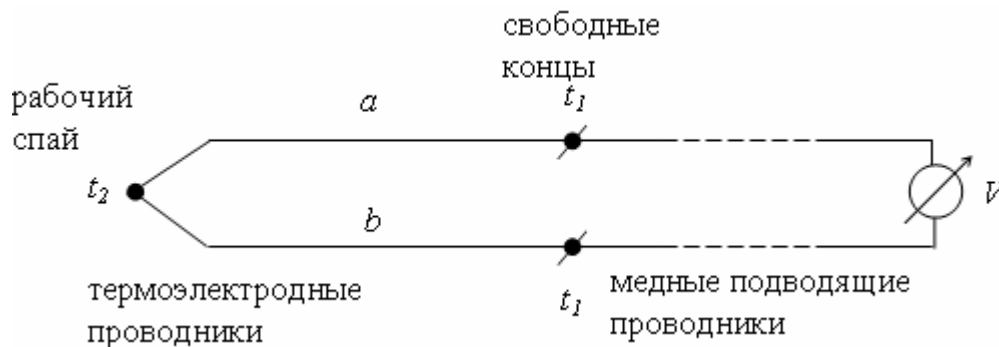


Рис. 3.2. Схема подключения измерительного прибора

Основная формула термопары для термоэлектродвижущей силы имеет следующий вид:

$$E_{ab}(t_2; t_1) = e_{ab}(t_2) - e_{ab}(t_1) \quad (3.4)$$

$$t_2 \neq t_1$$

Если в термопаре из термоэлектродных проводников a и b температуру t_1 поддерживать постоянной, то термоэдс (ТЭДС) термопары будет однозначно зависеть от температуры t_2 . Следовательно, по измеряемой величине ТЭДС можно найти величину температуры.

В рабочих условиях поддержание постоянной температуры на свободных концах

термопары осуществляется путем помещения их в термостат.

Используют два вида термостатов:

- активный, с поддержанием температуры внутри термостата обычно на уровне 40-45°C;
- пассивный термостат, обеспечивающий только медленное изменение температуры t_1 .

Внутри термостата устанавливается один или два термопреобразователя сопротивления для измерения температуры свободных концов.

Учет температуры свободных концов, или как их еще называют, холодного спая, в системе измерения осуществляется автоматически по программе компенсации температуры холодного спая.

На стендах невыгодно тянуть длинные и достаточно дорогие термопарные провода от точки измерения температур до измерительных цепей. В этом случае для удлинения термопары и соответственно удаления холодного спая от места нагрева (двигателя) широко применяют так называемые компенсационные провода.

Такая схема подключения термопар к измерительному прибору приведена на рисунке 3.3.

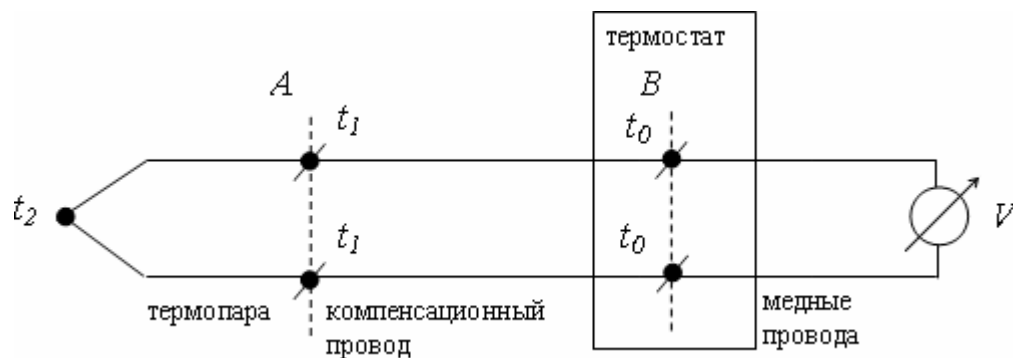


Рис. 3.3. Цепь термопары с компенсационными проводниками

Компенсационные провода, удаляя свободные концы в точку B с температурой t_0 , не вносят дополнительной погрешности в результаты измерения ТЭДС при соблюдении следующих требований:

- применение для каждого типа термопар соответствующих компенсационных проводов;
- соблюдение полярности компенсационных проводов при их подключении;
- обеспечение в сечении A , в точках соединения термоэлектродных проводников с компенсационным проводом одинаковых температур (t_1).

Номинальные статические характеристики преобразования (НСХ) термопар - это номинально приписываемые термопаре данного типа ТЭДС от температуры рабочего спая и при заданной температуре свободных концов, выраженные в мВ.

НСХ преобразования для различных типов термопар установлены

ГОСТ Р 8.585-2001. Этот стандарт применяют при разработке нормативных и технических документов, распространяющихся на термопары.

В указанном стандарте НСХ преобразования термопар типов R, S, B, J, T, E, K, M по Международной шкале и термопар типов A, L, M, применяемых в России, представлены значениями ТЭДС в зависимости от температуры рабочего спая, при температуре свободных концов 0°C.

Данные по типам термопар, термоэлектродным материалам, обозначениям промышленных преобразователей сведены в [таблицу 3.1](#).

Реальный, изготовленный в соответствии с требованиями ГОСТ, экземпляр термопары

имеет свою индивидуальную зависимость ТЭДС от температуры рабочего спая. Это связано с неоднородностью состава термоэлектродной проволоки.

В связи с этим ГОСТ Р 8.585-2001 содержит не только номинальные статические характеристики термопары данного типа, но также регламентирует пределы допустимых отклонений реальных ТЭДС от НСХ, выраженных в °С (см. [табл.3.2](#)).

Градуировка термопар. Термопары обладают рядом несомненных достоинств по сравнению с термопреобразователями сопротивления:

- малыми габаритами, что позволяет проводить измерения практически в точке;
- малой инерционностью;
- широким диапазоном измеряемых температур;
- механической прочностью;
- не требуют дополнительного источника питания.

В то же время существует ряд недостатков, таких как:

- большая по сравнению с ТСП, ТСМ погрешность;
- слабые выходные сигналы, измеряемые в мВ.

Точность термопары можно повысить за счет снятия индивидуальной характеристики путем градуировки.

Под градуировкой термопары понимают определение числовых значений ее ТЭДС при различных значениях температур t_2 ее рабочего спая и определенной температуре t_1 свободных концов.

Обычно определение значений температур и соответствующих им значений ТЭДС проводится с помощью образцового прибора методом сличения.

Под методом сличения принято понимать непосредственное измерение ТЭДС градуируемой термопары при различных температурах t_2 ее рабочего конца и известной температуре свободных концов.

Причем значение t_2 определяется либо с помощью образцовой термопары, либо с помощью другого образцового прибора.

Для целей градуировки используют специальные «поверочные» печи.

Конструкция термопар аналогична конструкции термометров сопротивления, имеет защитную гильзу при закрытом рабочем спае, или защитный корпус, если рабочий спай выводится за пределы корпуса.

Для вворачивания термопары в корпус объекта имеется резьбовая часть и гайка.

Контакты термопар для подключения к измерительным цепям расположены в головке термопары.

На [рис.3.4](#) приведена конструкция термопары ТХА 9425.

Электрическая схема включения для варианта одноточечной и двоиной термопар приведена на [рис.3.5](#).

Термопары с унифицированным выходным сигналом. В связи со стремительным развитием электроники, уменьшением габаритов электронных устройств, при одновременном повышении точности и стабильности их характеристик, широкое применение находят термопары с унифицированным выходным сигналом.

Также термопары содержат не только термоэлектродные провода с рабочим спаем, но также преобразователь сигналов с термопары (мВ) в унифицированный сигнал, например:

$0 \div 5$ мА, $4 \div 20$ мА.

Примером такой термопары может быть термопара ТХАУ Метран-271 (см. [табл.3.3](#)).

К недостаткам термопар с унифицированным выходным сигналом следует отнести узкий диапазон рабочих температур, который может быть обработан устройством преобразования.

Преобразователь обычно располагается в головке термопары. На оболочке двигателя, в месте расположения головки термопары, температуры могут достигать $100 \div 150^{\circ}\text{C}$, что делает проблематичным использование таких термопар.

Несомненным достоинством данного типа термопар является унификация выходных сигналов и, следовательно, существенное упрощение схемы системы измерения.

3.3. Измерение давления

Давление - это один из наиболее важных физических параметров, характеризующих состояние рабочего тела газотурбинного двигателя. Наряду с измерением температур измерение давлений составляет основную часть объема измеряемых параметров. В [табл.3.4](#) приведено соответствие единиц давления.

Классификация средств измерения давления. Манометр - широко применяемый прибор, предназначенный для отображения давления непосредственно по шкале, табло, индикатору.

Измерительный преобразователь давления (ИПД), или датчик давления, прибор, который позволяет получать и дистанционно передавать электрический сигнал, пропорциональный измеряемому параметру.

В настоящее время широко используются ИПД, имеющие индикацию (функции манометра) и выход на измерительные цепи системы контроля параметров.

По принципу действия манометры подразделяются на:

жидкостные, где измеряемое давление уравнивается гидростатическим столбом жидкости - воды, ртути;

деформационные, когда давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента;

грузопоршневые, когда измеряемое давление уравнивается весом поршня с комплектом образцовых гирь;

электрические, когда давление определяется на основании зависимости электрических параметров (сопротивления, емкости, заряда, частоты) чувствительного элемента от измеряемого давления.

По виду измеряемого давления манометры и ИПД делятся на приборы измерения:

абсолютного давления;

избыточного давления;

разрежения (вакуумметры);

давления и разрежения (мановакуумметры);

атмосферного давления (барометры);

разностного давления (дифференциальные манометры).

По области применения манометры (ИПД) делятся на:

общепромышленные;

лабораторные;

специальные (для экстремальных условий применения);

образцовые (для поверки рабочих манометров);

эталонные (хранители единиц давления, для их передачи на образцовые средства измерения).

Измерение давления в потоке жидкости или газа. При измерении давления в потоке жидкости или газа и при обтекании тел потоком жидкости или газа на их поверхности устанавливается определенное распределение давления. В точке носка тела, расположенной на оси тела (критической точке), давление на поверхности равно давлению заторможенного потока, представляющему собой сумму статического давления и скоростного напора.

Статическое давление (p) в потоке равно давлению на стенке трубы, создаваемому покоящейся или текущей параллельно стенке трубы жидкостью (газом). Приемником статического давления является сверление на стенке канала. Диаметр отверстий должен быть 0,5...1,5мм. Отверстия меньшего диаметра легко засоряются, большего дают значительную ошибку измерения. Кромки отверстий не должны иметь заусенцев, фасок и скруглений.

Скоростной напор - давление, создаваемое движением потока. Для несжимаемой

жидкости, а также для газа, текущего с малой скоростью, скоростной напор определяется как $\rho \cdot V^2/2$, где V - скорость потока, а ρ - плотность.

Приемники давления заторможенного потока выполняются в виде «Г» - образной трубки, обращенной отверстием навстречу потоку. Используются также более сложные приемники заторможенного давления, обладающие малой чувствительностью к углу набегания потока. Кроме того, при испытаниях ГТД применяются комбинированные насадки с приемниками заторможенного и статического давления. Приемники давления соединяются с датчиками так называемыми «импульсными» трубопроводами.

«Импульсный трубопровод» это, чаще всего, металлические трубки с диаметром сечения ≈ 4 мм. При измерении постоянных давлений для гашения пульсаций давления на входе в датчик применяют специальные гасители. Простейший гаситель - это капиллярная трубка достаточной длины.

Датчики давления деформационные с упругими элементами. Под действием давления упругий элемент меняет свои размеры (форму). Деформация преобразуется либо в перемещение стрелки прибора, либо в электрический сигнал. Используются следующие типы датчиков давлений:

1. Индукционные.
2. Потенциометрические.
3. Вибрационно-частотные.
4. Тензометрические.
5. Емкостные.

На рисунке 3.6 приведены часто применяемые конструкции датчиков давления деформационного типа с упругими элементами.

На рисунке 3.6 а) приведен датчик с чувствительным элементом - трубкой Бурдона. Трубка с плоским поперечным сечением, изогнутая по неполной дуге, спирали или винтообразной линии стремится под действием давления выпрямиться. Перемещение передается на стрелку прибора.

Датчик с чувствительным элементом - полый и скрученной трубкой показан на рисунке 3.6 б). Один конец трубки закрыт, а на другой подается давление.

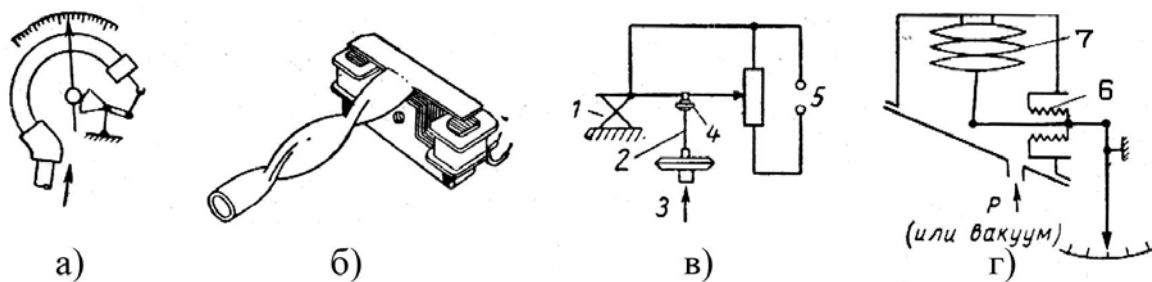


Рис. 3.6. Датчики давления с упругими чувствительными элементами.

- 1 - упругий подвес; 2 - тяга; 3 - давление; 4 - упругая связь;
5 - к мостовой цепи; 6 - сильфонный вывод; 7 - сильфон.

На рисунке 3.6 а) приведен датчик с чувствительным элементом - трубкой Бурдона. Трубка с плоским поперечным сечением, изогнутая по неполной дуге, спирали или винтообразной линии стремится под действием давления выпрямиться. Перемещение передается на стрелку прибора.

Измеряет разность между внешним и внутренним давлением. Величина давления преобразуется в электрический сигнал.

Датчик потенциометрический (рис. 3.6 в). Преобразует величину давления в величину

электрического сопротивления. Перемещение мембранной коробки, или трубки Бурдона, передается на подвижный контакт прецизионного потенциометра.

Односильфонный датчик давления (рис 3.6 г). Используется вакуумированный сильфон, который помещается в корпус, куда подается измеряемое давление. Перемещение центра измерительного сильфона передается через рычаг и упругий сильфонный выход к указывающей стрелке.

Тензорезисторные ИПД. Среди электрических ИПД наиболее частое применение находят тензорезисторные, использующие зависимость активного сопротивления проводника или полупроводника от степени его деформации.

Измеряемое давление подается в рабочую полость датчика и воздействует непосредственно на измерительную мембрану тензопреобразователя, вызывая ее прогиб.

Чувствительный элемент - пластина монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами, соединенная механически с металлической мембраной тензопреобразователя. Деформация измерительной мембраны приводит к пропорциональному изменению сопротивления тензорезисторов и разбалансу мостовой схемы.

На [рис.3.7](#) приведена структурная схема тензорезисторного ИПД.

Электрический сигнал с выхода мостовой схемы датчика поступает в электронный блок, где преобразуется в унифицированный токовый сигнал.

Примером серийно выпускаемых ИПД, основанных на тензорезисторах, является продукция группы компаний «Метран».

Внешний вид датчика «Метран-100» моделей 1050, 1060, 1150, 1160, 1350 приведен на [рис.3.8](#).

Датчик имеет резьбовую часть для присоединения к магистрали (трубопроводу), тензопреобразователь и электронный блок. Измеряемые среды: жидкость, пар, газ, в том числе газообразный кислород и кислородосодержащие газовые смеси.

Диапазоны измерения давлений:

минимальный $0 \div 0,04$ кПа;

максимальный $0 \div 100$ МПа.

Основная погрешность измерений - 0,1%.

Датчик давления серии «Метран-100» предназначен для измерения и непрерывного преобразования в унифицированный аналоговый токовый сигнал и/или цифровой сигнал следующих входных величин:

избыточного давления (Метран-100-ДИ);

абсолютного давления (Метран-100-ДА);

разрежения (Метран-100 ДВ);

давления - разрежения (Метран-100 ДИВ);

разности давлений (Метран-100 ДД);

гидростатического давления (Метран-100 ДГ).

Управление параметрами датчика может быть:

кнопочное со встроенной панели либо

с помощью коммутатора или компьютера.

3.4. Датчики измерения частоты вращения

При испытании ГТД важными параметрами являются частоты вращения роторов. По величинам этих параметров определяют режим работы двигателя, а также оценивают его термодинамические, прочностные характеристики.

Существуют различные методы и конструкции датчиков частоты вращения. Наиболее часто применяют электрические методы измерения частоты вращения:

- оптические;
- индукционные;
- импульсные;
- генераторные.

Оптический (фотоэлектрический) метод. Датчик в этом случае состоит из диска с отверстиями, или прорезями, фотозлемента, источника света. Диск устанавливается на валу, частоту вращения которого измеряют. Световой поток от источника света проходит через отверстия и попадает на фотозлемент. При вращении диска на выходе схемы измерения получают импульсы, частота которых пропорциональна частоте вращения вала и зависит от количества отверстий (прорезей) на диске.

Для расчета частоты вращения обычно используют счетчик количества импульсов за интервал времени t . В этом случае частота вращения в оборотах в минуту может быть рассчитана по формуле:

$$n = \frac{60 N}{k t} \quad 1/м, \quad (3.5)$$

где N - число импульсов в счетчике за интервал времени t ,
 k - число отверстий (прорезей) в диске.

Индукционный метод. Датчик, основанный на индукционном методе, состоит из диска, изготовленного из магнитного материала и измерительной катушки с магнитным сердечником. На торце диска делаются прорезы или выступы.

На рис 3.9 представлена схема, поясняющая принцип действия датчика.

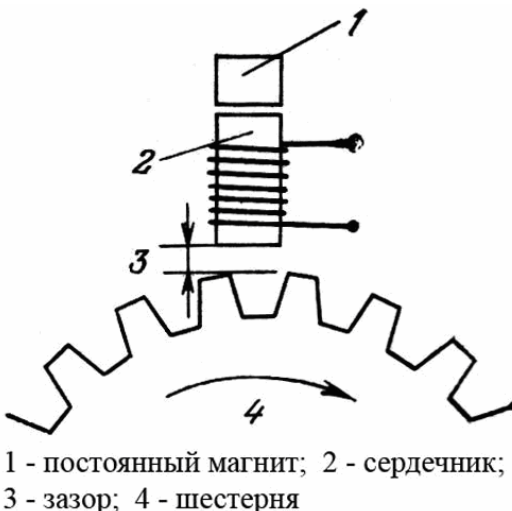


Рис. 3.9. Принцип действия индукционного датчика

Измерительная катушка располагается на небольшом расстоянии от диска (шестерни). При вращении диска мимо катушки проходят выступы и впадины диска, что приводит к изменению магнитного сопротивления катушки. В катушке наводится Э.Д.С. с частотой,

пропорциональной частоте вращения вала и количеству выступов на диске.

Амплитуда выходного сигнала зависит от величины зазора между катушкой и диском и от скорости вращения вала.

На малых частотах вращения амплитуда сигнала резко уменьшается, поэтому этот метод для измерения малых частот вращения обычно не применяется.

Импульсный метод. При использовании этого метода вместо измерительной катушки устанавливается датчик Холла, на выходе которого вырабатываются импульсы, частота следования которых пропорциональна частоте вращения вала и числу выступов (прорезей) на диске.

Принцип действия датчика Холла основан на реакции электронной схемы и чувствительного элемента на изменение магнитного поля. Это изменение происходит за счет прохождения выступа на диске в зазоре между полюсами датчика. На выходе датчика появляются импульсы.

Амплитуда сигнала в этом методе менее чувствительна к частоте вращения, поэтому метод может использоваться на малых частотах вращения валов.

Измерение частоты вращения валов датчиком высокой частоты. В качестве примера практической схемы измерения частоты вращения валов ГТД рассмотрим схему измерения частоты вращения вала низкого давления (НД).

В схеме измерения используется датчик типа ДЧВ - 2500А.

Конструкция датчика приведена на [рис.3.10](#).

Датчик ДЧВ - 2500А предназначен для преобразования частоты вращения ротора двигателя в частоту электрических импульсов, выдаваемых по двум электрически не связанным каналам.

Основным узлом датчика ДЧВ - 2500А является бескаркасная катушка, состоящая из двух обмоток с постоянным магнитом в качестве сердечника. Катушка с магнитом размещается в корпусе, выполненном из немагнитной нержавеющей стали в виде тонкостенного стакана. Для крепления датчика на корпусе имеется буртик, который прижимается к посадочной поверхности фланцем соответствующей конфигурации и является принадлежностью двигателя.

Датчик ДЧВ - 2500А работает совместно с индуктором (зубчатым колесом), приводимым во вращение от вала соответствующего ротора через шестеренчатую передачу. При вращении индуктора каждый из его зубьев, проходя в непосредственной близости от торца датчика, изменяет магнитное поле, окружающее витки катушки датчика. В катушке индуцируется э.д.с., пропорциональная по частоте и амплитуде частоте вращения зубчатого колеса.

На выходе схемы измерения частоты вращения формируются импульсы.

Сигналы со схем измерения частоты вращения валов поступают в систему автоматического управления газотурбинной установки и используются для контроля параметров (от всех роторов), для защиты двигателя (от ротора свободной турбины).

На [рис.3.11](#) приведена конструктивная схема установки датчиков ДЧВ - 2500А.

На коробке приводов агрегатов вала низкого давления установлены два датчика, каждый из которых имеет две независимые обмотки катушки индуктивности. Дублирование каналов измерения частоты вращения вала необходимо, во-первых, для повышения надежности контроля и защиты двигателя, а также и для распараллеливания сигналов на различные потребители информации.

Датчики тахогенераторные (ДТ). Тахогенераторные датчики входят в состав дистанционных стрелочных тахометров (ДТЭ-1; ДТЭ-2; ТСФУ-1-4). ДТЭ - это трехфазный синхронный генератор. Его вал через редуктор коробки приводов связан с ротором двигателя.

При вращении ротора на выходе из ДТ формируется электрический сигнал в виде синусоидального напряжения. Частота и амплитуда этого напряжения пропорциональна частоте вращения ротора двигателя - (n).

$$U, f = \varphi(n). \quad (3.6)$$

При изменении $n=250\dots3000$ об/мин на выходе из ДТ имеем сигнал с частотой $f = 8\dots100$ Гц и напряжение $U = 2,5\dots25$ В.

3.5. Датчики измерения расхода топлива (топливного газа)

Расходом называется количество жидкости (газа), протекающее через поперечное сечение потока в единицу времени.

В зависимости от единиц измерения количества жидкости (газа) расход может быть объемным (Q , м³/с) или массовым (M , кг/с).

Массовый и объемный расходы связаны соотношением:

$$M = \rho \cdot Q \quad (3.7)$$

Расход топлива чрезвычайно важен для оценки характеристик двигателя, поэтому при проведении испытаний ему уделяется большое внимание и предъявляются достаточно высокие требования по точности измерения (0,3 % от ИЗ для опытного производства).

Расход топлива на двигателе - величина переменная, поэтому при проведении измерений говорят о мгновенном расходе - значении расхода в данный момент времени, среднем расходе - осредненном значении за определенный промежуток времени.

Мгновенные значения расхода важны при измерении параметров двигателя на переменных режимах, запуске, приемистостях, сбросе газа.

Осредненные значения расхода используются при снятии характеристики двигателя.

Устройства, предназначенные для измерения расхода топлива называются расходомерами и подразделяются на объемные и массовые.

В практике измерений расхода жидкостей и газа применяются различные типы расходомеров, основанные на различных физических явлениях:

расходомеры переменного перепада давления (с сужающими устройствами);

турбинные расходомеры;

электромагнитные расходомеры;

ультразвуковые расходомеры;

инерционные расходомеры (основанные на инерционном воздействии массы движущейся жидкости, газа) и другие.

Наиболее широкое применение в практике стендовых испытаний газотурбинных двигателей получили методы, основанные на измерении перепада давления на сужающем устройстве, турбинные, вихреакустические и кориолисовые расходомеры.

Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Принцип метода состоит в том, что в трубопровод, по которому протекает среда, устанавливают сужающее устройство (СУ), создающее местное сопротивление.

Вследствие перехода части потенциальной энергии потока в кинетическую, средняя скорость потока в суженном сечении повышается, в результате чего статическое давление в этом сечении уменьшается и становится меньше статического давления перед СУ. Разность эта тем больше, чем больше расход протекающей среды и, следовательно, перепад давления на СУ может служить мерой расхода.

Перепад давления Δp связан с расходом жидкости (газа) соотношением вида:

$$Q = K \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (3.8)$$

где ρ - плотность жидкости, K - константа, определяемая в некотором диапазоне чисел Рейнольдса только геометрией устройства;

Расходомерные устройства на основе сужающих устройств рассчитывают по ГОСТ 8.563.1-97.

Турбинные расходомеры. Турбинные расходомеры являются наиболее точными приборами для измерения расхода жидкостей. Приведенная погрешность измерения

составляет значение порядка 0,5 %. При проведении индивидуальной градуировки (проливки) датчика достигают более высокой точности измерения ($0,2 \div 0,3$ %).

Датчики просты по конструкции, имеют высокую чувствительность и широкий диапазон измерения. При стендовых испытаниях ГТД турбинные расходомеры используются для измерения расхода керосина.

Турбинный расходомер состоит (см. рис. 3.12) из турбинки 3, индуктивной катушки 4, регистрирующего прибора 1. Турбинка 3 представляет собой аксиальную или тангенциальную лопастную турбинку, опирающуюся на подшипники 2.

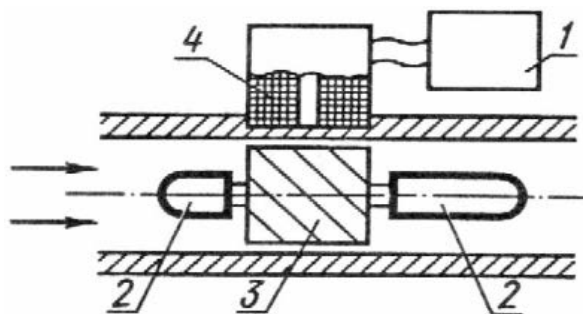


Рис. 3.12. Принципиальная схема турбинного расходомера

Поток измеряемой среды, воздействуя на наклонные лопасти турбинки, сообщает ей вращательное движение с угловой скоростью, пропорциональной расходу Q . Лопасти турбинки, проходя мимо индукционной катушки, наводят в ней э.д.с. импульсной формы. Частота следования импульсов зависит от количества лопастей и пропорциональна угловой скорости вращения турбинки, а, следовательно, расходу.

Расход Q рассчитывается по формуле:

$$Q = k f, \quad (3.9)$$

где k - коэффициент наклона характеристики расходомера,
 f - частота сигнала на выходе индукционной катушки.

Турбинные расходомеры вследствие их относительно малой инерционности применяются для измерения на переменных режимах. Они находят применение там, где требуется высокая точность измерения.

Для повышения точности и надежности измерений на стендах по испытанию ГТД применяют специальные конструкции - расходомерные участки с двумя встроенными турбинными расходомерами. Для выравнивания потока жидкости перед датчиком расходомерные участки снабжаются специальными выравнивающими устройствами, что позволяет сократить длину прямолинейного участка трубопровода перед расходомером.

Электромагнитные расходомеры Электромагнитные расходомеры предназначены для измерений объемного расхода электропроводных жидкостей.

Основные преимущества расходомеров:

- применение для измерения расхода агрессивных сред;
- достаточно высокая точность измерения;
- малые потери давления.

Расходомеры данного типа используются на стендах для измерения расхода воды и технологических жидкостей.

Расходомер основан на принципе появления Э.Д.С. в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля. Причем величина Э.Д.С. пропорциональна скорости движения проводника. При этом направление тока, возникающего в проводнике,

перпендикулярно направлению движения проводника и направлению магнитного поля.

Схема электромагнитного расходомера приведена на рис. 3.13.

Расходомер состоит из двух катушек, создающих магнитное поле, и двух электродов для съема Э.Д.С.

Сигнал с электродов усиливается и фильтруется, на выходе получаем сигнал, пропорциональный величине расхода.

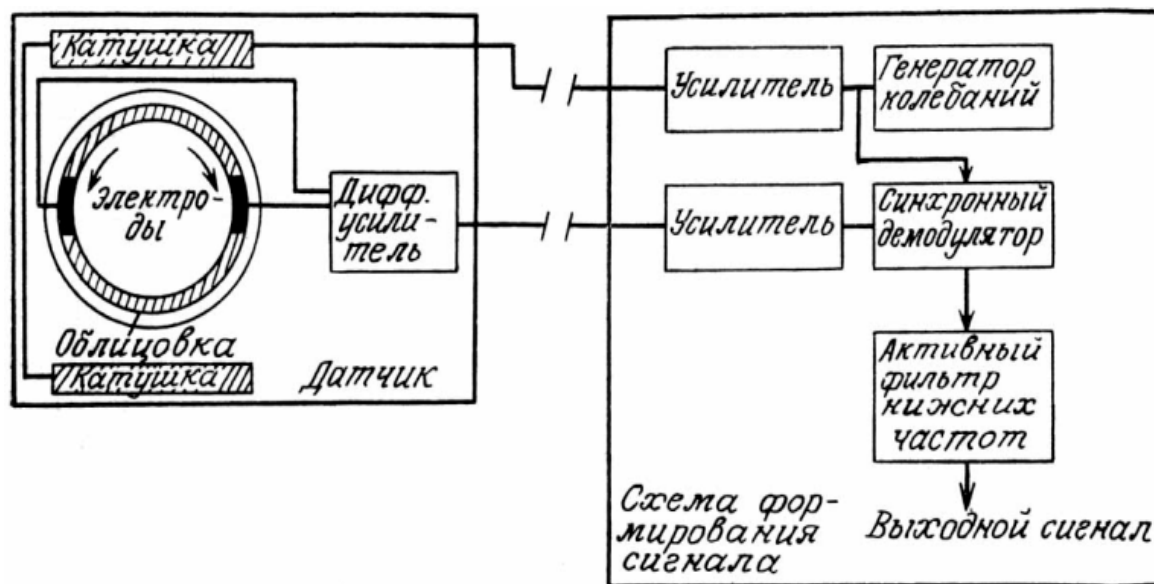


Рис 3.13. Электромагнитный расходомер и схема формирования сигнала

В качестве примера расходомера электромагнитного на [рис.3.14](#) приведен расходомер серии 8700 фирмы Метран

Расходомер электромагнитный серии 8700 состоит из датчика расхода и преобразователя. Датчик устанавливается непосредственно в трубу бесфланцевым или фланцевым соединением. В датчик вмонтированы две катушки индуктивности и два электрода для съема сигнала. Сигнал с электродов усиливается и преобразуется в преобразователе. Внутренняя поверхность трубы датчика покрывается неэлектропроводным материалом.

Предел основной допускаемой погрешности датчика $\pm 0,5 \%$.

Вихреакустические расходомеры. Суть вихревого метода измерения расхода состоит в измерении скорости потока путем определения частоты образования вихрей за телом обтекания, установленным в проточной части преобразователя расхода. На рис. 3.15 приведена схема вихревого расходомера.

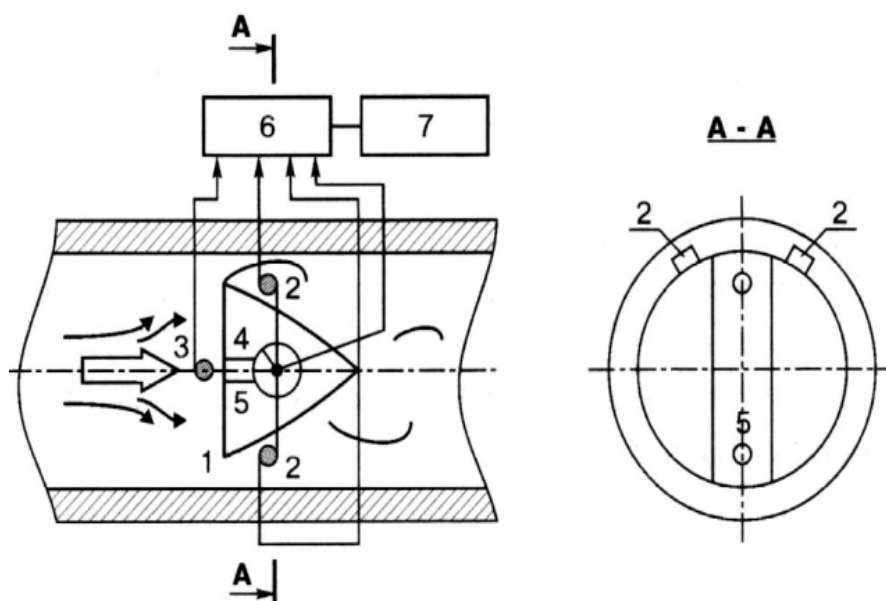


Рис. 3.15 Схема, поясняющая принцип действия вихреакустического Расходомера

Расходомер состоит из следующих основных частей:

- тела обтекания 1;
- двух пьезоэлектрических преобразователей 2;
- измерителя избыточного давления в точке перед телом обтекания 3;
- термопреобразователя платинового 4;
- отверстия 5 для подвода среды к термопреобразователю;
- платы цифровой обработки 6;
- вычислителя 7.

При движении среды в трубопроводе за телом обтекания появляется вихревая дорожка, частота появления вихрей в которой с высокой точностью пропорциональна скорости потока, а, следовательно, и расходу. В свою очередь вихреобразование приводит к появлению за телом обтекания пульсаций давления среды. Частота пульсаций давления идентична частоте вихреобразования и служит мерой расхода. Пульсации давления воспринимаются пьезоэлектрическими датчиками, сигналы с которых в виде электрических колебаний поступают на плату цифровой обработки, где происходит вычисление расхода.

Для учета давления среды и ее температуры измеряется избыточное давление в трубопроводе (с помощью тензорезисторного преобразователя) и температура (с помощью платинового термометра сопротивления).

Плата цифровой обработки и вычислитель проводят обработку сигналов:

- преобразование;
- фильтрацию;
- расчет величины расхода с учетом давления и температуры среды;
- выдачу нормированных сигналов.

Конструкция расходомера, основанного на вихреакустическом принципе, приведена на [рис.3.16](#).

Кориолисовый расходомер. Расходомеры данного типа основаны на принципе инерционного воздействия массы движущейся жидкости или газа на чувствительный элемент.

Расходомеры данного типа имеют высокую точность, не требуют специальных прямолинейных участков и оборудования для формирования потока.

На [рис.3.17](#) приведена схема, поясняющая принцип действия и конструкцию расходомера.

Чувствительным элементом расходомера являются две трубки. По ним движется поток жидкости, который разделяется в трубках на две равные части.

Около трубок установлены задающие катушки, которые заставляют эти трубки колебаться в противоположном направлении.

При отсутствии расхода на детекторах (см. рис. 3.15) формируются синусоидальные сигналы с одинаковой фазой.

При движении измеряемой среды через колеблющиеся расходомерные трубки возникает эффект Кориолиса - возникает кориолисовое ускорение, а, следовательно, кориолисова сила. Эта сила направлена против движения трубки, приданного ей задающей катушкой.

В результате воздействия кориолисовой силы на трубки они изгибаются под действием кориолисовой силы, в результате на детекторах (входном и выходном) появляется сдвиг фаз. Величина изгиба, величина сдвига фаз прямо пропорциональна массовому расходу жидкости. Подсчитывается интервал времени, равный сдвигу фаз сигналов детекторов. Интервал сдвига во времени между сигналами входного и выходного детекторов прямо пропорционален массовому расходу.

Примером кориолисового расходомера может служить расходомер Метран - 360 ([рис.3.18](#)).

Расходомер Метран - 360 применяется для измерения массового расхода жидкостей и газов. Основные приведенные погрешности измерений массового расхода составляют для жидкостей до 0,2 %; для газов до 0,5 %.

Расходомер Метран - 360 состоит из:

- датчика расхода;
- измерительного микропроцессорного преобразователя;
- основного процессора;
- фланцев для присоединения к магистрали.

Выходной сигнал - аналоговый токовый ($4 \div 20$ мА) пропорционален массовому расходу. Нижнее и верхнее значения тока соответствуют минимальному и максимальному значениям измеряемого параметра.

Имеется возможность выводить информацию в виде частотно-импульсного сигнала и в цифровом виде.

Кориолисовые расходомеры при стендовых испытаниях газотурбинных двигателей применяются для измерений расхода керосина, масел в газотурбинных двигателях авиационного применения и газового топлива в газотурбинных двигателях наземного применения.

3.6. Датчики измерения усилия от тяги

Испытательный стенд, предназначенный для испытания авиационной техники, должен быть оборудован специальной динамометрической платформой, с помощью которой обеспечивается измерение усилия от тяги. Двигатель размещается на платформе, подвешенной, или установленной на гибких стержнях (лентах).

Существуют различные способы подвески этой платформы, чтобы обеспечить ее свободное перемещение под действием силы от тяги.

При своем перемещении платформа воздействует на измерительные датчики, сигналы с которых преобразуются в цифровую форму с последующим расчетом величины силы от тяги.

Комплект оборудования, предназначенный для измерения силы от действия тяги двигателя, называют силоизмерительной системой.

Основные требования к силоизмерительной системе следующие:

измерение тяги ГТД с погрешностью, указанной в ОСТ 1 01021;

измерение тяги на установившихся и неустойчивых режимах;

измерение (при необходимости) составляющих векторов тяги.

Требования по точности измерения тяги для серийных и опытных двигателей различны:

для ГТД серийного производства - $\pm 0,5\%$ от измеряемого значения;

для ГТД опытного производства - $\pm 0,3\%$ от измеряемого значения.

Под измеряемым значением понимается диапазон от максимального значения тяги до 0,5 значения тяги на бесфорсажном режиме. В остальном диапазоне с относительной погрешностью в % от максимального значения тяги.

Функциональная схема системы измерения тяги газотурбинного двигателя приведена на рис. 3.19.

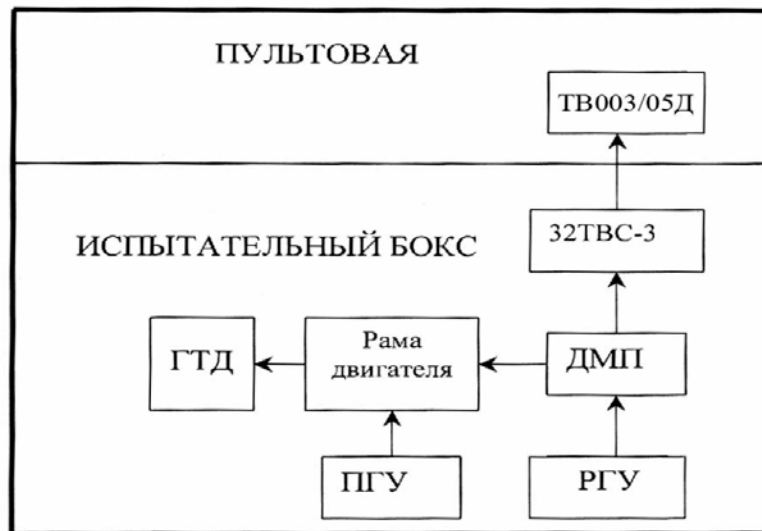


Рис. 3.19. Функциональная схема силоизмерительной системы стенда испытания двигателя НК-93

На рис. 3.19 приняты следующие сокращения:

ГТД - газотурбинный двигатель;

ДМП - динамометрическая платформа;

РГУ - рычажно градуировочное устройство;

ПГУ - поверочное градуировочное устройство;

32ТВС - датчик измерения усилия от тяги;
ТВ003/05Д - преобразователь.

Газотурбинный двигатель закреплен на раме и установлен на динамометрическую платформу, в данном случае подвешенную на 4-х гибких лентах. Благодаря этому она может перемещаться под действием силы от тяги.

Рычажно-градуировочное устройство состоит из эталонных грузов и системы рычагов, передающих усилие на динамометрическую платформу. Это устройство позволяет провести градуировку измерительного канала непосредственно перед испытанием.

Под действием рычажного градуировочного устройства динамометрическая платформа смещается и воздействует на тензорезисторный датчик ТВС. Сигнал с датчика поступает далее на преобразователь ТВ003/05Д, а с него на ПЭВМ, где происходит расчет градуировочной характеристики.

Кинематическая схема силоизмерительной системы приведена на [рис.3.20](#).

Измерение силы от тяги ГТД относится к виду прямых измерений и проводится методом непосредственной оценки измеряемой величины по результатам наблюдений, полученным в процессе испытаний.

Усилие от тяги двигателя воздействует на динамометрическую платформу, которая, смещаясь, воздействует на датчик.

При действии силы происходит упругая деформация чувствительного элемента датчика. Изменяется омическое сопротивление резисторов, включенных в тензометрический мост. В результате тензометрический мост разбалансируется, и на его выходе появляется напряжение, пропорциональное приложенной силе. Напряжение преобразуется в цифровой код, который поступает в систему контроля параметров ГТД.

Измерения на двигателе выполняются после выдержки двигателя на заданном режиме испытания в соответствии с программой на испытание и технологией его проведения.

Конструкция тензорезисторного датчика типа ТВС приведена на рисунке 3.21. Принцип работы этого датчика основан на преобразовании деформации упругого элемента в электрический сигнал, пропорциональный измеряемой нагрузке. Тензорезисторы подключаются по схеме электрического моста.

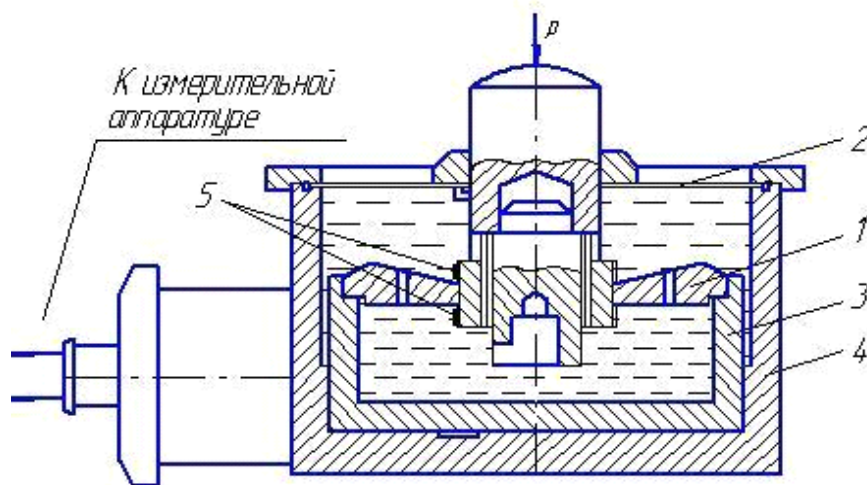


Рис. 3.21. Конструкция датчика тяги ТВС
1-упругий элемент, 2-мембрана, 3-подставка, 4- корпус, 5- тензорезисторы

Упругий элемент 1 силоизмерителя опирается на подставку 3, выполненную в виде

цилиндрической призмы. Деформация изгиба при приложении нагрузки передается тензорезисторам 5, вызывая растяжение нижних и сжатие верхних тензорезисторов, что изменяет их электрическое сопротивление. Все четыре плеча моста активны.

Это увеличивает чувствительность датчика и позволяет получить линейное уравнение связи усилия с выходным электрическим сигналом в виде напряжения постоянного тока.

С целью защиты тензорезисторов от влаги и газов чувствительный элемент силоизмерителя заключен в герметичный корпус 4, который заполняется кремнийорганической жидкостью для защиты тензорезисторов от влаги и для смазки опорных поверхностей. Герметизация полости осуществляется посредством мембраны 2.

Датчики типа ТВС выпускаются на разные диапазоны измерения силы. Максимальная величина измеряемого усилия 320 кН. Номинальное выходное напряжение датчика 50 мВ

Датчик типа ТВС позволяют измерять тягу двигателя с погрешностью не более 0,3 %.

3.7. Датчики измерения крутящего момента

При проведении стендовых приемо-сдаточных и исследовательских испытаний важным параметром для оценки характеристик ТВД, ТВВД, и ГТД является их мощность.

При эксплуатации ГТД наземного применения в составе газотранспортных установок необходимо периодически оценивать основные технологические показатели газоперекачивающих агрегатов (ГПА): мощность газотурбинной установки (ГТУ), эффективный К.П.Д., коэффициенты технического состояния газовоздушной проточной части и др.

Главным показателем из них является фактическая мощность агрегата на режиме. Остальные параметры в той или иной степени являются производными от мощности.

Существует ряд методов измерения мощности (крутящего момента):

расчетный метод на основе измерения параметров гидро или пневмотормоза, используемого в качестве нагрузки;

метод прямого измерения крутящего момента с помощью специальных измерителей (датчиков).

В настоящее время разработаны конструкции бесконтактных измерителей крутящего момента.

Большинство датчиков работает на принципе измерения угла скручивания гибкого вала. Такие датчики называют торсиометрами.

На рис. 3.22 приведена схема, поясняющая принцип работы датчика крутящего момента.

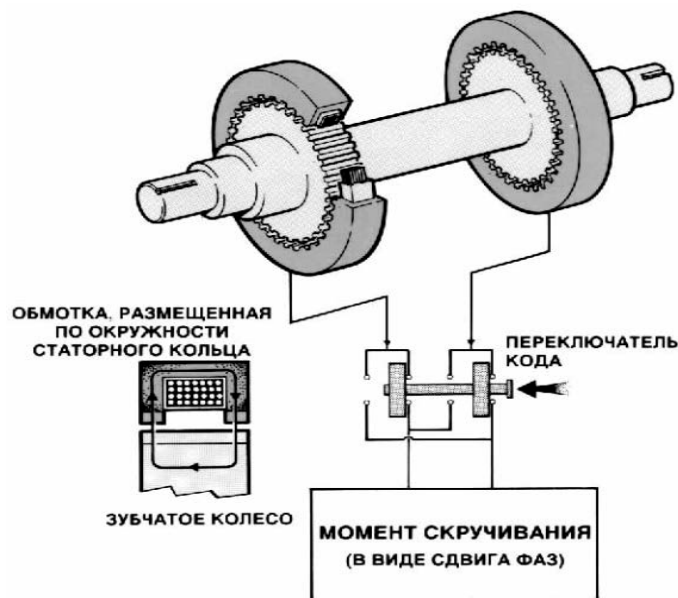


Рис. 3.22. Схема, поясняющая принцип действия датчика крутящего момента

С помощью обмоток, расположенных над зубчатыми фланцами, при вращении вала вырабатываются синусоидальные сигналы. При скручивании вала под действием крутящего момента между синусоидальными сигналами, поступающими от обмоток, возникает сдвиг фаз, величина которого пропорциональна крутящему моменту. Измеряя сдвиг фаз можно определить величину крутящего момента.

Обычно, при работе с конструкциями, работающими в непрерывном режиме (работа торсиометра в составе стендового оборудования, или в составе ГПА), скручивание вала не превышает $0,5 \div 1^\circ$. При соответствующем подборе преобразующей аппаратуры это обеспечивает общую погрешность измерения не хуже $0,5 \div 1\%$, что точнее широко

применяемых расчетных методов, основанных на определении потерь, например, в пневмотормозе.

Торсиометр представляет собой вал, встраиваемый между газотурбинным двигателем и нагрузкой. Статорная часть опирается на одну из частей установки (рама стенда, рама двигателя). Радиальный зазор между статором и ротором составляет обычно 3 мм.

Как видно из [рис.3.23](#), в конструкции практически отсутствует электроника, съем данных - бесконтактный. В торсиометре установлена только измерительная катушка.

Предусмотрен ряд мероприятий, устраняющих влияние осевых, параллельных и угловых перемещений конструкций: установлена стандартная гибкая муфта и гибкие элементы конструкции.

Отсутствие электроники в составе торсиометра позволяет применять его в достаточно жестких температурных, вибрационных условиях.

Электроника вынесена за пределы зоны установки ГТД. Работа торсиометра на малых углах скручивания гибкого вала позволяет длительно сохранять постоянную жесткость вала, а, следовательно, и характеристики торсиометра.

3.8. Датчики измерения зазоров, перемещений

Улучшение характеристик газотурбинного двигателя, как по параметрам, так и по надежности невозможно без контроля реальных величин зазоров и перемещений по тракту ГТД.

Зазор между статором и концевым элементом рабочих лопаток компрессоров и турбин определяет экономичность и эффективность ГТД.

При этом малые зазоры, улучшающие характеристики двигателя, могут привести к снижению надежности и даже привести к поломке материальной части.

Большие зазоры могут резко ухудшить характеристики двигателя за счет перетекания рабочего тела через площадь зазора. По эмпирическому соотношению зазор шириной в 1 % от длины лопатки приводит к 1 % потерь по к.п.д.

При проведении измерений зазоров и перемещений конструкций используют обычно датчики специальной разработки.

В качестве примера ниже приведены технические характеристики системы измерения радиальных зазоров в винтовентиляторе двигателя НК-93. Основу системы составляют вихретоковые датчики.

Вихретоковый датчик имеет чувствительный элемент в виде одного витка провода, выродившегося в отрезок провода между двумя токопроводами. В сечении винтовентилятора находится 4 симметрично расположенных датчика.

Для уменьшения величины погрешности от изменения температуры чувствительного элемента в контролируемой точке устанавливаются два датчика рядом, либо 2 датчика монтируются в одном корпусе - один датчик рабочий, другой - для целей компенсации температурной зависимости.

Чувствительный элемент датчика, основанного на одновитковых вихретоковых преобразователях, сохраняет свою работоспособность до высоких температур (1000°C) и не чувствителен к содержанию в среде масел, продуктов горения, паров воды и частиц пыли. Это позволяет использовать датчики для измерения зазоров в турбине.

Преобразующая часть датчика вынесена за пределы корпуса двигателя. Здесь размещается электронная часть системы: измерительная катушка и электронный преобразователь.

Датчик ОВТД-ВВ в разрезе показан на [рис.3.23](#). Конструкция ОВТД-ВВ содержит в одном корпусе два плеча - рабочее и компенсационное, каждое из которых, в свою очередь, содержит согласующий трансформатор, ЧЭ и укороченные тоководы, осуществляющие гальваническую связь согласующего трансформатора и ЧЭ в каждом плече датчика. Укороченные тоководы представляют собой изолированные друг от друга соосные цилиндры, причем, как в рабочем, так и в компенсационном плече датчика, наружные цилиндры образуют защитный корпус. К торцам лопастей ВВ обращен открытый ЧЭ рабочего плеча, а ЧЭ компенсационного плеча экранирует заглушка, приваренная к корпусу датчика на заданном расстоянии от ЧЭ. Индуктивность ЧЭ (первичной обмотки согласующего трансформатора) рабочего плеча зависит от смещений лопастей ВВ в зоне чувствительности датчика, в то время как индуктивность ЧЭ компенсационного плеча остается без изменений.

Наибольшие изменения естественного выходного сигнала датчика - индуктивности L в рабочем диапазоне ($X_p=Y_p=Z_p=17$ мм, $\varphi_{Yp}=37$ град.) достигают 15 мкГн. Внешний вид датчика ОВТД-ВВ-15 показан на рис. 3.24 а.

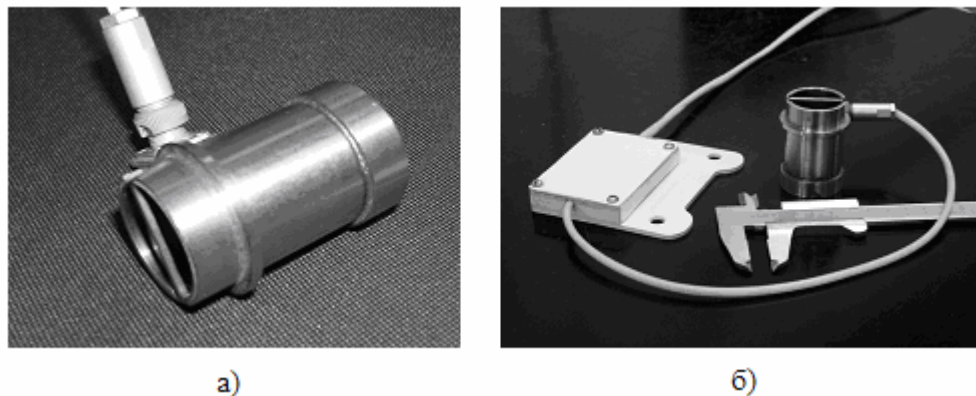


Рис. 3.24. Внешний вид датчика ОВТД-BB-15 (а) и преобразователя СУ-02 (с тем же датчиком) (б)

Преобразователи сигналов (см. рис. 3.24б) построены на основе известного метода первой производной [1], имеют идентичную структуру и схемотехнику. Метод предусматривает возбуждение LR -моста, включающего рабочее и компенсационное плечи ОВТД (согласующие трансформаторы СТ и ЧЭ) и образцовые резисторы, короткими прямоугольными импульсами, дифференцирование напряжений на резисторах (дифференцирующий усилитель ДУ) и фиксацию максимума напряжений на выходе ДУ в усилителе выборки-хранения (УВХ) ([рис.3.25](#)). Прямоугольные импульсы, питающие мост измерительной цепи длительностью около 0.2 мкс, формируются путем бесконтактной коммутации (ключ K) цепи источника постоянного напряжения (E). Управление ключом осуществляет генератор импульсов (I), причем частота импульсов постоянна и составляет около 70 кГц. Импульсы генератора (I) в каждом преобразователе могут быть использованы для синхронизации мультиплексора и АЦП в плате L-783, а также для синхронизации импульсного возбуждения LR -мостов с ОВТД в других аналогичных преобразователях (если таковые имеются в составе системы).

Следует также отметить, что преобразователь сигналов содержит датчик температуры (ДТ) ([рис.3.25](#)), расположенный внутри корпуса преобразователя на плоской алюминиевой панели, которая крепится к оболочке статора в непосредственной близости от ОВТД.

Температура панели соответствует температуре ОВТД (Θ), а сигнал ДТ может быть использован для температурной коррекции.

Схема датчика ОВТД-BB представлена на рис. 3.26.

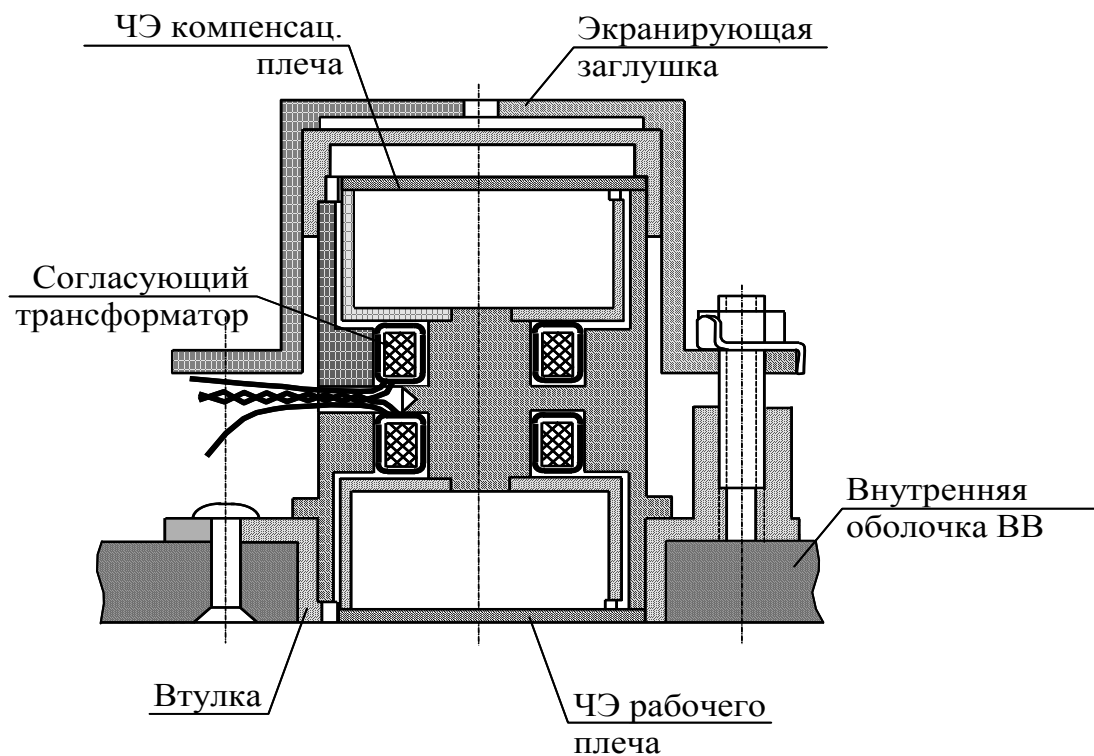


Рис. 3.26. Схема датчика ОВТД ВВ в разрезе:
ОВТД ВВ - одновитковый вихретоковый датчик винтовентилятора.;
СУ - согласующие устройство; *ЧЭ* - чувствительный элемент.

Сигналы с измерительной катушки подаются на усилитель, а затем на преобразователь и вводятся в ПЭВМ, где осуществляется расчет величины зазора.

На [рис.3.27](#) приведена схема соединений элементов системы измерения радиальных зазоров на винтовентиляторе двигателя НК-93.

В 4-х точках статора винтовентилятора установлено 4 датчика, соединенных с помощью разъемов с 4-мя усилителями - преобразователями. Усиленный сигнал далее поступает на АЦП системы измерения радиальных зазоров.

3.9. Зонды измерения пульсаций давления газовых сред

Необходимость измерения пульсаций давления в элементах проточной части ГТД не вызывает сомнений, так как информация о пульсационном состоянии газового потока широко используется при оценке запаса газодинамической устойчивости компрессора и исследовании процессов горения в камере сгорания.

Особенно важными становятся вопросы оценки уровня пульсаций давления в камере сгорания. Это связано, прежде всего, с тем, что доводка камеры сгорания по экологическим характеристикам заставляет работать на режимах, близких к границе устойчивого горения.

При этом могут возникнуть резонансные явления, приводящие к значительному росту уровня пульсаций давления.

При измерении переменных давлений в общем случае на чувствительный элемент датчика воздействует давление

$$p(t) = p_0 + \tilde{p}(t),$$

где p_0 - постоянная составляющая давления;

$\tilde{p}(t)$ - переменная составляющая давления.

Поэтому специальные устройства для измерения пульсаций давления измеряют либо $p(t)$, либо только $\tilde{p}(t)$. Во втором случае используются датчики дифференциальной схемы или пьезокерамические, реагирующие только на переменную часть давления.

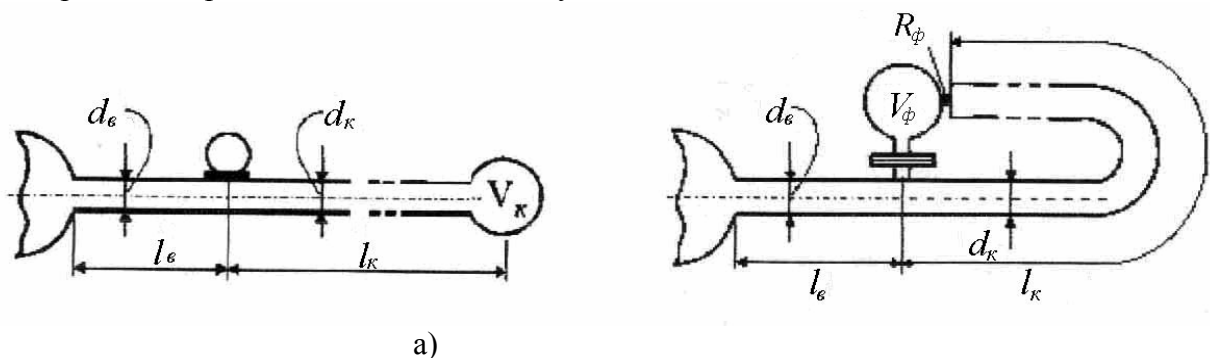
Для обеспечения контроля за уровнем пульсаций давления и его амплитудно-частотным спектром датчик необходимо установить в точке измерения. Однако это не всегда возможно сделать, так как в точке измерения могут быть высокие уровни давления и высокие температуры.

Существуют конструкции датчиков, которые выдерживают температуру до $+700^\circ\text{C}$, но их габариты и низкая точность не всегда позволяют организовать измерения пульсаций давления в тракте ГТД. Другим препятствием установки датчика непосредственно в точку измерения является необходимость разборки двигателя (узла) для постановки или съема датчика, так как из-за их низкой надежности их нельзя устанавливать на длительные сроки.

Поэтому для измерений пульсаций давления чаще используют специальные устройства, которые называют зондами.

Зонд представляет собой конструкцию, состоящую из датчика, вынесенного за пределы оболочки двигателя, узкого трубопроводного канала, с помощью которого датчик подключается к точке измерения, корпуса конструкции и специальных компенсирующих элементов.

На рис. 3.28 приведены схемы зондов пульсаций давления:



б)

Рис. 3.28. Схемы зондов пульсаций давления:
 а) - схема зонда с датчиком абсолютного давления;
 б) - схема зонда с датчиком дифференциального давления.

Обозначения, принятые на рисунке:

d_B, l_B - диаметр и длина волновода;

d_K, l_K - диаметр и длина корректирующего трубопровода;

V_K, V_Φ - компенсирующий объем;

R_Φ - демпфирующий элемент (дрессель).

В качестве волноводов используют трубопроводы с узким сечением. Длина волновода определяется расстоянием от точки измерения до датчика. При этом стараются не удлинять необоснованно длину волновода, так как это приводит к потерям на затухание колебаний.

Диаметр волновода выбирается на основе расчетных и опытных данных в диапазоне $2 \div 6$ мм. Корректирующий трубопровод служит для коррекции амплитудно-частотной характеристики зонда в рабочем диапазоне частот.

На [рис.3.29](#) приведена конструкция зонда для измерения пульсаций давления на входе в компрессор низкого давления.

Зонд состоит из волновода 1, фланца для крепления к корпусу двигателя 2, корпуса зонда с датчиком ДМИ 3, корректирующей линии 4 и измерительного кабеля 5.

В данной конструкции применен дифференциальный датчик давления типа ДМИ на диапазон измерения пульсаций давления, равный 30 кПа

Датчик ДМИ встроен в корпус и имеет два входа, на один вход подается давление $p(t)$ непосредственно от волновода, на другой конец подается давление p_0 с выхода корректирующей линии. Таким образом, на мембрану датчика воздействует переменная составляющая давления $\tilde{p}(t)$.

$$\tilde{p}(t) = p(t) - p_0.$$

ГЛАВА 4. УСТРОЙСТВА СВЯЗИ С ОБЪЕКТОМ (УСО)

УСО - одно из наиболее важных устройств в АСИ ГТД. Оно обеспечивает связь датчиков с ЭВМ и ЭВМ с исполнительными механизмами. УСО осуществляет преобразование электрических сигналов в цифровой код и цифровой код в электрические сигналы.

УСО функционально расположено между датчиками, агрегатами управления и компьютером. Современные УСО строятся на базе конструктивных элементов, которые выполняют определенные функции. В зависимости от конкретных особенностей АСИ УСО может включать в себя различные блоки, например:

коммутаторы и мультиплексоры - для последовательного подключения датчиков к элементам измерительной системы;

нормализаторы - для получения электрических сигналов требуемого уровня;

формирователи - для получения требуемой формы электрических сигналов;

АЦП - для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код;

ЦАП - (для преобразования цифрового кода в электрические сигналы;

таймеры - электронные часы для фиксации требуемых интервалов времени и управления блоком УСО;

генераторы - для получения сигналов заданной частоты;

счетчики - для подсчета количества электрических импульсов;

преобразователи питания - для получения напряжения питания требуемой величины).

Еще несколько лет назад функциональные элементы: коммутаторы, аналого-цифровые преобразователи (АЦП) выполнялись в виде отдельных плат или блоков, то сейчас функциональный элемент – плата (модуль) представляет собой сложную конструкцию, состоящую из коммутатора, АЦП, усилителя, нормализатора, а в ряде случаев и микропроцессора. Обычно плату (модуль) устройства связи с объектом конструируют для выполнения определенной функции в составе УСО, например:

- ввод сигналов с термопар;
- ввод сигналов с термометров сопротивления;
- ввод частотных сигналов (например, с датчиков частоты вращения);
- ввод сигналов с датчиков с унифицированным выходом ($4 \div 20$ мА, $0 \div 10$ В, $0 \div 5$ В);
- вывод аналоговых сигналов ($0 \div 5$ мА, $4 \div 20$ мА, $0 \div 10$ В, $0 \div 5$ В);
- выдача команд в виде замыкания контактов или сигналов тока, напряжения и др.

В настоящее время промышленность России выпускает достаточно широкий набор элементов УСО, позволяющих контролировать весь объем параметров, измеряемых в процессе испытания газотурбинных двигателей.

При выборе модулей (плат, блоков) УСО следует обращать внимание, прежде всего, на следующие характеристики:

- метрологические;
- надежность;
- ремонтпригодности.

При наличии специальных требований по искро и взрывобезопасности следует выбирать элементы УСО, отвечающие этим требованиям.

4.1. Основные функциональные элементы модулей УСО

Коммутатор предназначен для последовательного подключения к измерительной цепи, состоящей из нормализатора, усилителя, аналогово-цифрового преобразователя и датчиков.

Обычно коммутаторы выполняются на 8, 16, 32, 64 входных канала. Увеличение числа входов нецелесообразно из-за сильного замедления процесса коммутации. Коммутаторы обычно состоят из двух узлов: переключателя и узла управления. Переключатели разделяют на две группы:

- механические переключатели;
- электронные переключатели.

Достоинство всех механических переключателей в том, что они осуществляют передачу электрических сигналов без искажений.

Герметичные контакты магнитоуправляемые (герконы) в стеклянной трубке производят переключение от внешнего магнитного поля, создаваемого катушкой.

Недостатками механических переключателей является низкая частота переключения в пределах 5...15 Гц.

Электронные переключатели с использованием транзисторов имеют значительно большую частоту переключения, где переключение производится при подаче напряжения на базу транзистора. При этом сопротивление транзистора резко падает и через участок эмиттер-коллектор потечет ток. Такие устройства имеют очень малое быстродействие, но всегда в той или иной степени искажают электрический сигнал и поэтому требуют периодической калибровки.

Электронные переключатели, управляемые от ЭВМ или сигналами с командного блока называются мультиплексорами.

Основным элементом коммутатора является ключ. На [рис.4.1](#) приведена схема коммутатора с параллельным соединением ключей.

В такой схеме один из входных каналов открыт, остальные закрыты. Сигнал, поступающий на вход открытого канала, искажается за счет конечного сопротивления закрытых ключей. Кроме того, происходит падение напряжения на открытом ключе, что также искажает сигнал. С увеличением числа коммутируемых каналов влияние конечного сопротивления закрытых ключей увеличивается. Для уменьшения этого влияния применяют схему пирамидального (двухступенчатого) коммутатора, приведенную на [рис.4.2](#).

В пирамидальной схеме параллельно включенных входных каналов значительно меньше. Но и эта схема имеет недостатки - увеличивается количество открытых ключей, в данном случае 2 (на 1-ой и 2-ой ступенях коммутации), что приводит к увеличению погрешности.

Существуют и другие схемы коммутаторов, например, матричные, в которых упрощается управление, но увеличивается погрешность.

Все выше перечисленные схемы коммутации делятся на два вида по применяемым ключам:

- бесконтактные ключи;
- контактные ключи.

Бесконтактные ключи - строятся на базе, например, транзисторов, а контактные - на базе магнитоуправляемых реле.(герконы)

В настоящее время более широко используются бесконтактные ключи, так как обладают более высоким быстродействием и хорошими электрическими характеристиками.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) предназначены для преобразования аналоговых сигналов, поступающих с датчиков, в цифровой код, пропорциональный величине входного сигнала. Существуют следующие виды АЦП:

последовательного счёта; поразрядного уравнивания; с динамической компенсацией и следящий АЦП.

Дискретизация - это переход от непрерывной функции к прерывистой, или дискретной. Чаще всего при измерении формируются сигналы с непрерывной функцией, а обработка проводится цифровыми дискретными средствами. Поэтому необходимо преобразовать аналоговую форму сигнала в цифровой эквивалент. Этот процесс можно осуществлять в виде фиксации мгновенных значений исходного сигнала.

Амплитуда импульсов при этом соответствует мгновенным значениям функции, взятым в моменты t_1, t_2, \dots, t_n . Длительность импульса t - время фиксации сигнала. Частота фиксации $f\phi$ выбирается из соотношения теоремы Котельникова:

$$f\phi = 2 F_{max}$$

где F_{max} - максимальная частота в спектре частот сигнала.

В результате получаем последовательность псевдонепрерывных уровней, огибающая которых воспроизводит исходный сигнал.

Другим способом дискретизации является дискретизация на переменной частоте. В этом случае интервал T между двумя импульсами дискретизации не постоянен, а зависит от скорости входной величины.

Дискретизация аналоговых сигналов осуществляется посредством коммутаторов.

Результат любого измерения в конечном итоге выражается числом, которое в АСИ должно быть не только прочитано, но и храниться до перезаписи на долговременное запоминающее устройство. Поэтому в АСИ широко используются блоки, называемые счетчиками или счетными регистрами.

Счет чики применяются для подсчета электрических импульсов и временного хранения конкретных результатов.

Основу счетчика составляет цепочка триггера. Триггер - устройство, которое может сколь угодно долго находиться в одном из двух устойчивых состояний и скачкообразно переходить из одного состояния в другое под действием внешнего сигнала.

Устойчивое состояние триггера характеризуется наличием или отсутствием на его выходе электрических сигналов. Эти состояния триггера принято выражать двоичным числом. Например, отсутствие электрического сигнала на выходе триггера соответствует состоянию «0», наличие электрического сигнала соответствует состоянию «1» (или наоборот).

Элементной базой триггеров в настоящее время являются полупроводниковые приборы (транзисторы). Первые триггеры на электронных лампах были предложены Михаилом Александровичем Бонч - Бруевичем в 1918 г.

Триггеры могут работать совместно с логическими электронными схемами, которые называются логическими триггерами.

Логическое умножение (конъюнкция).

запись операции

$$x_1 \wedge x_2 = y$$

название электронной схемы

СХЕМА «И»

содержание операции

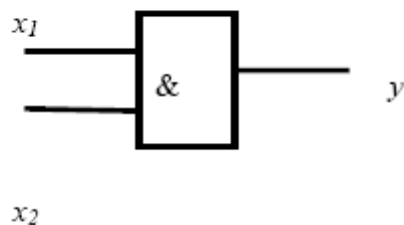
1 1 1

1 0 0

0 1 0

0 0 0

обозначение схемы



Логическое сложение (дизъюнкция)

запись операции

$$x_1 \vee x_2 = y$$

СХЕМА «ИЛИ»

содержание операции

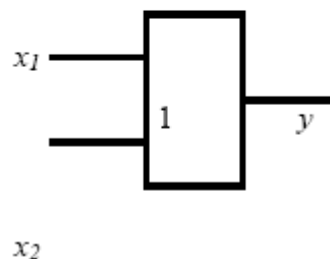
1 1 1

1 0 1

0 1 1

0 0 0

обозначение схемы



Логическое отрицание (инверсия)

запись операции

$$x \rightarrow y$$

СХЕМА «НЕ»

обозначение схемы

содержание операции

0 1

1 0

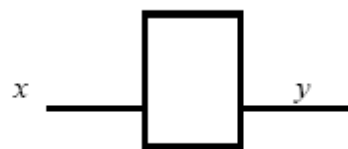
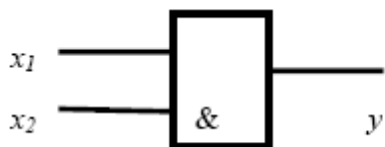
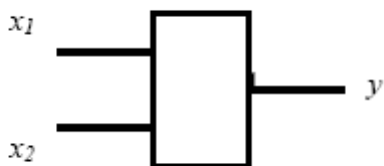


Схема «НЕ» применяется главным образом в сочетании со схемами «И» и «ИЛИ». Подключив схему «НЕ» на выход схемы «И» и «ИЛИ» получим схемы «И - НЕ»



x_1	x_2	y
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

«ИЛИ - НЕ



x_1	x_2	y
1	1	0
1	0	0
0	1	0

Цепочка последовательно соединенных логических триггеров составляют основу счетного регистра. В счетном регистре каждый последующий триггер запускается от предыдущего в момент перехода триггера из состояния «1» в состояние «0» (рис. 4.3).

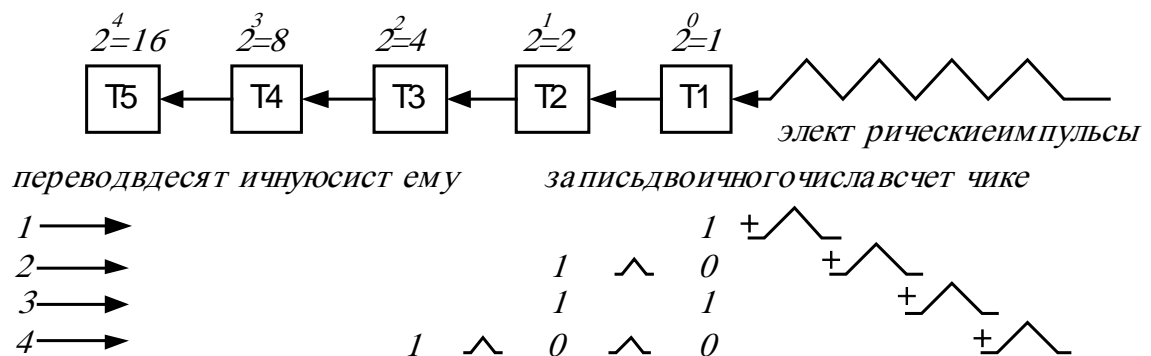


Рис. 4.3. Блок-схема счетчика

Счетчик состоит из нескольких последовательно соединенных триггеров. Каждый триггер соответствует определенному разряду в двоичной системе счисления (T1 - разряд единиц, T2 - разряд двоичных десятков, T3 - разряд двоичных сотен и т.д. В переводе в десятичную систему: двоичный десяток $2^1 = 2$, двоичная сотня $2^2 = 4$, двоичная тысяча $2^3 = 8$ и т.д.

Величина числа, которое может быть записано в счетчике ограничивается количеством его разрядов (триггеров). Если число разрядов счетчика 5, то максимальное число, которое может быть в нем записано - 31. Если число разрядов 10, то - 1023 и т.д.

Перед началом работы счетчика в его разрядах находятся нули. Первый электронный импульс пришедший на счетчик меняет состояние первого триггера T1 - в нем появляется «1», второй электронный импульс меняет состояние триггера T1 на противоположное - «0», но при этом от триггера T1 запускается триггер T2 - он меняет свое состояние на 1 и т.д.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) предназначены для преобразования аналоговых сигналов, поступающих с датчиков, в цифровой код, пропорциональный величине входного сигнала. Существуют следующие виды АЦП:

последовательного счёта; поразрядного уравнивания; с динамической компенсацией и следящий АЦП.

Дискретизация - это переход от непрерывной функции к прерывистой, или дискретной. Чаще всего при измерении формируются сигналы с непрерывной функцией, а обработка проводится цифровыми дискретными средствами. Поэтому необходимо преобразовать аналоговую форму сигнала в цифровой эквивалент. Этот процесс можно осуществлять в виде фиксации мгновенных значений исходного сигнала.

Амплитуда импульсов при этом соответствует мгновенным значениям функции, взятым в моменты t_1, t_2, \dots, t_n . Длительность импульса t - время фиксации сигнала. Частота фиксации $f\phi$ выбирается из соотношения теоремы Котельникова:

$$f\phi = 2 F_{max}$$

где F_{max} - максимальная частота в спектре частот сигнала.

В результате получаем последовательность псевдонепрерывных уровней, огибающая которых воспроизводит исходный сигнал.

Другим способом дискретизации является дискретизация на переменной частоте. В этом случае интервал T между двумя импульсами дискретизации не постоянен, а зависит от скорости входной величины. Дискретизация аналоговых сигналов осуществляется посредством коммутаторов.

В качестве примера, рассмотрим схему АЦП последовательного счета, блок-схема которого показана на рис. 4.4.

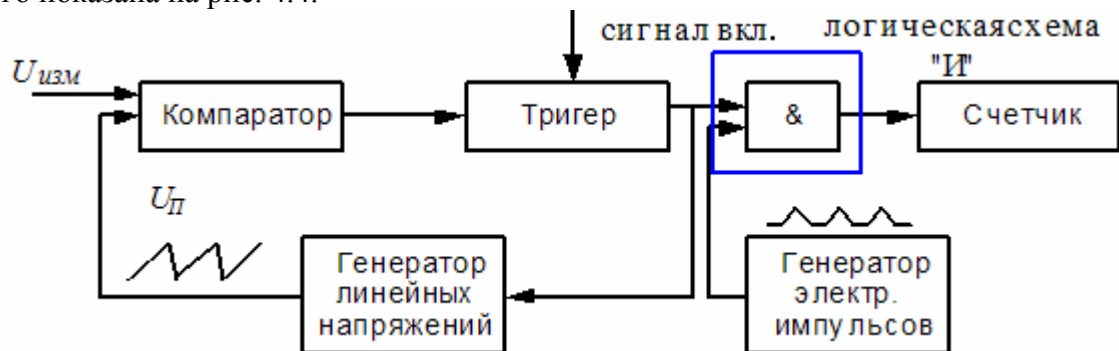


Рис. 4.4. Блок-схема АЦП последовательного счета

В состав данного устройства входят следующие блоки:

Компаратор (от английского compare - сравнивать) - электронное устройство для сравнения величин двух электрических сигналов. На выходе из компаратора появляется электрический сигнал только в том случае, если $U_{изм} < U_{П}$.

Генератор линейных напряжений - генерирует пилообразное напряжение $U_{П}$ (напряжение $U_{П}$ увеличивается от нуля по линейному закону. Достигнув определённой величины, оно скачком уменьшается до нуля, и цикл повторяется).

Генератор электрических импульсов - вырабатывает высокочастотные электрические сигналы.

При подаче сигнала вкл. на выходе из триггера появляется электрический сигнал («1»). При этом запускается генератор линейных напряжений. Он начинает генерировать один из зубцов пилы (напряжение $U_{П}$ начинает увеличиваться).

Логическая схема «И» пропускает на счетчик электрические импульсы от генератора

электрических импульсов. Счетчик подсчитывает их количество. Тем временем пилообразное напряжение U_{Π} , постепенно увеличиваясь достигает величины измеряемого напряжения $U_{ИЗМ}$, т.е. $U_{\Pi} = U_{ИЗМ}$. В этот момент на выходе из компаратора появляется электрический сигнал. Он переводит триггер в противоположное состояние («0»), при этом на выходе из триггера электрический сигнал исчезает.

Схема «И» перестает пропускать электрические сигналы с генератора электрических импульсов. Так как время, в течение которого схема «И» пропускала электрические импульсы с генератора электрических импульсов пропорционально величине $U_{ИЗМ}$, то и число, зафиксированное счетчиком, будет пропорционально величине $U_{ИЗМ}$.

Временная диаграмма работы АЦП последовательного счета показана на [рис.4.5](#).

АЦП *уравновешивающего преобразования* имеют общую отрицательную обратную связь с выхода на вход - х (СУ) через преобразователь обратной связи (ПОС).

АЦП *уравновешивающего преобразования* имеют более высокую точность, но быстродействие меньше, чем у АЦП прямого преобразования. Наиболее часто применяются АЦП *следающего уравновешивания* ([рис.4.6](#)), отличающиеся тем, что сравнение измеряемой величины x с компенсирующей величиной y производится непрерывно, и устройство управления (УУ) через преобразователь ПОС изменяет y в функции времени до тех пор, пока не будет достигнуто с заданной точностью равенство этих величин. В этот момент происходит регистрация величины кода.

Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) используются для преобразования числа, записанного в счетном регистре в аналоговый электрический сигнал.

Величина аналогового электрического сигнала пропорциональна записанному в регистре числу.

Принцип работы практически всех модификаций ЦАП основан на поразрядном суммировании токов с помощью ключей, управляемых счетным регистром, рис. 4.7.

В данной схеме ЦАП величина сопротивления $R_0 \ll R_i, i = 1, 5$.

Тогда $I_i = U_0 / R_i$; $U_{ВЫХ} = I_i R_0 = U_0 R_0 / R_i$

Подадим на вход счетчика один электрический импульс. Тогда триггер Т1 перейдет в состояние «1». Будет запитан электромагнит, который включит ключ Кл1. При этом $R_i = R_1$ $U_{ВЫХ1} = U_0 R_0 / R_1$.

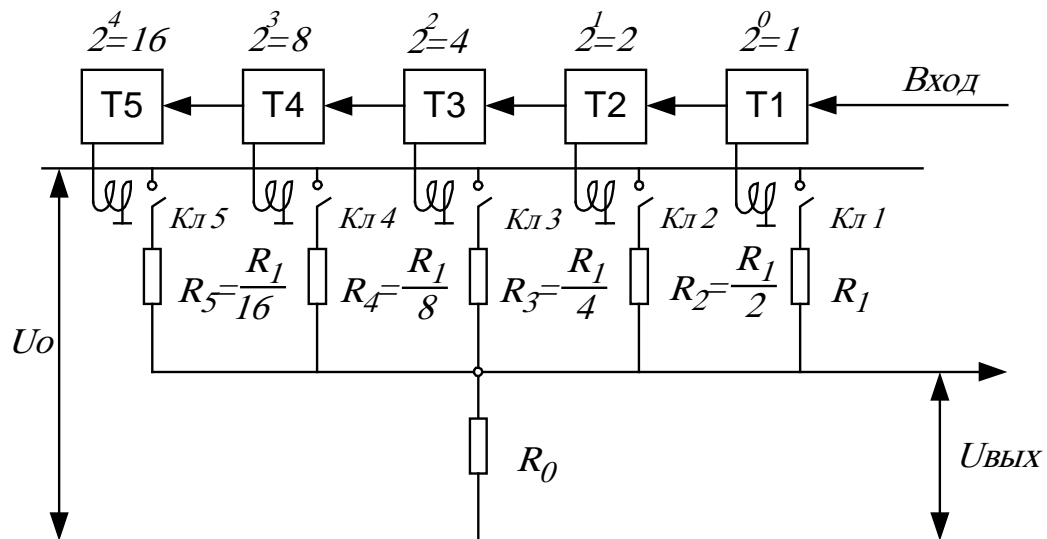


Рис. 4.7. Структурная схема ЦАП с поразрядным суммированием токов

В данной схеме ЦАП величина сопротивления $R_0 \ll R_i, i = 1, 5$.

Тогда $I_i = U_O / R_i$; $U_{\text{ВЫХ}} = I_i R_O = U_O R_O / R_i$

Подадим на вход счетчика один электрический импульс. Тогда триггер Т1 перейдет в состояние «1». Будет запитан электромагнит, который включит ключ Кл1. При этом $R_i = R_1$, $U_{\text{ВЫХ}1} = U_O R_O / R_1$.

Подадим второй импульс. Тогда Т1 перейдет в состояние «0», кл1 разомкнется, при этом триггер Т2 перейдет в состояние «1» и замкнется Кл 2,

тогда $R_i = R_2 = R_1 / R_2$, $U_{\text{ВЫХ}2} = U_O R_O / R_2 = 2 U_O R_O / R_1$, т.е. $U_{\text{ВЫХ}2} = 2 U_{\text{ВЫХ}1}$

Подадим третий импульс. Тогда Т1 вновь перейдет в состояние «1», Т2 в «1» (на счетчике цифра три). Замкнуты Кл1 и Кл2.

$$1/R_i = 1/R_1 + 1/R_2 = 1/R_1 + 2/R_1 = 3/R_1, R_i = R_1 / 3$$

$$U_{\text{ВЫХ}3} = 3 U_O R_O / R_1, U_{\text{ВЫХ}3} = 3 U_{\text{ВЫХ}1} \text{ и т.д.}$$

Т.е. при приходе каждого нового импульса (увеличили на единицу записанного в регистре числа) $U_{\text{ВЫХ}}$ ступенчато увеличивается на величину $U_{\text{ВЫХ}1} = U_O R_O / R_1$.

Таким образом напряжение на выходе ЦАП оказывается пропорциональным числу «К», записанному в счетном регистре, рис. 4.8.

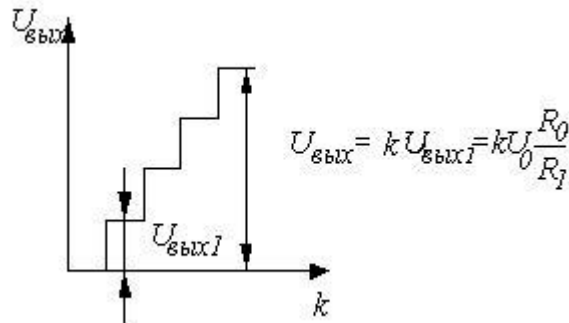


Рис. 4.8. Диаграмма изменения $U_{\text{вых}}$ ЦАП

Для получения линейной характеристики преобразования числа «К» в $U_{\text{ВЫХ}}$ необходимо, чтобы сопротивления R_i находились в пропорции указанной на блок схеме ЦАП.

Подбор этих сопротивлений упрощается на базе одинаковых значений сопротивлений R_1 по схеме $R_2 = R_1 / 2$; $R_3 = R_1 / 4$ и т.д. за счет параллельного их включения.

Преобразователь частоты следования импульсов в код. При испытании ГТД ряд датчиков, используемых для измерения параметров, вследствие их принципа действия имеет на выходе последовательность импульсов, частота следования которых пропорциональна физической величине. К таким параметрам двигателя относятся, прежде всего:

- частоты вращения роторов двигателя;
- расходы жидкостей (расходомер турбинного типа).

Для преобразования последовательности импульсов в код применяют специальные схемы. На рис. 4.9 приведена блок-схема такого преобразователя.

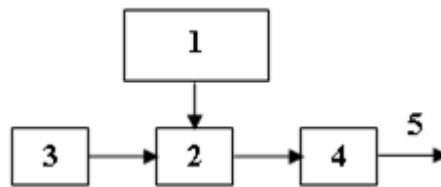


Рис. 4.9. Преобразователь частоты следования импульсов в код

Задатчик интервала времени 1 подает на ключ 2 импульс, соответствующий выбранному интервалу счета (T). Например, мы выбираем интервал счета 1 с.

На второй вход ключа **2** поступают импульсы с датчика **3** с частотой f . Ключ пропускает эти импульсы на вход счетчика **4** только в течение интервала счета (T).

Количество импульсов (N), зафиксированное в счетчике в конце интервала счета T будет равно:

$$N = T \cdot f$$

Если характеристика датчика описывается формулой $Q = k \cdot f$,

где Q - например, расход топлива;

k - коэффициент пропорциональности,

то расход, выраженный через значение N в счетчике, выразится формулой:

$$Q = \frac{k}{T} \cdot N$$

С увеличением выбранного интервала счета T погрешность определения N уменьшается.

Нормализаторы предназначены для приведения нестандартных сигналов, поступающих с датчиков, или агрегатов, в нормализованный вид. Примером простейшего нормализатора может служить делитель на резисторах.

Пример: прибор с выходным сигналом $0 \div 20\text{В}$ должен быть подключен к АЦП с нормализованным входным сигналом $0 \div 10\text{В}$. Для приведения выходного напряжения прибора к уровню $0 \div 10\text{В}$ на выходе прибора ставится делитель из двух одинаковых резисторов (рис. 4.10).

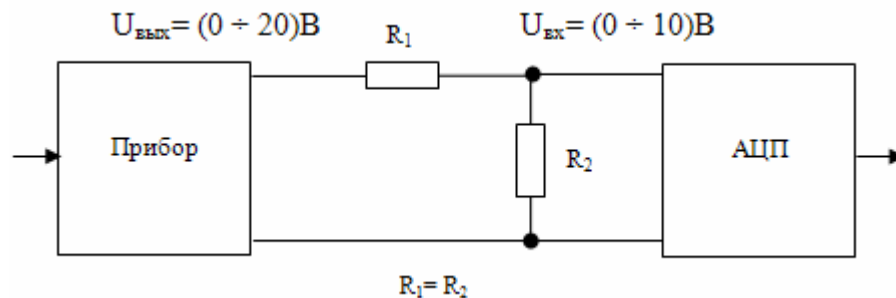


Рис. 4.10. Схема делителя напряжения

Усилит ели. При создании автоматизированных систем часто встречается необходимость усиления слабых сигналов, поступающих, например, с термопар, тензо-мостов и других элементов и приведение усиленных сигналов к уровням нормализованных сигналов. Такие усилители называются нормирующими.

Рассмотрим требования к усилителю сигналов с термопар. Такие усилители относятся к классу усилителей постоянного тока. Усилители для данного случая должны обладать следующими характеристиками:

- большое входное сопротивление;
- малый уровень собственных шумов;
- наличие гальванической развязки между входом и выходом;
- большой коэффициент усиления;
- стабильность нуля.

В качест ве предварит ельного усилит еля используют дифференциальный усилитель, выполненный в виде интегральной микросхемы ([рис.4.11](#)).

Дифференциальный усилитель характеризуется следующими основными параметрами:

- регулируемый коэффициент усиления - от 1 до 10^4 ;
- высокое входное сопротивление - до 10^{10} Ом;
- малое выходное сопротивление - около 0,1 Ом;

высокая температурная стабильность характеристик, что практически исключает дрейф нуля.

Усилитель устанавливают обычно в корпусе датчика.

Современные усилители постоянного тока обладают достаточно высокими характеристиками при малых габаритах, что позволяет встраивать их в конструкцию датчика.

Такие устройства обеспечивают усиление и преобразование сигналов с термопреобразователей сопротивления и термопар и выполняются в виде отдельного конструктива.

Схема подключения термопар к усилителю приведена на [рис.4.12](#).

Искрозащитные разделительные барьеры. На испытательных стендах, насыщенных трубопроводами и емкостями с жидким и газообразным топливом, агрегатами, заполненными маслами, существует непосредственная опасность возникновения пожара.

Для защиты, как обслуживающего персонала, так и оборудования должны быть приняты меры предосторожности, создающие условия, при которых во взрывоопасных средах опасность возникновения пожара или взрыва сводится к нулю.

Наиболее применяемым является метод ограничения энергии, запасенной в электрической цепи, т.е. организация искробезопасной электрической цепи.

Вид взрывозащиты - «искробезопасная электрическая цепь» основывается на поддержании искробезопасного тока (напряжения, мощности или энергии) в электрической цепи. При этом под искробезопасным током понимается наибольший ток в электрической цепи, образующий разряды и который не вызывает воспламенения взрывоопасной смеси.

Поэтому в состав УСО автоматизированной системы контроля и управления включают специальные элементы - барьеры искрозащиты. Барьеры искрозащиты обеспечивают искробезопасность электрической цепи посредством ограничения энергии в пределах нижней границы взрыва смеси.

При этом для соединения электрооборудования, находящегося во взрывоопасной зоне, с оборудованием, находящимся во взрывобезопасной зоне, применяются специальные ограничительные элементы:

- диодные барьеры безопасности, или пассивные барьеры;
- гальванически изолированные барьеры безопасности, или активные барьеры.

Электрооборудование для взрывоопасных зон. Оборудование стенда подразделяется в общем случае на два вида по взрывобезопасности:

- оборудование, размещенное во взрывоопасной зоне (непосредственно в боксе стенда);
- оборудование, размещенное в помещении пульта управления (взрывобезопасная зона)

Электрооборудование, размещенное в боксе стенда, делится на два типа:

- элементарное электрооборудование (термопара, термометр сопротивления, светодиод, реле и т.д.);
- взрывобезопасное оборудование.

Технические характеристики элементарного электрооборудования не должны превышать значений:

- по напряжению 1,2 В;
- по току 0,1 А;
- по мощности 25 мВт.

Это означает, что элементарное оборудование не будет способно производить, накапливать энергию, достаточную для воспламенения взрывоопасной смеси.

Взрывобезопасное оборудование должно быть утверждено, как искробезопасное и иметь параметры, которые отвечают требованиям соответствующей взрывоопасной смеси.

4.2. Модули УСО

Современные системы контроля и управления при испытаниях ГТД строятся из набора элементов: модулей, конструктивов, блоков, кросс-панелей. Эти элементы соединяются кабелями.

В качестве примера рассмотрим характеристики модулей российской фирмы «Л-КАРД», выпускающей широкую номенклатуру модулей сбора, обработки данных и управления технологическими процессами.

Крейтовая измерительная система LTC

Крейтовая измерительная система LTC включает в себя набор элементов (номенклатура их исчисляется десятками), на основе которых может быть создана автоматизированная система конкретного применения. Модули в системе LTC снабжены коммутаторами на входе, поэтому каждый модуль обеспечивает подключение нескольких измерительных каналов (от 4 до 32).

Это значительно снижает стоимость системы контроля при сохранении достаточно хороших характеристик по быстродействию.

Модуль LC – 227

LC – 227 – многофункциональный модуль с гальванической развязкой отдельных каналов.

LC – 227 является многофункциональным модулем для измерений медленно меняющихся сигналов в случаях, требующих гальванической развязки каналов.

Рекомендуется к применению при использовании термопар, подключенных на корпус (измерение поверхностных температур), а также в условиях больших промышленных помех.

Точность измерений в диапазоне входных сигналов:

- $0 \div 50$ ($0 \div 25$) мВ - 0,25 %;
- $0 \div 20$ мА - 0,1 %;
- изменения сопротивления - 0,1 %.

Внешний вид модуля приведен на рис. 4.13.

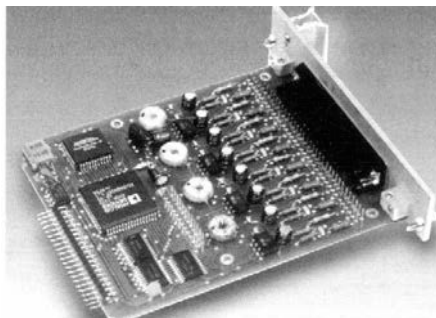


Рис. 4.13. Модуль LC – 227

Модуль LC – 111

LC – 111 – модуль измерения сигналов в диапазоне $0 \div 10$ В.

LC – 111 является недорогим, надежным модулем, обеспечивающим коммутацию до 32 входных каналов, усиление, нормализацию и преобразование сигналов. Модуль имеет групповую гальваническую развязку от «земли» крейта. Применяется для ввода и преобразования сигналов с датчиков давления, температур с выходным сигналом $4 \div 20$ мА и др.

Основная погрешность – 0,05 %.

Внешний вид модуля приведен на рисунке 4.14.

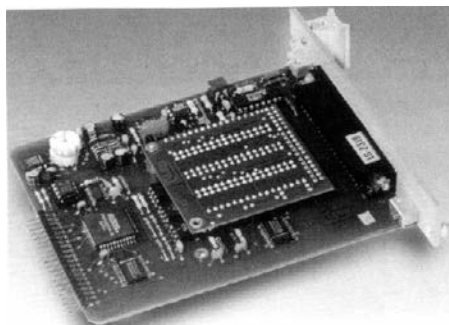


Рис.4.14. Модуль LC – 111

Модуль LC – 451

LC – 451 – модуль для проведения измерений частоты сигналов.

LC–451 позволяет проводить измерения частоты или периода частотного аналогового сигнала по 8 входным линиям.

Установка интервала измерений и опрос результатов осуществляются независимо для каждого канала.

Модуль применяется для ввода сигналов с датчиков частоты вращения роторов, датчиков расхода топлива и масла.

Число входных каналов	- 8;
Диапазон входных сигналов	- ± 5 В;
Измеряемые частоты входных сигналов	- 1 Гц ÷ 25 кГц;
Погрешность измерения	- 0,1 %.

На основе перечисленных модулей можно создать систему, обеспечивающую ввод, преобразование и обработку информации с датчиков:

- температур (термопары, термометры сопротивления);
- давлений, перепадов давлений;
- частот вращения;
- усилия от тяги;
- перемещений;
- расходов жидкостей и газов и др.,

а также при необходимости обеспечить управление процессом испытания путем включения (выключения) агрегатов и устройств стенда.

4.3. Стандарты на УСО

1) Стандарт системы АСВТ-М (агрегатные средства вычислительной техники)

АСВТ-М это-система включающая в себя управляющие вычислительные машины различной производительности. Сюда также входят УСО, устройства ввода вывода, внешней памяти и т.п. Средства АСВТ позволяют создавать многоуровневые системы: ЭВМ с УСО и периферией на нижнем уровне, наиболее производительные ЭВМ с периферией на верхнем уровне.

УСО в стандарте АСВТ включают большое количество специализированных модулей, осуществляющих сбор, передачу и преобразование измерительной информации.

Система АСВТ начала создаваться в конце 60-х годов наряду с системой универсальных ЭВМ типа ЕС и в настоящее время является уже устаревшей.

2) Стандарт КТС ЛИУС (комплекс технических средств локальных информационно - управляющих систем)

Применяются в АСУ ТП. В функции АСУ ТП входят: измерение, контроль, индикация, сигнализация, регулирование.

В состав КТС ЛИУС входят:

комплекты типовых конструкций (платы, каркасы, кожухи, шкафы и т.п.);
элементы УСО (коммутаторы, усилители, счетчики, АВП и т.д.)
приборы и устройства (приборы вывода цифровой информации, устройства управления регуляторами.
контроллеры (блоки управления).

Из КТС ЛИУС формируются системные комплексы различного назначения (централизованного контроля с непрерывной цифровой индикацией, централизованного контроля отклонений, первичной переработки информации).

КТС ЛИУС продолжает развиваться до настоящего времени. В 1985 году началась эксплуатация последней очереди КТС ЛИУС-2 на базе микропроцессорной техники.

Она называется Микро ДАТ (микропроцессорные программируемые контроллеры диспетчеризации, автоматики, телемеханики).

Микро ДАТ до начала 90-х годов превосходил лучшие зарубежные аналоги по разнообразию агрегатных модулей.

3) Стандарт МЭК 1131 (международная электротехническая комиссия) - разработчик Хьюлет-Паккард. Развивается с 1972 года. У нас в стране введен ГОСТом с 1980 года. Его называют еще приборным интерфейсом. Этот стандарт применяется для небольших автоматизированных систем с ограниченными возможностями. Такие системы komponуются как правило из автономных программно-управляемых приборов (например - цифровых вольтметров, частотомеров и т.п.), выполненных по этому стандарту, и микро ЭВМ.

Стандарт МЭК - это магистральный интерфейс. К магистрали МЭК, включающей 16 сигнальных линий, подключаются цифровые измерительные приборы и микро ЭВМ. Цифровые измерительные приборы содержат внутри себя АЦП и могут управляться программно. Цифровые приборы часто являются универсальными (I, Y, R, t).

Схема АСНИ в стандарте МЭК представлена на [рис.4.15](#). Выпускаемые промышленностью цифровые приборы в стандарте МЭК имеют внутри соответствующие интерфейсные части со стандартными разъемами на задней части прибора.

Каждый прибор, подключаемый к магистрали, может находиться в следующих состояниях:

- резерва;
- источника информации (ПИ - прибор источника);

- приемника информации (ПП - прибор приемник);
- контролера (т.е. выполнять функции управления).

Прибор источник посылает по магистрали информацию для, одного или нескольких ПП. При работе в качестве ПП прибор принимает такую информацию. При работе в качестве контроллера прибор управляет потоком информации в магистрали.

Магистраль МЭК - является пассивной магистралью. Все сигналы вырабатываются в приборах 16 сигнальных линий магистрали по функциональному признаку делятся на три шины:

1. Информационную (8-линий) - по ней передается в двоичном коде информация от ПИ КПП, также команды, в том числе и адресные;

2. Управления переносом информации (3-линии)

Шина используется для согласования готовности ПИ к передаче информации с готовностью ПП к приему.

3. Управления интерфейсом (5 линий). Эта линия используется контролером (им может быть или сама ЭВМ или специальный блок, встраиваемый в один из приборов)

Контролер посылает команды в магистраль, которые воспринимаются ПП и ПИ. Команды могут быть универсальными, на которые реагируют все приборы системы, или адресными, предназначенными только для приборов с различным адресом.

Размер системы в стандарте МЭК ограничивается только 15-ю приборами максимально допустимая длина кабеля связи, являющегося магистралью МЭК 20 м. Максимальная передача по магистрали 1 Мбайт/с.

Стандарт КАМАК

Стандарт КАМАК (в переводе с английского означает - применение компьютеров для измерений и контроля).

Разработан и предложен Комитетом Европейских стандартов по ядерной электронике в 1969 году. У нас в стране утвержден ГОСТом в 1980 году.

Система, построенная на основе этого стандарта получила название системы КАМАК. Система КАМАК свободна от патентных ограничений и открыта для расширения и совершенствования. УСО в стандарте КАМАК обычно компонуется с мини ЭВМ и микро ЭВМ.

Стандарт КАМАК распространяется на модульную стационарную аппаратуру системы КАМАК. Стандарт устанавливает требования к конструкции, электрическим сигналам, питанию, логике обмена информацией модулей системы между собой и с ЭВМ.

Нижним функциональным звеном системы КАМАК является набор сменных модулей. Модули выполняются в виде стандартных блоков.

Размещенные в крейте модули соединяются между собой и с блоком питания с помощью 86 проводников, которые образуют магистраль крейта.

ЭВМ подключается к магистрали крейта с помощью специального модуля: крейт - контролера (КК). Устройство крейта приведено на [рис.4.16](#). Структурная схема УСО для АСИ ГТД в стандарте КАМАК показана на [рис.4.17](#).

В схеме имеется: генератор, таймер, счетчики, входной регистр, преобразователь питания, КК - промышленные типовые модули КАМАК.

Аналоговый сигнал с датчика тяги ТВС поступает в промышленный модуль «Входной регистр» через специальный прибор Ф4231 и согласующее устройство (СУ), которые располагаются вне крейта, цифровые коды электрических сигналов всех модулей через КК передаются в ЭВМ.

В случае, если число входных каналов в каком-нибудь модуле недостаточно для подключения всех датчиков данного типа, то в крейт помещают еще один или несколько таких модулей.

Для преобразования частотно-временных сигналов используется специализированный модуль преобразователь оборотов и расхода (ПОР), а также типовые модули генератор, таймер и счетчики, а также различные методы преобразования в код частотно-временных сигналов.

Модули для преобразования аналоговых сигналов: преобразователь сигналов терморезисторов(ПСТР), преобразователь сигналов термопар (ПСТП), преобразователь напряжения (ПН) имеют следующие основные блоки:

1. Коммутаторы;
2. Нормализаторы;
3. АЦП;
4. Буферное запоминающее устройство (БЗУ).

К достоинствам системы КАМАК на момент ее появления можно отнести:

1. Большие функциональные возможности;
2. Достаточно большие скорости передачи данных;
3. Приспособленность для быстрого изменения конфигурации системы;
4. Небольшие ограничения на входные электронные сигналы.

К недостаткам системы КАМАК относятся:

1. Трудность организации работы модулей с быстродействием меньшим, чем цикл КАМАК;
2. Нет возможности прямой адресации к большим массивам памяти внутри модулей;
3. Элементы КАМАК (размеры плат, типы и число контактных разъемов, конструкция крейта и стоек) ориентированны на технологию монтажа дискретных элементов электронных схем и интегральных схем (ИС) низкой интеграции;
4. «Рыхлый» монтаж соединений проводников входных сигналов на лицевых панелях модулей;
5. Большое количество контактов разъемов на заданных панелях модулей (снижается надежность работы);
6. Сложность программирования для системы.

Эти недостатки определили постепенное моральное старение системы КАМАК.

ГЛАВА 5. ЭВМ И ПЕРИФЕРИЙНЫЕ УСТРОЙСТВА

В АСИ ГТД наибольшее применение нашли мини и микро ЭВМ и персональные ЭВМ.

ЭВМ являются устройством, предназначенным для выполнения вычислительных и логических операций в соответствии с программой, управляющей ее работой. ЭВМ подразделяются на универсальные и специализированные.

Универсальные ЭВМ используются для решения любых задач. Специализированные ЭВМ предназначены для задач определенного назначения (управляющие, информационные и др.).

Микро ЭВМ отличается от мини ЭВМ главным образом объемом интегральной схемы (ИС). В микро ЭВМ, как правило, применяют сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) с меньшими размерами и меньшей стоимостью.

Промышленность до повсеместного использования ПЭВМ успела выпустить несколько ИВК с УСО в системе КАМАК.

ИВК-1	}	для автоматизации экспериментов общетехнического профиля
ИВК-2		для автоматизации экспериментов в физике, химии, биологии,
ИВК-3		медицине, металлургии и т. п.
ИВК-4		для автоматизации сложных лабораторных экспериментов.

А также ИВК с УСО в стандарте АСЭТ:

ИВК-7	}	для автоматизации экспериментов в различных
ИВК-8		

В настоящее время автоматизированные системы испытаний авиационных ГТД строятся в основном на использовании персональных ЭВМ.

5.1. Основные характеристики ПЭВМ

Персональная ЭВМ является настольной универсальной машиной индивидуального применения. Её отличительными особенностями являются:

- компактность, блочная конструкция;
- относительно низкая стоимость;
- высокая надёжность и простота ремонта, основанные на интеграции компонентов компьютера;
- универсальность;
- автономность;
- наличие системных интерфейсов;
- прозрачность для пользователя системного программного обеспечения (ПО);
- наличие разнообразного и дешёвого прикладного ПО и его свободная продажа;
- наличие языков высокого уровня;
- работоспособность в производственных помещениях;
- возможность расширения и адаптации к особенностям применения компьютеров - один и тот же компьютер может быть оснащён различными периферийными устройствами и разным ПО;
- относительно высокие возможности по переработке информации.

Персональные компьютеры являются наиболее широко используемым видом компьютеров, их мощность постоянно увеличивается, а область применения расширяется. Персональные компьютеры могут объединяться в сети, что позволяет десяткам и сотням пользователей легко обмениваться информацией и одновременно получать доступ к общим базам данных.

Основной областью применения ПЭВМ являются автоматизированные рабочие места и автоматизированные бюро. Под автоматизированным рабочим местом понимаются аппаратно-программные средства обработки информации на рабочих местах пользователей, включающие технические средства ПЭВМ программы решения задач пользователя (функциональные пакеты прикладных программ).

Типовой состав устройств ПЭВМ включает системный блок обработки и управления, средства взаимодействия пользователей с системным блоком, средства долговременного хранения и накопления данных и средства подключения к каналам связи. Такой состав устройств ПЭВМ предоставляет в распоряжение индивидуальных пользователей самые разнообразные функциональные возможности.

Персональные ЭВМ строятся на основе модульной конструкции, которая включает набор конструктивно-законченных модулей:

системный модуль, конструктивно размещённые на одной плате центральный процессор, основная память и разъёмы для подключения функциональных модулей;

функциональные модули, конструктивно размещённые на одной плате контроллеры, адаптеры и дополнительная память, подключаемые к разъёмам системного модуля.

Системный и функциональные модули совместно с блоком питания и некоторыми внешними устройствами конструктивно объединяются в единый системный блок, к которому через соответствующие разъёмы подключаются выносные внешние устройства (ВУ): печатающее и клавишное устройства, дисплеи и т.д.

В соответствии с основными направлениями использования выделяют три типа ПЭВМ:

1. бытовые;
2. учебные;
3. профессиональные.

Конструктивно любая модель ПЭВМ имеет базовый комплект, включающий три типа внешних устройств: диалоговые, запоминающие и телекоммуникационные. Внешние устройства подключаются к системной магистрали ПЭВМ с помощью контроллеров,

которые обеспечивают сопряжение алгоритма функционирования системной магистрали с алгоритмом функционирования данного внешнего устройства.

5.2. Периферийные устройства ПЭВМ

Все периферийные устройства ПЭВМ можно подразделить на:

1. устройства ввода информации;
2. устройства вывода информации;
3. устройства ввода-вывода информации.

К устройствам ввода информации относят: клавиатуру, сканер и др. Скорость ввода информации с помощью клавиатуры относительно невелика, что резко снижает эффективность использования ЭВМ.

Кроме того, некоторую графическую информацию вообще невозможно ввести в память ЭВМ с помощью клавиатуры.

Эту проблему позволяет разрешить считывающее устройство или сканер. Сканер- это устройство для ввода изображений в виде растровой матрицы с высокой разрешающей способностью.

С помощью сканера можно ввести в память ПЭВМ не только текстовую или цифровую информацию, но и различные чертежи, графики, картины, фотографии и другие изображения. В соответствии с функциональными возможностями и устройством, сканеры можно разделить на настольные и портативные или ручные. И те, и другие могут быть как чёрно-белыми, так и цветными.

Одним из основных устройств вывода информации является дисплей. Дисплей- это устройство отображения текстовой и графической информации с помощью экрана. Дисплей, как правило, выполняется на базе электроннолучевой трубки. Однако в последнее время всё шире используются плоские дисплеи с жидкокристаллическими или газоразрядными индикаторами.

Очень часто информацию требуется распечатать в виде документа. В этих целях используются алфавитно-цифровые печатающие устройства (АЦПУ) или принтеры.

Различают следующие типы принтеров: барабанные, матричные, лепестковые, струйные, лазерные и термопринтеры.

Для построения графиков, чертежей, выкроек, метеорологических карт т.д. используют графопостроители или плоттеры.

Графопостроители- это механические чертёжные программно-управляемые устройства, снабжённые подвижной кареткой с закреплёнными в ней специальными перьями, перемещаемыми над листом носителя выводимого изображения. Различают планшетные графопостроители и рулонные.

Для обмена информацией с другими компьютерами используется модем. По конструктивному исполнению модемы бывают встроенными и внешними. Работают модемы в одном из трёх режимов: дуплексном, полудуплексном или симплексном.

5.3. Математическое обеспечение

Математическое обеспечение (МО) является неотъемлемой частью ИВК и АСИ ГТД в целом, обеспечивающей их функционирование. Структурная схема МО ИВК представлена на рис. 5.1.



Рис. 5.1. Структурная схема МО ИВК

Математическое обеспечение ИВК состоит из двух основных частей: общее МО и специальное МО.

Общее математическое обеспечение включает в себя:

- а) средства контроля и диагностики системы;
- б) операционную систему (ОС)

Средства контроля и диагностики системы - это совокупность программ контроля исправности технических средств и программ ОС ИВК, а также диагностики неисправностей в ходе функционирования ИВК.

ОС - это совокупность программ для управления работой ЭВМ и ее периферии, а также для облегчения программирования, отладки и сопровождения программ специального МО.

Обработывающие программы ОС обеспечивают отладку программ пользователей, их трансляцию с языков программирования, редактирование связей и организацию библиотек соответствующих программ пользователя.

Специальное математическое обеспечение включает библиотеку стандартных программ (БСП) и программы пользователя (ПП).

Библиотека стандартных программ содержит программы, по которым производятся вычисления наиболее часто встречающиеся в математических выражениях (различных функций, алгебраических уравнений, дифференциальных уравнений и т. д.)

В настоящее время разработано большое число прикладных программ, ориентированных на различные области применения:

- для управления процессами передачи данных по линиям связи;
- для управления базами данных (СУБД);
- для численного анализа (решение системы уравнений, численное интегрирование,

аппроксимация и интерполяция функций и т. д.);

- для обработки данных методами математической статистики
- решение задач оптимизации;
- для операций с матрицами;
- для графической обработки данных (масштабирование осей графика, построение графиков на бумаге и экранах дисплея).

Программы пользователей предназначены для организации работы ЭВМ по разработанным алгоритмам.

В АСИ ГТД с помощью этих программ осуществляется сбор и обработка измерительной информации, анализ получаемых результатов, выработка управляющих воздействий, взаимодействие оператора с системой, подготовка выходной документации.

При разработке программного обеспечения АСИ ГТД целесообразно использовать по мере возможности программы, входящие в состав БСП, а также ряд требований, повышающих эффективность измерительно - вычислительного комплекса (ИВК) в процессе испытаний ГТД.

Требования к математическому обеспечению ИВК:

возможность составления рабочего задания на каждое испытание по видам, количеству и порядку опроса параметров (каналов);

возможность оперативной корректировки рабочего задания в процессе испытаний для изменения вида, количества, порядка опроса, числа опросов каждого параметра, вида усреднения, скорости опроса, введения или исключения цифровых фильтров и т.п.;

оперативный контроль и визуализация параметров, включая аварийные и расчетные, графическое изображение расчетной и действительной информации для работы специалистов сопровождающих и анализирующих результаты измерений;

непрерывное слежение за параметрами ограничений, с уходом с режима при достижении с обеспечением регистрации и отображения;

спектральный анализ сигналов при тензо и виброметрии;

возможность минимального обращения к органам управления ИВК;

работа с внешней кнопочной станцией при возникновении аварийных ситуаций;

возможность оперативной распечатки результатов в процессе испытания с сохранением информации на машинном носителе;

возможность работы в локальной сети испытательной станции и корпоративной сети предприятия;

обеспечение метрологической аттестации ИВК, систем измерения и контроля;

обеспечение возможности работы с математическими моделями и мнемосхемами;

обеспечение регистрации и обработки параметров быстропеременных процессов;

расчет и анализ затрат на проведение испытаний с объективным учетом затрат труда;

расчет характеристик по измеренным параметрам с визуализацией;

обеспечение возможности работы со специальными типами входных сигналов (ступенчатые, импульсные, синусоидальные), обеспечение при этом отфильтрованности от помех, а также с белым, серым и псевдослучайным шумом в реальном времени;

обеспечение получения среднеквадратичной оценки параметров при работе с нестационарными процессами, с медленно (по сравнению с регрессией) меняющимися параметрами;

обеспечение применения метода обращения процедур и матриц, с целью преодоления трудностей при необходимости выполнения значительных вычислений;

обеспечение оценки неизвестных параметров заданных нелинейных функций;
обеспечение реализации метода стохастической аппроксимации;
обеспечение реализации метода использования фиксированного, а не последовательно растущего числа измерений при работе с линейными и нелинейными процессами;

реализация метода прогнозирования, и в том числе градиентного, для обеспечения функциональной связи между характеристиками управления и вектора управления.

Применение средств автоматизации процесса сбора и обработки информации, программных средств управления двигателем и контроля его состояния в ходе испытания разгружает оператора от утомительной и напряженной работы и обеспечивает точное выполнение последовательности операций эксперимента-испытания.

5.4. Промышленные компьютеры

Специалисты по разработке систем контроля и управления испытанием ГТД сталкиваются с проблемой обеспечения работоспособности аппаратуры в условиях повышенных вибраций, повышенных температур, а также при наличии достаточно мощных промышленных помех в сети и электромагнитных излучений. К неблагоприятным факторам, которые присутствуют на стенде, относятся: пары масел и топлива в воздухе, наличие пыли, газов (выхлопных и топливных).

Стендовое контрольно-измерительное оборудование размещается обычно в специальном помещении, которое называется пультной (измерительной). В испытательном боксе, рядом с двигателем или на двигателе, размещается датчиковая аппаратура, контроллеры и часть блоков нормализации сигнала.

Условия в измерительной гораздо более благоприятные, чем в боксе, но и сюда проникают все факторы, которые перечислены выше.

Установка в промышленные условия офисного (конторского) компьютера приведет к быстрому его выходу из строя. Проблема решается установкой в помещениях с неблагоприятными условиями так называемого промышленного компьютера.

Промышленный компьютер - это изделие с повышенной устойчивостью к воздействию окружающей среды и обладающий модульностью конструкции.

Методы повышения устойчивости к воздействию окружающей среды

Устойчивость к воздействию окружающей среды добиваются различными способами.

Рассмотрим некоторые из них.

Борьба с пылью. Один из методов борьбы с пылью - создание избыточного давления в корпусе компьютера, на всасывающие вентиляторы устанавливаются пылеулавливающие фильтры.

Борьба с воздействиями вибраций идет проще всего по пути создания прочного шасси и корпуса, платы промышленного компьютера закрепляются специальными дополнительными амортизирующими скобами, а дисковые накопители размещаются на специальной виброударостойкой подвеске.

Увеличение надежности работы в условиях повышенных температур.

Влияние высоких окружающих температур, в некоторых случаях достигающих 45°C, снижают за счет хорошего охлаждения и за счет применения специальной элементной базы.

Модульность конструкции

В промышленных компьютерах применен принцип модульности и исключительных возможностей по расширению.

«Материнской платы» здесь нет, процессорная плата на общих основаниях вставляется вместе с другими платами в объединительную кросс-плату с большим числом слотов расширения.

На [рис.5.2](#) приведен внешний вид шасси промышленного компьютера IPC-610.

Такая модульная конструкция упрощает техническое обслуживание, позволяет быстро заменить модули. Среднее время восстановления системы за счет этого существенно сокращается.

Количество слотов расширения может достигать 20, что позволяет создавать на базе промышленного компьютера довольно сложные системы

контроля и управления технологическими процессами

Некоторые особенности конструкции внешнего оборудования

Учитывая особенности работы промышленного компьютера в условиях производства,

изменились требования к внешнему оборудованию.

Так, например, клавиатура выполняется в пылевлагозащитном исполнении.

Кнопки и органы управления типа «Сброс», «Пуск», «Выключение питания» помещают за запираемыми на ключ дверцами.

Предъявляются повышенные требования к мониторам. Мониторы промышленного исполнения имеют следующие особенности:

- расширенный рабочий диапазон температур: $0 \div 50^{\circ}\text{C}$;
- усиленный корпус и шасси;
- печатные платы выполнены из фибerglassа;
- все тяжелые детали закреплены болтами и хомутами;
- проведено экранирование от сильных магнитных полей.

В результате среднее время безотказной работы монитора составляет свыше 60000 часов.

Рабочие станции

Другой разновидностью «индустриальных» компьютеров являются «рабочие станции».

Внешний вид рабочей станции представлен на [рис.5.3](#).

Рабочая станция промышленного исполнения отличается следующими особенностями:

- дисплей, системный блок и клавиатура размещены в едином конструктиве;
- корпус усилен;
- влагозащищенная прочная панель;
- дисплей защищен толстым стеклом;
- органы управления и дисковод находятся за запираемой передней панелью;
- большое число слотов расширения;
- станция может устанавливаться в типовую стойку;
- мощный источник питания;
- рабочий диапазон температур $0 \div 50^{\circ}\text{C}$

Панельные компьютеры

Отличительной особенностью панельных компьютеров является их малые габариты.

В качестве дисплеев применяются плоские панели.

Панельные компьютеры предназначены для установки в пульта и панели и служат для создания хорошо защищенного интерфейса «человек - машина». Они хорошо приспособлены к промышленным условиям, поэтому могут устанавливаться непосредственно на контролируемых установках.

На [рис.5.4](#) приведен внешний вид панельного компьютера PPC-100.

Модульные промышленные компьютеры

Модульный компьютер обладает всеми достоинствами модульной конструкции, которая позволяет резко уменьшить время восстановления оборудования.

В модульных компьютерах традиционно решен вопрос охлаждения системы:

- вентиляторы снабжены пылеулавливающими сменными фильтрами;
- создается избыточное давление внутри корпуса.

Традиционно для промышленного компьютера решен вопрос вибро и ударостойкости конструкции: это, прежде всего, прочность корпуса и демпфирующие подвески на узлы.

Процессор выполнен в виде отдельной платы.

На процессорной плате имеется отдельный разъем для подвода питающих напряжений, минуя системную шину. Это позволяет использовать плату автономно в качестве вычислительного ядра различных систем.

Промышленные ноутбуки

В последнее время ноутбуки все шире применяются в практике испытаний газотурбинных двигателей. Это связано, прежде всего, с необходимостью проведения наукоемких экспериментальных исследований, как на стендах, так и в полевых условиях.

Ноутбуки все чаще встраиваются в современные специализированные системы контроля и управления процессами испытания ГТД.

На базе ноутбуков создаются специализированные системы оценки:

- вибрационного состояния двигателя;
- уровня пульсаций давления в тракте ГТД;
- прочностных характеристик деталей ГТД.

При этом разработчики сталкиваются с проблемой необходимости использования оборудования в жестких условиях: при наличии вибраций, при повышенных окружающих температурах, при наличии пыли, паров масел и топлива и др.

Ноутбуки промышленного и военного применения делят обычно на три группы:

- повышенной прочности (серия А);
- промышленные (серия I);
- военные (серия N).

Ноут буки серии А применяются для условий более жестких, чем офисные условия, но все-таки облегченные по сравнению с требованиями к другим моделям.

Ноутбуки серии А достаточно стойки к внешним факторам и в то же время его цена значительно ниже цены моделей I и N.

От офисных ноутбуков они отличаются:

- повышенной прочностью корпуса;
- повышенной герметичностью.

Шасси ноутбука серии А изготовлено из литого магниевых сплава и имеет по углам дополнительные резиновые буферы, что обеспечивает дополнительную защиту при механических воздействиях.

Такая конструкция позволяет ноутбукам выдерживать вибрации до 2 g, удары до 30 g и падение на бетон с высоты 1м.

Температурный диапазон работоспособности ноутбука: $-20 \div 50$ °C при влажности $5 \div 95$ % (без конденсации).

Ноутбуки оснащаются, как правило, резиновой клавиатурой и защищенной указательной сенсорной панелью. Эти меры обеспечивают защиту ноутбука от пыли и влаги на уровне норм IP52, что делает возможным работу даже под дождем и в условиях сильной запыленности.

Обеспечивается защита от электромагнитных полей.

Ноутбуки серии А не отличаются по вычислительной мощности от аналогичных офисных.

Важной особенностью промышленного ноутбука является возможность установки модуля расширения, куда может быть установлено дополнительное оборудование для организации специализированной системы.

Важной отличительной особенностью большинства промышленных ноутбуков является расширяемость и легкость модернизации. На рис. 5.5 приведены возможности расширения конфигурации ноутбука серии А.

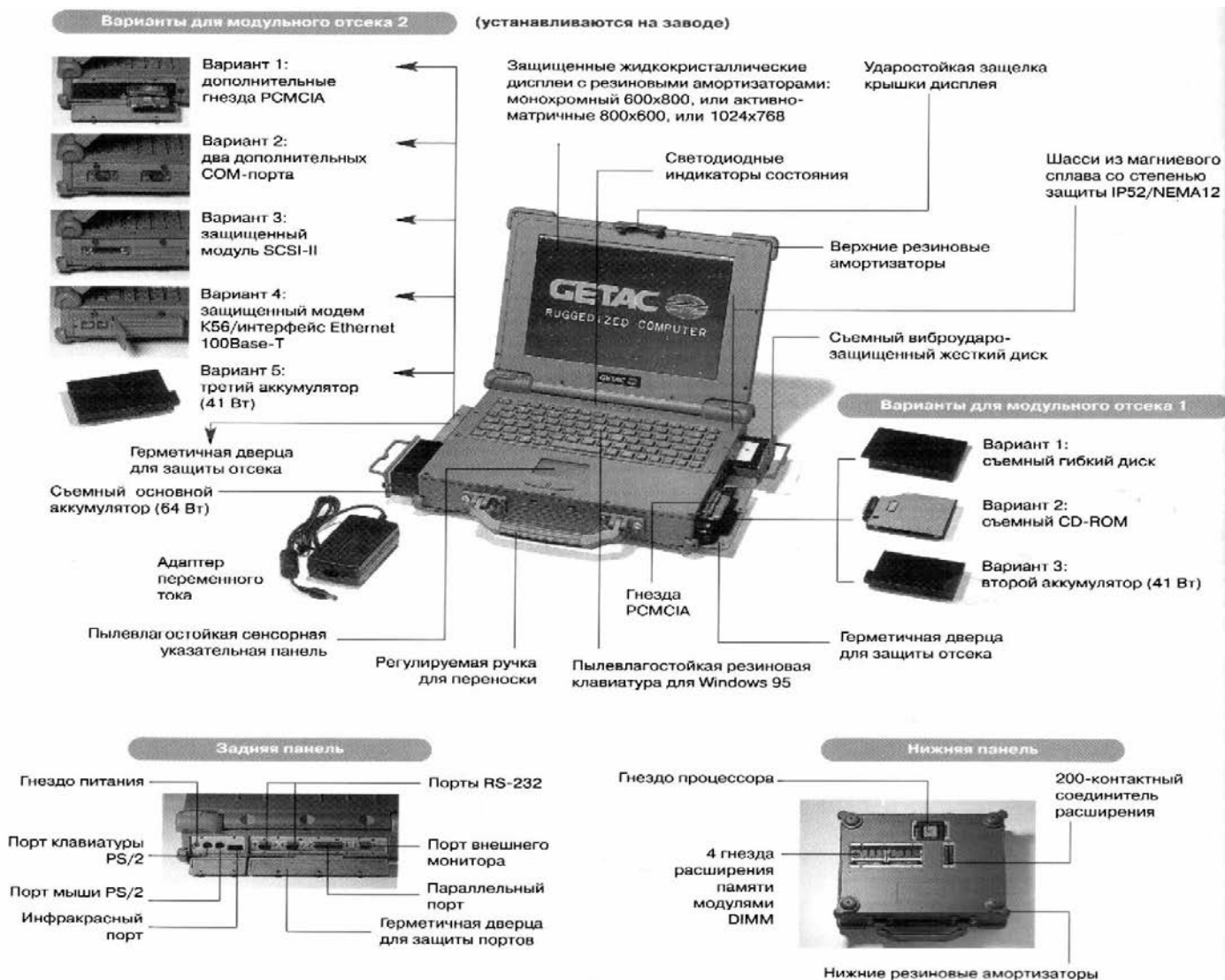


Рис. 5.5. Возможности расширения конфигурации ноутбука серии А

Для обеспечения работоспособности ноутбуков серии А в полевых условиях (на транспорте) дополнительно поставляется амортизирующая платформа, которая позволяет улучшить параметры вибро- и ударостойкости.

Если ноутбук серии А все-таки не выдерживает условий эксплуатации в реальных условиях, вместо него может применяться *ноут бук серии I*.

Эта модель выдерживает удары до 40 g, не боится сильного ливня и падения в лужу, т.е. обеспечивает высокую степень защиты.

По вычислительной мощности модель серии I не уступает модели серии А.

В модели серии I есть возможность установки модуля расширения с установкой одной платы.

Ноут буки серии N - модели специального военного применения и является модификацией серии I, оптимизированной для военного применения.

Параметры воздействия окружающей среды сертифицированы на соответствие военным стандартам.

ГЛАВА 6. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ

Специфика решения основных задач, обычно возникающих при испытаниях с целью определения их термогазодинамического состояния ГТД и оценки основных технических данных в условиях автоматизированной системы испытаний заключается в том, что основные рутинные операции по обработке данных должны выполняться без участия человека, но желательно с использованием тех методов и подходов, которые позволяют исследователю при применении отработанных традиционных способов обработки и анализа экспериментальной информации получать наиболее достоверные результаты.

Для повышения эффективности термогазодинамического анализа его результаты должны быть получены в сжатые сроки.

Поэтому автоматизированная система термогазодинамического анализа предполагает выполнение основных операций в реальном масштабе времени и в темпе испытания.

При экспериментальном определении дроссельных характеристик двигателя *под работами, выполняемыми в реальном масштабе времени, понимаются действия, которые выполняются в период между измерениями параметров в двух соседних экспериментальных точках (3...5 мин). Под работами, выполняемыми в темпе испытания, понимаются действия, выполняемые в период времени между запуском и выключением двигателя.*

В реальном масштабе времени выполняется контроль качества измерений. В темпе испытания осуществляется восстановление характеристик двигателя, определение основных технических данных и отличий измеренных параметров от модели, а также выполняется основной этап термогазодинамического анализа. И только заключительный этап осуществляется за рамками испытания двигателя.

6.1. Контроль качества измерений

Для анализа и интерпретации результатов испытаний ГТД большое значение имеет качество полученной экспериментальной информации. Поэтому на всех этапах сбора и обработки экспериментальных данных при автоматизированных испытаниях осуществляется контроль качества измерений с целью выявления грубых ошибок и устранения их влияния на конечный результат.

Рассмотрим особенности применения некоторых видов контроля качества измерения параметров ГТД.

При измерении параметров двигателя на каждом режиме работы осуществляется многократный (до 10...20 раз) опрос всех измерительных каналов, в результате по каждому измерительному каналу в ЭВМ поступает $n = 10...20$ значений цифрового кода X (см. рис. 6.1).

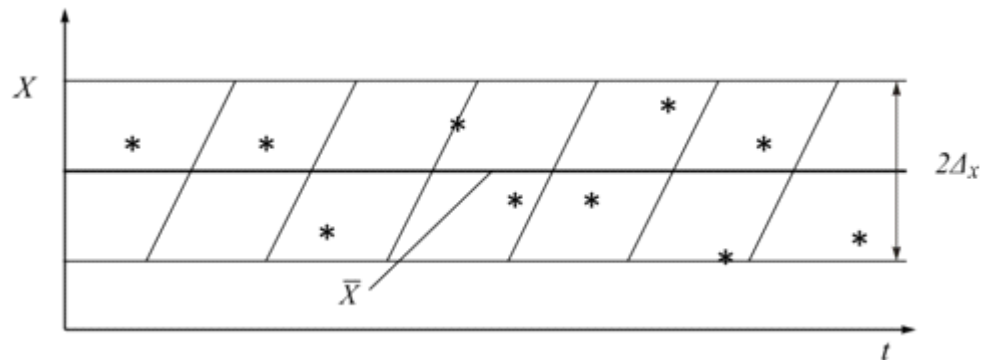


Рис. 6.1. Значения цифрового кода X в различное время t при многократном опросе измерительного канала на неизменном режиме работы двигателя; * - результаты измерений

По зарегистрированным в ЭВМ значениям цифровых кодов X_i вычисляется среднее значение

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (6.1)$$

и их дисперсия

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}. \quad (6.2)$$

Определяется интервал Δ_x , в который с заданной доверительной вероятностью p должны попадать правильно соответствующие значения цифрового кода

$$\Delta_x = \tau_{1-\frac{\alpha}{2}, f} S_x, \quad (6.3)$$

где $\tau_{1-\frac{\alpha}{2}, f}$ - статистический критерий для фильтрации грубых ошибок;

$\alpha = 1 - p$ - уровень значимости;

$f = n - 1$ - число степеней свободы.

Значения цифрового кода X_i не удовлетворяющие условию

$$|\bar{X} - X_i| \leq \Delta_x \quad (6.4)$$

признаются определенными с грубыми ошибками и отбрасываются. Вычисляется новое среднее значение цифрового кода \bar{X} . Иногда в качестве доверительного интервала Δ_x используют некоторую постоянную, априорно заданную величину.

Таким образом осуществляется отбраковка выбросов цифрового кода, вызванных какими-либо случайными причинами (электрическими помехами, сбоями в работе аппаратуры и т.п.). Однако грубые ошибки в определении параметров могут быть связаны и с выходом из строя датчиков, приборов, других элементов измерительных каналов. Очевидно, что такие грубые ошибки выявить выше описанным способом нельзя.

Поэтому на следующем этапе контроля качества измерений осуществляется проверка попадания полученного значения цифрового кода \bar{X} в область допустимых значений. В качестве области допустимых значений цифрового кода \bar{X} принимается диапазон цифровых кодов, полученных при градуировке данного измерительного канала (см. рис. 6.2), проводимый перед проведением испытаний двигателя.

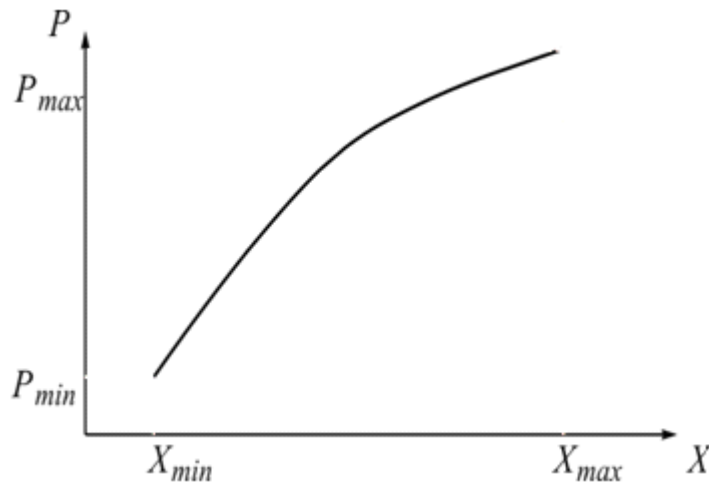


Рис. 6.2. Градуировочная характеристика измерительного канала: P_{min} , P_{max} — соответственно нижние и верхние границы изменения эталонного значения параметра при градуировке

Значение цифрового кода \bar{X} не удовлетворяющее условию

$$X_{min} < \bar{X} < X_{max} \quad (6.5)$$

признаются ошибочными.

Если же значение \bar{X} попадает в область допустимых значений, то с помощью формулы, аппроксимирующей градуировочную характеристику соответствующего измерительного канала, определяется оценка физической величины параметра.

$$\hat{P} = a_0 + a_1 \bar{X} + \dots + a_m \bar{X}^m, \quad (6.6)$$

где a_i , $i = 0, \overline{m}$ — коэффициенты градуировочной характеристики измерительного канала.

Измерения температуры T и давления p в проточной части двигателя, осуществляются, как правило, в нескольких точках каждого характерного сечения, что также используется для контроля качества измерений. Поясним это на примере измерения давления в сечении

проточной части с помощью радиальной гребенки приемников давления (см. [рис.6.3](#)).

По результатам измерений давления P_i^* на каждом радиусе канала r осуществляется вычисление осредненного значения полного давления \bar{P}^* .

Проверяется условие

$$\left| \bar{P}^* - P_i \right| \leq \Delta_{P^*}, \quad (6.7)$$

где Δ_{P^*} - допуск на возможные отличия отдельных измерений от среднего значения.

Величина допуска Δ_n назначается исходя из априорных представлений о возможной неравномерности поля давления в данном сечении, которые могут быть основаны на опыте предыдущих экспериментальных исследований двигателя.

Не выполнение данного условия для какого-либо P_i является признаком наличия грубой ошибки, вызванной, например, засорением соответствующего приемника давления.

Следующий способ контроля качества измерений параметров основан на сравнении приведенных к САУ измеряемых параметров на данном режиме работы двигателя, с априорными представлениями о дроссельной характеристике данного двигателя (см. [рис.6.4](#)).

В качестве априорной дроссельной характеристики может быть использована характеристика, полученная на предыдущих испытаниях двигателя или расчетная характеристика, скорректированная исходя из известных особенностей данного экземпляра двигателя. На основе оценки степени адекватности априорной дроссельной характеристики, имеющихся погрешностей экспериментального определения параметров двигателя назначается величина допуска на возможное отличие параметров данного двигателя от априорных характеристик. На [рис.6.4](#) это величины ΔG_m и Δp .

После определения приведенных значений параметров двигателя на данном режиме проверяется условие:

$$\left| P_{\text{пр апри}} - P_{\text{пр}} \right| \leq \Delta p. \quad (6.8)$$

Если это условие для какого-либо параметра как, например, для G_m пр ([рис.6.4](#)) не выполняется, то это значение параметра признается определенным с грубой ошибкой.

Основная проблема, возникающая при таком способе контроля качества измерений, связана с обоснованным назначением допусков Δp . Решение этой проблемы значительно упрощается, если испытанию подвергается серийный двигатель и известны статистические данные о результатах испытаний других двигателей данной серии. В этом случае границы на допустимые значения параметров двигателя определяются на основе обработки имеющихся статистических данных о разбросе дроссельных характеристик двигателей данной серии. Разброс дроссельных характеристик двигателей одной серии (см. [рис.6.5](#)) объясняется рассеиванием параметров, характеризующих работу узлов двигателя, наблюдающимся из-за того, что изготовление деталей и сборка узлов осуществляется с определенными допусками, а также погрешностью измерения параметров при испытании.

Рассеивание характеристик отдельных не отлаженных двигателей подчиняется закону распределения близко к нормальному.

При контроле качества экспериментального определения параметров у данного двигателя на режиме характеризуемом частотой вращения ротора $n'_{пр}$ т вначале определяются среднестатистические значения параметров двигателей всей серии на данном режиме:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (6.9)$$

где n - количество дроссельных характеристик, имеющих в статистике.

Затем вычисляется дисперсия параметров двигателей данной серии на этом режиме

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}. \quad (6.10)$$

Рассчитывается доверительный интервал

$$\Delta_{P_{\text{стат}}} = t S_p \sqrt{1 + \frac{1}{n}}, \quad (6.11)$$

где $t = \varphi(1 - \frac{\alpha}{2}, f)$ - квантиль распределения, соответствующий доверительной вероятности $p = 1 - \alpha$ и числу степеней свободы $f = n - 1$.

Проверяется условие

$$|\bar{P} - P_i| \leq \Delta_{P_{\text{стат}}}. \quad (6.12)$$

Если для какого-либо параметра это условие не выполняется, то он признается определенным с грубой ошибкой. Такой способ контроля качества измерений позволяет выявлять грубые ошибки измерений превышающие 5...6%.

Величину доверительного интервала, применяемого для поиска грубых ошибок определения параметров можно уменьшить, если использовать для этих целей закономерности изменений параметров в пределах разброса. Эти закономерности могут быть представлены корреляционными связями между различными параметрами двигателей данной серии на постоянном режиме. Пример двумерных корреляционных связей между значениями тяги $P_{\text{пр}}$ и расхода топлива $G_{m \text{ пр}}$ на режиме $n'_{\text{пр}} = \text{const}$ приведен на [рис.6.6](#).

Зависимость оценки наиболее вероятного значения параметра-функции $\hat{P}_{\text{пр}}$ от параметра аргумента $G_{m \text{ пр}}$ определяется уравнением регрессии:

$$\hat{P}_{\text{пр}} = a + b G_{m \text{ пр}}, \quad (6.13)$$

где a и b - коэффициенты уравнения регрессии.

Степень тесноты корреляционной связи оценивается величиной коэффициента парной корреляции r ,

$$0 \leq |r| \leq 1, \quad (6.14)$$

а возможное отличие действительных значений параметра-функции $P_{\text{пр}}$ у данного двигателя от оценки $\hat{P}_{\text{пр}}$, определенной по уравнению регрессии при известном значении $G_{T \text{ пр}}$,

характеризуется величиной условного доверительного интервала, $\Delta p_{\text{усл}}$ который может изменяться в диапазоне

$$0 \leq \Delta p_{\text{усл}} \leq \Delta p_{\text{стат}}. \quad (6.15)$$

Величины коэффициента корреляции r условного доверительного интервала $\Delta p_{\text{усл}}$ связаны между собой соотношением

$$\Delta p_{\text{усл}} = \Delta p_{\text{стат}} \sqrt{1 - r^2}. \quad (6.16)$$

Величины коэффициентов корреляции r и регрессии a и b рассчитываются методами математической статистики по имеющимся результатам испытаний двигателей данной серии.

Коэффициенты парной корреляции между различными параметрами газотурбины двигателей в пределах разброса принимают значения $r = 0,3 \dots 0,9$.

Для контроля качества измерений параметров с использованием закономерностей их разброса осуществляется сравнение подозрительной экспериментальной величины какого-либо параметра (в нашем случае $P_{\text{пр}}$) с его оценкой по другому измеряемому параметру (в нашем случае по $G_{m \text{ пр}}$) полученной с помощью соответствующего уравнения регрессии.

Если при этом не выполняется условие

$$|\hat{P}_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}| \leq \Delta p_{\text{усл}}, \quad (6.17)$$

то параметр признается определенным с грубой ошибкой. Такой способ контроля качества измерения позволяет выявить ошибки измерения параметров, которые нельзя определить предыдущим способом, основанным на проверке попадания вновь полученных экспериментальных точек в поле разброса характеристик двигателя данной серии (см. [рис.6.6](#)).

Чувствительность метода можно повысить, если для поиска аномальных измерений использовать не двумерные, а многомерные корреляционные связи, описываемые уравнениями регрессии вида

$$P_{\text{пр}} = a + b G_{m \text{ пр}} + c T_{m \text{ пр}}^* + \dots,$$

которые позволяют получить оценку величин какого-либо параметра по значениям всех остальных измеряемых параметров двигателя. Такой способ контроля требует применения более сложного алгоритма, так как отличие оценки $\hat{P}_{\text{пр}}$ от экспериментально определенной величины $P_{\text{пр}}$, превышающее величину $\Delta p_{\text{усл}}$, может быть вызвано грубой ошибкой определения не только параметра-функции, но и какого-либо из параметров-аргументов. Однако он позволяет снизить порог выявленных грубых ошибок измерения до величины 3...4 %.

Все описанные способы контроля качества измерений применяются в реальном масштабе времени, т.е. во время между измерениями параметров на двух соседних экспериментальных точках.

6.2. Восстановление характеристик по экспериментальным данным

После измерения параметров двигателя в последней экспериментальной точке осуществляется, так называемое, восстановление дроссельных характеристик. Под восстановлением характеристик понимается оценка истинных характеристик двигателя по экспериментальным данным с учетом имеющихся погрешностей измерения параметров и возможных выбросов, не отбракованных на предыдущих этапах обработки результатов измерений.

Для восстановления характеристик двигателя проводится аппроксимация экспериментальных точек некоторыми априорно выбранными функциями. Обычно в качестве этих функций выбираются полиномиальные зависимости вида

$$P_{\text{пр}} = a_0 + a_1 n_{\text{пр}} + a_2 n_{\text{пр}}^2 + \dots + a_m n_{\text{пр}}^m \quad (6.18)$$

В классе полиномиальных функций необходимо для каждого параметра выбрать в некотором смысле оптимальную функцию, которая наиболее точно описывает искомую дроссельную характеристику. При этом поиск оптимальных моделей дроссельных характеристик двигателя целесообразно вести не только среди полных многочленов, но и среди всех других, для которых ограничена лишь максимальная степень, а коэффициенты содержатся не при всех степенях режимного параметра. Это позволяет использовать при восстановлении дроссельных характеристик двигателя по малому количеству экспериментальных точек (5...8) достаточно сложные модели.

Поскольку количество экспериментальных точек при определении характеристик двигателя мало, а некоторые из них могут содержать не выявленные на этапе контроля грубые ошибки измерения, то выбор лучшей модели целесообразно осуществлять заранее на основе анализа выборок, полученных по расчетным или среднестатистическим характеристикам данного двигателя.

Для выбора лучшей модели целесообразно использовать один из, так называемых, "внешних" критериев селекции - критерий стабильности. Использование внешних критериев вместо традиционных критериев, базирующихся на распределении Фишера, обосновано тем, что последние требуют знания свойств генеральной совокупности рассматриваемой выборки, которые часто неизвестны, а также тем, что они субъективны, поскольку зависят от заданного уровня значимости.

При применении критерия стабильности имеющаяся выборка делится на две части: обучающую (*A*), по которой оцениваются коэффициенты модели (6.18), и контролирующую (*B*). Для зависимости $P_{\text{пр}} = f(n_{\text{пр}})$ критерий стабильности имеет вид

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (P_{\text{при}} - \hat{P}_{\text{при}})_A^2 + \sum_{j=1}^m (P_{\text{прj}} - \hat{P}_{\text{прj}})_B^2, \quad (6.19)$$

где $P_{\text{при}}$ и $P_{\text{прj}}$ - действительные значения параметра в выбранных точках обучающей и контролирующей выборок;

$\hat{P}_{\text{при}}$ и $\hat{P}_{\text{прj}}$ - оценки значений параметра в выбранных точках обучающей и контролирующей выборок, определенные по выражению (6.18);

n - количество точек обучающей выборки;

m - количество точек контролирующей выборки.

В качестве оптимальной модели выбирается та, для которой значение критерия S^2 минимально. При этом может оказаться, что имеется несколько конкурирующих моделей, для которых значение критерия стабильности примерно одинаково, но число или

номенклатура коэффициентов модели различны.

В этом случае в качестве наилучшей модели целесообразно выбрать модель, для которой значение максимальной невязки

$$\Delta = |P_{\text{пр}} - \hat{P}_{\text{пр}}|,$$

полученных во всех точках обучающей и контролирующей выборок минимально и меньше погрешности экспериментального определения параметра $P_{\text{пр}}$.

Разбиение выборки на обучающую и контролирующую можно осуществлять следующим образом: в обучающую последовательность включаются точки, соответствующие тем режимам работы двигателя, на которых обычно производится измерение параметров, а в контролирующую последовательность - остальные точки.

В качестве примера ниже приведены лучшие модели для восстановления дроссельных характеристик одного из отечественных ТРДД по 6...8 экспериментальным точкам

$$\begin{aligned}\hat{n}_{\text{ВДпр}} &= a_0 + a_3 n_{\text{ВДпр}}^3 + a_5 n_{\text{ВДпр}}^5, \\ \hat{G}_{m\text{ пр}} &= a_0 + a_1 n_{\text{ВДпр}} + a_3 n_{\text{ВДпр}}^3 + a_4 n_{\text{ВДпр}}^4 + a_6 n_{\text{ВДпр}}^6, \\ \hat{P}_{\text{пр}} &= a_0 + a_1 n_{\text{ВДпр}} + a_2 n_{\text{ВДпр}}^2 + a_3 n_{\text{ВДпр}}^3 + a_4 n_{\text{ВДпр}}^4.\end{aligned}$$

Максимальные значения невязок Δ при использовании этих моделей в 3...4 раза меньше погрешностей измерения параметров.

Определение численных значений коэффициентов a_i в выбранных для каждого параметра моделях (6.18) осуществляется по результатам испытания двигателя. Обычно для решения подобных задач применяется так называемый метод наименьших квадратов (МНК). Согласно этому методу в качестве оценок коэффициентов a_i принимаются значения \hat{a}_i , при которых удовлетворяется условие

$$\sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2 \rightarrow \min, \quad (6.20)$$

где n - количество экспериментальных точек.

Однако, формальное применение этого метода при восстановлении дроссельных характеристик ГТД по малому количеству экспериментальных точек (5...8) не позволяет получить адекватные результаты, если хотя бы одна из них содержит грубую ошибку измерения (см. рис. 6.7).

Поэтому при автоматизированном восстановлении характеристик ГТД по экспериментальным данным в условиях объективно существующей возможности появления грубых ошибок измерений целесообразно использовать так называемые устойчивые (робастные) статистические методы.

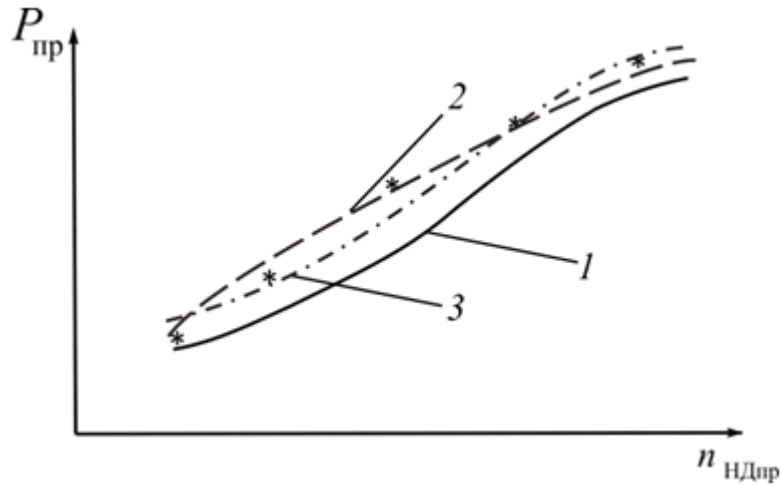


Рис. 6.7. Восстановление истинной характеристики (1) по экспериментальным точкам (*) методом наименьших квадратов (2), методом Хубера (3) при наличии грубой ошибки в средней экспериментальной точке

Достоинство этих методов заключается в том, что статистические оценки, получаемые с их помощью, мало чувствительны к аномальным экспериментальным данным.

Рассмотрим ниже сущность некоторых наиболее известных робастных методов, применимых к задаче восстановления характеристик ГТД.

Метод наименьших модулей. Сущность метода наименьших модулей состоит в аппроксимации погрешностей измерения случайными величинами, распределенными по закону Лапласа. Такую аппроксимацию целесообразно применять в тех случаях, когда измеряемые величины, кроме ошибок измерения, распределенных нормально, имеют ошибки описания (ошибки модели), которые соизмеримы с погрешностью измерения, или когда о случайной погрешности известно лишь то, что она обладает ограниченной дисперсией. Задача определения коэффициентов a_i в модели (6.18) решается исходя из условия:

$$\sum_{i=1}^n |P_i - \hat{P}_i| \rightarrow \min. \quad (6.21)$$

Метод Форсайта. Этот метод является попыткой найти компромисс между методом наименьших квадратов и методом наименьших модулей. При его применении коэффициенты полинома (6.18) находятся из условия:

$$\sum_{i=1}^n |P_i - \hat{P}_i|^r \rightarrow \min, \quad (6.22)$$

где $1 \leq r \leq 2$.

Метод Хубера. Он основан на том, что случайные погрешности измерения аппроксимируются случайными величинами, имеющими следующую функцию распределения:

$$F(t) = (1 - \varepsilon)N(t) + \varepsilon G(t), \quad (6.23)$$

где $N(t)$ - функция нормального распределения;

$G(t)$ - функция симметричного "загрязняющего" распределения;

ε - малое положительное число.

Такое разложение погрешности измерения соответствует представлению ее в виде суммы нормальной погрешности и некоторого возмущающего воздействия, которое с вероятностью

ε появляется при измерениях. Предполагается, что возмущающее воздействие можно представить распределенным по закону Лапласа, что все реализации случайной погрешности, больше по модулю некоторого заранее выбранного числа q , распределены по этому закону, а все реализации, меньше по модулю числа q , - по нормальному закону.

Задача определения коэффициентов a_j в модели (6.18) решается при условии

$$\sum_{i=1}^n F(P_i - \hat{P}_i) \rightarrow \min, \quad (6.24)$$

где

$$F(t) \sim \begin{cases} (P_i - \hat{P}_i)^2, & \text{при } |t| \leq q \\ |P_i - \hat{P}_i|, & \text{при } |t| \geq q \end{cases}. \quad (6.25)$$

Метод Хубера является наиболее предпочтительным для решения задачи восстановления характеристик ГТД по экспериментальным данным, так как принятые при его получении предпосылки наилучшим образом соответствуют ситуации, имеющей место при измерении параметров двигателя, когда наряду с ошибками измерения параметров, имеющих преимущественно закон распределения, близкий к нормальному, могут иногда появляться грубые ошибки измерения разного знака.

Применение метода Хубера для восстановления дроссельных характеристик ГТД при наличии грубой ошибки измерения дает существенно более адекватный результат, чем МНК (см. рис. 6.7).

Однако и устойчивые методы оценивания не позволяют получить адекватного восстановления экспериментальных характеристик ГТД, если с грубой ошибкой определена крайняя точка дроссельной характеристики (см. рис. 6.8).

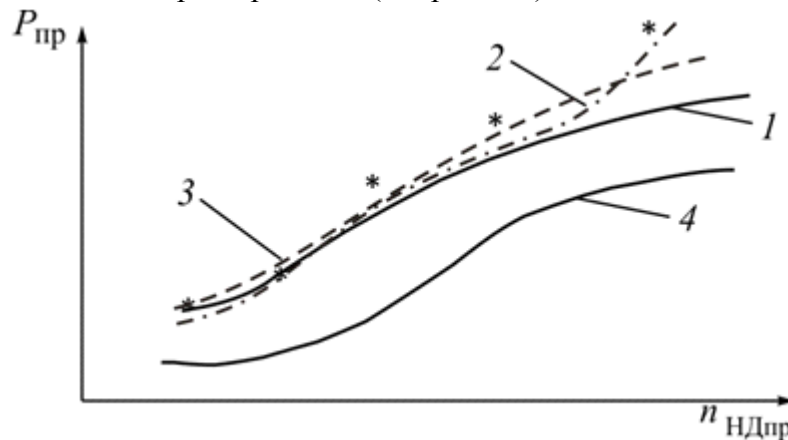


Рис. 6.8. Восстановление истинной характеристики (1) по экспериментальным точкам (*) методом Хубера (2) и методом Хубера с регуляризацией (3) по априорной характеристике (4) при наличии грубой ошибки в последней экспериментальной точке.

Для того чтобы повысить адекватность результатов, в этом случае необходимо проводить аппроксимацию экспериментальных точек методом Хубера с ориентацией на априорную (известную заранее) модель этой характеристики. В качестве априорной модели характеристики может быть использована расчетная, ранее полученная экспериментальная или среднестатистическая характеристика. Такой метод оценки коэффициентов a_j в (6.18) называют методом Хубера с регуляризацией. Он реализуется применением функции цели

вида:

$$\sum_{i=1}^n F(P_i - \hat{P}_i) + \alpha \int_{n_{\text{прmin}}}^{n_{\text{прmax}}} [\hat{P}^I(n_{\text{пр}}) - P_{\text{апр}}^I(n_{\text{пр}})] dn_{\text{пр}} \rightarrow \min \quad (6.26)$$

где $\hat{P}(n_{\text{пр}})$ - восстановленная по экспериментальным данным дроссельная характеристика;

$P_{\text{апр}}(n_{\text{пр}})$ - априорная модель дроссельной характеристики;

I - знак производной порядка I ;

$n_{\text{пр min}}, n_{\text{пр max}}$ - соответственно минимальное и максимальное значения интервала аргумента, на котором осуществляется сравнение восстанавливаемой и априорной характеристик;

α - коэффициент регуляризации.

Выбор первого порядка производной $I = 1$ означает, что при восстановлении характеристики по экспериментальным данным накладывается дополнительное требование об эквидистантности восстанавливаемой и априорной характеристики; выбор второго порядка производной $I=2$ означает, что при восстановлении характеристики допускается ее линейное расхождение с априорной характеристикой.

Величина коэффициента регуляризации α определяет степень влияния используемой априорной характеристики на получаемый результат. Если $\alpha = 0$, то априорная информация о характеристике игнорируется, и восстановление характеристики осуществляется только на основе полученных экспериментальных данных. При больших значениях α экспериментальные данные практически игнорируются, и получаемая характеристика по своим свойствам совпадает с априорной.

Оптимальную величину коэффициента регуляризации α выбирают исходя из того, чтобы полученная после решения задачи средневзвешенная дисперсия остаточных невязок между экспериментальными и восстановленными по модели (6.18) значениями параметров соответствовала погрешности измерения этого параметра.

Применение метода Хубера с регуляризацией позволяет получить существенно более адекватные результаты при восстановлении характеристик двигателя в случае наличия грубой ошибки в любой экспериментальной точке, в том числе и крайней (см. рис. 6.8)

Применение этого метода эффективно также при экстраполяции экспериментальных характеристик двигателя.

Метод позволяет получать достаточно надежные результаты при наличии грубых ошибок измерения не более чем в 20-30% экспериментальных точек.

Основные данные двигателя - тяга, удельный расход топлива, температура газа, частота вращения ротора и др. - определяются по восстановленным дроссельным характеристикам в зависимости от заданного значения тяги на каждом режиме с учетом возможного ее изменения в пределах допуска. При этом проверяется соответствие перечисленных параметров их значениям, заданным техническими условиями (ТУ).

Если основные данные двигателя соответствуют нормам ТУ, то по полученным параметрам отлаживается аппаратура топливопитания и управления. Реализованные в агрегатах системы автоматического управления значения параметров управления и соответствующие значения основных данных записываются в формуляр двигателя.

Если основные данные двигателя не обеспечиваются, то двигатель подлежит отладке, например, путем подбора площади сопла или соплового аппарата турбины. Если с помощью отладки не удастся обеспечить основные данные, то двигатель полностью или частично перебирают, узлы и элементы проточной части, ответственные за неполучение основных

данных, заменяют или дорабатывают.

Грамотная организация работ, связанных с обеспечением основных данных двигателя (его отладка, переборка, замена или доработка узлов), невозможна без его предварительной диагностики.

Поэтому по полученным в результате восстановления дроссельных характеристик параметрам и основным данным, прежде всего, оценивается состояние проточной части двигателя.

Предварительной оценкой состояния двигателя определяются отклонения основных данных, термогазодинамических параметров и скольжения частот вращения роторов данного двигателя от их значений в базовой модели при $P = \text{const}$. По величине и знаку этих отклонений оценивается состояние газогенератора и турбовентилятора.

Снижение эффективности двигателя по сравнению с базовой моделью (положительные отклонения $\delta C_{уд}$ и δT^*_T , а также температуры газа δT^*_i и его давления δp^*_i практически во всех характерных сечениях двигателя) объясняется уменьшением КПД компрессора и турбины ВД, если величина $\delta (n_{ВД} / n_{НД})$ отрицательная, или уменьшением КПД компрессора (вентилятора) и турбины НД, если величина $\delta (n_{ВД} / n_{НД})$ положительная (см. [рис.6.5](#)).

Наоборот, повышение эффективности двигателя (отрицательные отклонения $\delta C_{уд}$ и δT^*_T , δT^*_i и δp^*_i) объясняется увеличением КПД компрессора и турбины ВД, если величина $\delta (n_{ВД} / n_{НД})$ положительная, или увеличением КПД компрессора (вентилятора) и турбины НД, если величина $\delta (n_{ВД} / n_{НД})$ отрицательная.

Полученные по результатам предварительной оценки состояния двигателя выводы используются при идентификации его математической модели.

6.3. Идентификация математической модели двигателя

В настоящее время в практике создания двигателя чаще всего используются математические модели первого уровня []. Это система нелинейных уравнений, описывающая рабочий процесс и совместную работу узлов двигателя и связывающая параметры двигателя P с параметрами его узлов Θ и входными воздействиями X (внешними условиями и режимом работы):

$$P = f(\Theta, X) \quad (6.27)$$

При заданных внешних условиях (например, при САУ, $V_{\Pi} = 0$) и заданном режиме работы параметры двигателя определяются только параметрами его узлов, т.е.

$$P = f(\Theta). \quad (6.28)$$

Идентификация такой математической модели заключается в уточнении параметров узлов Θ по значениям параметров двигателя P , определенным в результате испытания.

Так как речь идет о небольшом отклонении искомых параметров, для решения этой задачи целесообразно математическую модель (6.28) представить в линеаризованном виде:

$$\delta P_j = \sum_{i=1}^n \frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i} \delta \Theta_i + \Delta_j; \quad j = \overline{1, k}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6.29)$$

где δP_j – отклонение измеренного значения j -го параметра двигателя от его расчетной величины, %;

$\delta \Theta_i$ – отклонение значения i -го параметра узла от его расчетного значения, %;

$\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ – коэффициент влияния i -го параметра узла на j -й параметр двигателя;

Δ_j – невязка, обусловленная ошибкой определения значения δP_j из-за ошибок измерений параметров двигателя и погрешностей, вызванных линеаризацией уравнений рабочего процесса;

k – количество параметров двигателя, измеряемых при испытании;

n – количество параметров узлов, подлежащих идентификации.

Коэффициент влияния $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ показывает на сколько % изменяется параметр двигателя

P_j при изменении на 1% параметра узла Θ_i . Величины коэффициентов влияния $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$

определяются чаще всего виртуальными экспериментами на ЭВМ с помощью нелинейной математической модели ГТД первого уровня.

При известных коэффициентах влияния $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ такая математическая модель представляет собой систему k линейных уравнений с n неизвестными. В этом случае задача идентификации математической модели состоит в оценке поправок $\delta \Theta_i$ к расчетным значениям параметров узлов (КПД узлов, коэффициентов потерь и т.п.) по отклонениям параметров двигателя δP_j , определенных в результате испытания (тяги, расхода топлива, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях проточной части), от их расчетных значений.

Целесообразность идентификации линеаризованной математической модели двигателя определяется тем, что она позволяет:

- применять методы идентификации, универсальные по отношению к типу и схеме двигателя (так как изменяются лишь количество уравнений и неизвестных, а также численные значения коэффициентов влияния);

- применять методы идентификации, универсальные по отношению к типу и схеме двигателя (так как изменяются лишь количество уравнений и неизвестных, а также численные значения коэффициентов влияния);

- использовать хорошо разработанное для линейных задач современное стандартное математическое и программное обеспечение;

- значительно сократить время решения задачи по сравнению с идентификацией сложной нелинейной модели.

Последнее особенно важно при идентификации математической модели автоматизированными системами испытаний ГТД, решающими задачи в темпе проведения эксперимента.

Особенность идентификации математической модели ГТД, в том числе линеаризованной, заключается в том, что, как отмечалось, количество неизвестных параметров узлов превосходит количество измеряемых параметров двигателя при значительном уровне погрешностей измерения. В связи с этим для получения наиболее достоверного решения задачи важное значение имеет различная дополнительная информация исследователя.

Приведенный ниже метод идентификации математической модели двигателя, позволяющий при решении этой задачи наиболее полно учесть различную дополнительную информацию, заключается в следующем.

Решение системы уравнений (7.29) осуществляется при условии:

$$\sum_{j=1}^k \gamma^2 j F(\Delta_j) + \alpha \sum_{i=1}^n \gamma^2 i F(\delta F_i - \delta \Theta_i^0) \rightarrow \min, \quad (6.30)$$

где $F(\cdot)$ – функция Хубера; $\delta \Theta_i^0$ – априорная оценка отклонения параметра узла от его расчетного значения; $\gamma_j = \frac{1}{\sigma_z(\delta P_j)}$ – коэффициент веса, обратно пропорциональный

погрешности измерения параметра двигателя, характеризуемой величиной $\sigma_z(\delta P_j)$;

$\gamma_i = \frac{1}{\sigma(\delta \Theta_i)}$ – коэффициент веса, обратно пропорциональный заранее заданной величине возможного разброса параметра узла; α – коэффициент регуляризации.

Первое слагаемое функции цели (6.30) учитывает результаты измерений параметров двигателя, второе – априорную информацию о наиболее вероятной оценке параметров узлов данного экземпляра двигателя. Коэффициент регуляризации α позволяет варьировать относительную значимость экспериментальных данных и априорной информации о параметрах узлов. Так, при $\alpha = 0$ априорная информация не учитывается, и получаемые при идентификации математической модели оценки $\delta \Theta_i$ будут определяться только информацией об измеренных параметрах двигателя. При $\alpha = 1$ оба вида информации учитываются с примерно одинаковой значимостью, а если $\alpha \geq 10$, то при решении задачи данные об измеренных параметрах двигателя в значительной степени игнорируются, и чем больше α , тем ближе оценки $\delta \Theta$ к их априорно заданным значениям $\delta \Theta^0$.

Алгоритм идентификации математической модели составлен таким образом, что решение задачи осуществляется при некотором оптимальном значении коэффициента регуляризации α_{opt} , при котором невязки Δ_j в уравнении (6.7) соответствуют погрешностям измерения параметров двигателя и погрешностям, вызванным неточностью используемых коэффициентов влияния.

Физический смысл коэффициентов веса γ_j и γ_i , введенных в функцию цели (7.30), заключается в следующем: чем больше погрешность измерения какого-либо параметра двигателя $\sigma_z(\delta P_j)$, тем большее значение невязки Δ_j допускается в соответствующем уравнении математической модели (6.29); чем больше заранее заданная величина

возможного разброса параметра узла $\sigma(\delta\Theta_i)$, тем больше допускаемое отличие получаемой при идентификации оценки от ее априорного значения $\delta\Theta_i^0$.

Применение в (7.4) функции Хубера $F(\cdot)$ позволяет существенно ослабить вредное влияние на значения получаемых оценок $\delta\Theta_i$ отдельных грубых ошибок измерения параметров двигателя, не выявленных на этапе предварительного анализа результатов испытаний, и неправильных представлений об априорных оценках отдельных параметров узлов $\delta\Theta_i^0$.

По найденным в результате идентификации оценкам $\delta\Theta_i$ корректируются характеристики узлов, а по нелинейной математической модели двигателя рассчитываются все его параметры.

6.4. Общая процедура автоматизированной обработки и термогазодинамического анализа результатов испытаний

На основании математической модели базового и исходных данных исследуемого двигателя (характеристик компрессора, турбины и других узлов, коэффициентов потерь, площадей характерных проходных сечений (в блоке *A* на [рис.6.9](#))) формируется в первом приближении его исходная нелинейная математическая модель (*НММ*) (в блоке *1*). По ней с учетом программы испытаний рассчитываются дроссельные характеристики, которые используются затем на этапе предварительного анализа (контроля качества измерений, восстановления характеристик, определения отличий экспериментальных характеристик от расчетных). По ней рассчитываются (в блоке *2*) также коэффициенты линейной математической модели (*ЛММ*), которые аппроксимируются по режиму (блок *3*)

с целью их быстрого определения в процессе идентификации *ЛММ* на промежуточных режимах. Наконец, с помощью *НММ* моделируются результаты испытания двигателя, для чего на дроссельные характеристики накладываются смоделированные на ЭВМ случайные ошибки измерений выходных параметров, параметров режима и внешних условий (в блоке *4*). Полученные таким образом прогнозируемые характеристики используются на заключительном этапе термогазодинамического анализа результатов испытания двигателя.

В ходе испытания двигателя (в блоке *B*) после измерения параметров в каждой экспериментальной точке, приведения их к САУ (в блоке *C*) выполняются процедуры контроля качества измерений (в блоке *5*).

Измеренные и рассчитанные параметры двигателя на каждом режиме записываются в базу данных.

Затем восстанавливаются характеристики двигателя и определяются его основные технические данные (в блоке *6*), находятся отличия экспериментальных значений параметров от их расчетных значений (в блоке *7*).

На основании сопоставления полученных отклонений выходных параметров двигателя с закономерностями отклонений параметров двигателей данного типа делается предварительное заключение о причинах отличия экспериментальных характеристик от расчетных (в блоке *8*). Эти данные совместно с другой дополнительной информацией (в блоке *14*) об индивидуальных особенностях испытуемого двигателя вносятся в качестве исходных для идентификации *ЛММ*. В результате идентификации *ЛММ* (в блоке *9*) определяются оценки отклонений параметров узлов и двигателя от их расчетных значений. Полученные результаты анализируются, сопоставляются с другой неформализованной информацией (в блоке *10*). В случае необходимости вносятся коррективы в дополнительную информацию, проводится повторная идентификация *ЛММ* и получается новый вариант оценки параметров узлов и двигателя в целом.

На основании наилучшего, с точки зрения исследователя, или нескольких конкурирующих между собой вариантов оценок параметров узлов уточняется *НММ* (в блоке *11*) и с ее помощью рассчитывается, как правило, несколько вариантов характеристик данного двигателя. Анализ этих вариантов, сравнение их между собой, возможное осреднение, а также сравнение с прогнозируемыми характеристиками и с базовой моделью является содержанием заключительного этапа термогазодинамического анализа (в блоке *12*). В результате формируется индивидуальная математическая модель исследуемого двигателя, оптимальным образом согласованная с экспериментальными и априорными данными, а также с неформализованными представлениями исследователя.

ГЛАВА 7. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предметом теоретического исследования является выдвинутая теоретическая модель изучаемого объекта или явления. Предметом экспериментального исследования является сам объект или явление. Но при этом одной из главных задач экспериментального исследования является получение адекватных исследуемому объекту математических моделей.

Обобщенная схема научных исследований при испытаниях ГТД показана на рис. 7.1.

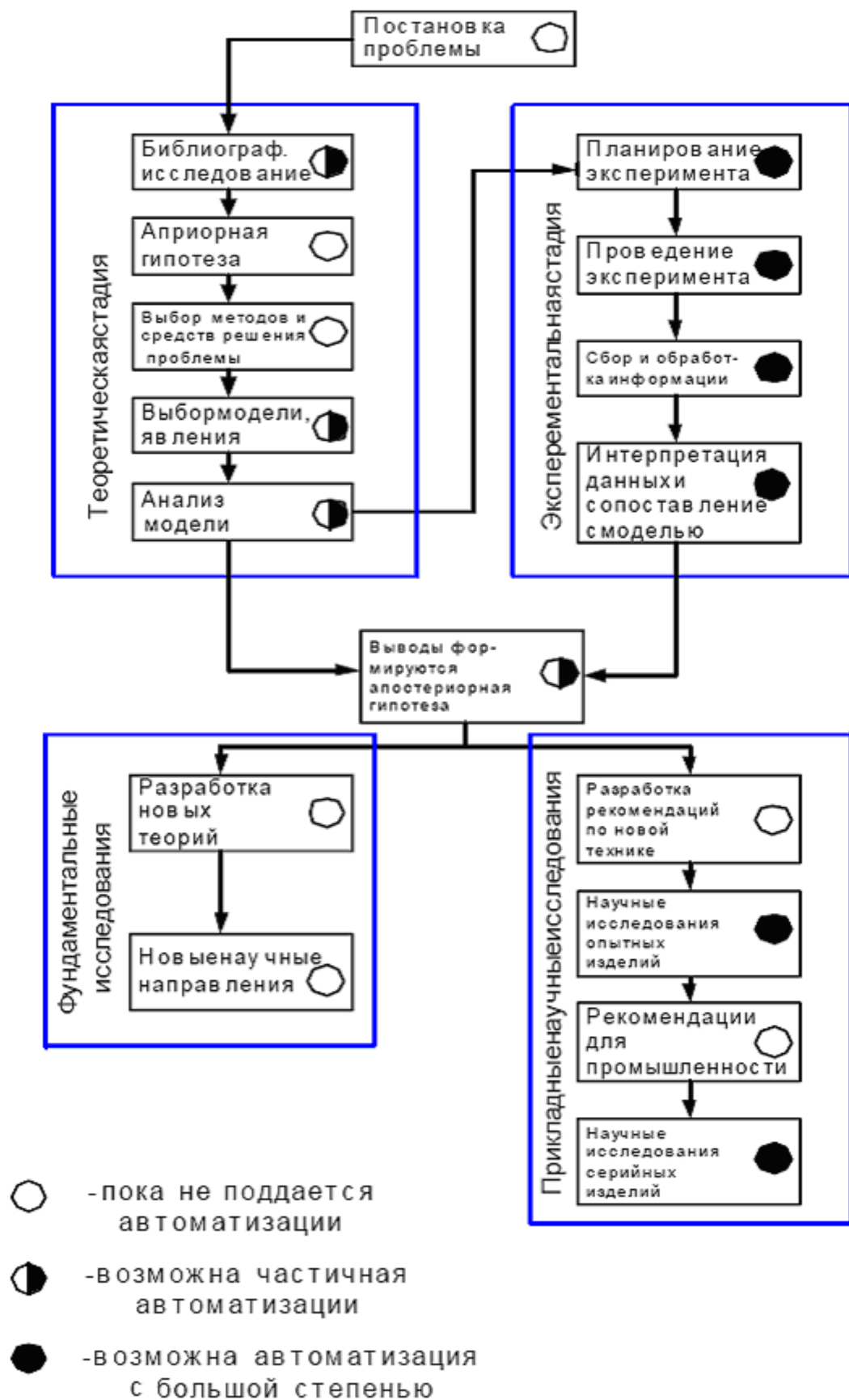


Рис. 7.1. Схема алгоритма научных исследований ГТД

7.1. Классификация научных исследований

Научно-технические эксперименты классифицируются на научные и технические испытания опытных, серийных изделий

Эксперименты разделяются на пассивные (осуществляется только регистрация параметров, без управления) и активные, где можно управлять объектом или процессом испытаний

Эксперименты бывают:

- лабораторные, промышленные и полевые;
- стационарные - на стенде и мобильные – на летающей лаборатории;
- качественные – для определения факта существования и количественные для получения численных результатов.
- рутинные – контрольно-сдаточные испытания, сложные - стадия опытной доводки двигателя и уникальные;
- натурные – испытывается непосредственно объект и модельные, где эксперименты проводятся на моделях

Используемые в экспериментах модели можно классифицировать на:

масштабные модели – с учетом выполнения критериев подобия, однако не всегда критерии подобия можно сохранить.

аналоговые модели (АВМ) реальные процессы заменены электрическими цепями, положительным является то, что результаты получаются в реальном масштабе времени, недостаток – погрешность изготовления электрических элементов, ошибки 5...10 %.

математические модели (кибернетические, имитационные модели) - являются основой вычислительного эксперимента. Это системы управления, графики, алгоритмы (которые зачастую нельзя явно решить). ММ могут способствовать замене испытаний, на их основе прогнозируют поведение объекта в разных условиях.

Автоматизация аналитических вычислений базируется на:

- подстановке выражений в выражения;
- упрощении выражений;
- дифференцировании и интегрировании;
- решении системы линейных алгебраических уравнений ;
- решении дифференциальных уравнений;
- вычислении пределов;
- выполнении действий над рядами и матрицами.

7.2. Автоматизированные системы научных исследований

АСНИ отличаются от других типов автоматизированных систем (АСУ, САПР и др.) характером информации, получаемой на выходе из системы - это обработанные данные, но главное - это получение или уточнения на основе этих данных математической модели исследуемых объектов. Эти модели затем могут быть использованы в АСУ или САПР.

Применение АСНИ при отработке ГТД позволяет:

1. Повысить эффективность и качество научных исследований.
2. Повысить эффективность и качество разрабатываемых объектов.
3. Получать качественно новые результаты, достижение которых без АСНИ просто невозможно.
4. Сократить сроки и уменьшить трудоемкость научных исследований.

В составе АСНИ имеются различные подсистемы. Подсистема - это выделенная по некоторым признакам часть АСНИ, обеспечивающая выполнение определенных автоматизированных процедур, например, измерение параметров, ввод и вывод данных.

Подсистемы делятся на объектные подсистемы, которые зависят от объекта исследования (например, подсистема измерения) и обслуживающие подсистемы, которые не зависят от исследуемого объекта.

Все подсистемы состоят из следующих компонентов:

- методического обеспечения (теории, методы, способы, алгоритма, стандарты и др. данные).
- техническое обеспечение (средства ЭВМ, измерительные системы, датчики и др.).
- программное обеспечение (тексты программ на машинных носителях, эксплуатационная документация к операционной системе ЭВМ).
- информационное обеспечение (базы данных, базы значений на машинных носителях).
- организационно-правовое обеспечение (приказы, инструкции, штатное расписание) реализующее взаимодействие различных структурных подразделений и организаций при эксплуатации АСНИ.

7.3. Система сбора и обработки информации при автоматизации испытаний ГТД

В области автоматизации испытаний в настоящее время выработан единый подход к построению автоматизированных систем измерений и контроля. В состав системы обязательно входит станция сбора данных.

Процесс сбора данных и выдача управляющих воздействий на объект испытаний выполняется на уровне этой станции.

Обработка информации по технологии, визуализация, протоколирование и интерфейс с пользователями выполняется на уровне автоматизированных рабочих мест (АРМ).

На этапе автоматизации в качестве устройств сбора данных используются различные аппаратно-программные комплексы. Данные комплексы по своим характеристикам должны удовлетворять требованиям к точности, быстродействию и модульности системы сбора данных. При автоматизации опытных испытаний, число измерительных каналов достигает 2000 и более. Программное обеспечение комплексов должно быть адаптивно для мониторинга большого числа параметров и подключения новых каналов, но не быть достаточно сложно и закрыто при необходимости изменения технологии испытаний.

Для исследовательских испытаний с последующей сложной математической обработкой данных, а также для испытаний современных авиационных изделий иностранного производства, наиболее предпочтительно использовать устройства сбора данных в стандарте VXI, который представляет собой стандарт на контрольно-измерительную и управляющую аппаратуру высшего класса точности.

Программное обеспечение, поддерживающее аппаратуру в этом стандарте, имеет высокую степень унификации. Прогрессивные инструментальные среды Lab VIEW, LabWINDOWS, Bridge VIEW, HP VEE позволяют быстро разрабатывать приложения сложной обработки данных на уровне технолога и расчетчика.

АРМ бригадира-испытателя также является обязательным в составе автоматизированной системы. Именно на нем ведется управление техпроцессом испытаний.

В составе системы может присутствовать АРМ контролера. Основное назначение – проверка соответствия параметров двигателя требуемым нормам со стороны бюро технического контроля. АРМ бригадира и контролера находятся непосредственно на испытательном стенде и получают информацию в реальном темпе испытаний с устройства сбора данных через сетевой интерфейс.

Результаты испытаний в режиме реального времени поступают в единый корпоративный центр данных. Хранение результатов в едином центре обеспечивает:

- гарантированное сохранение данных в соответствии с жесткими правилами отказоустойчивости и катастрофоустойчивости;
- гарантированную защиту данных от несанкционированного использования, изменения и уничтожения;
- авторизованный доступ к данным различным категориям пользователей;
- высокую скорость работы приложений (программ анализа данных) с использованием технологии «клиент – сервер»;
- работу всех пользователей с единым электронным документом.

Все пользователи получают информацию посредством корпоративной вычислительной сети. При этом обработка данных осуществляется на мощных корпоративных серверах, а по сети передаются только результаты обработки.

В состав автоматизированной системы могут быть включены:

АРМ заказчика, который позволит представителям заказчика следить за ходом испытаний на всей испытательной станции;

АРМ технологов для отслеживания изменений в технологии испытаний;

АРМ конструктора для анализа результатов испытаний;

АРМ динамиста для контроля и регистрации динамических параметров;

АРМ диспетчера для контроля за текущим состоянием производства.

Такой подход увеличивает количество участников испытаний и повышает надежность принимаемых технологических решений.

7.4. Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК)

Это комплекс, который включает в себя центральную ЭВМ, периферийные ПЭВМ, линии связи, программное обеспечение систему сбора и обработки информации, получаемой при испытаниях (рис. 7.2).

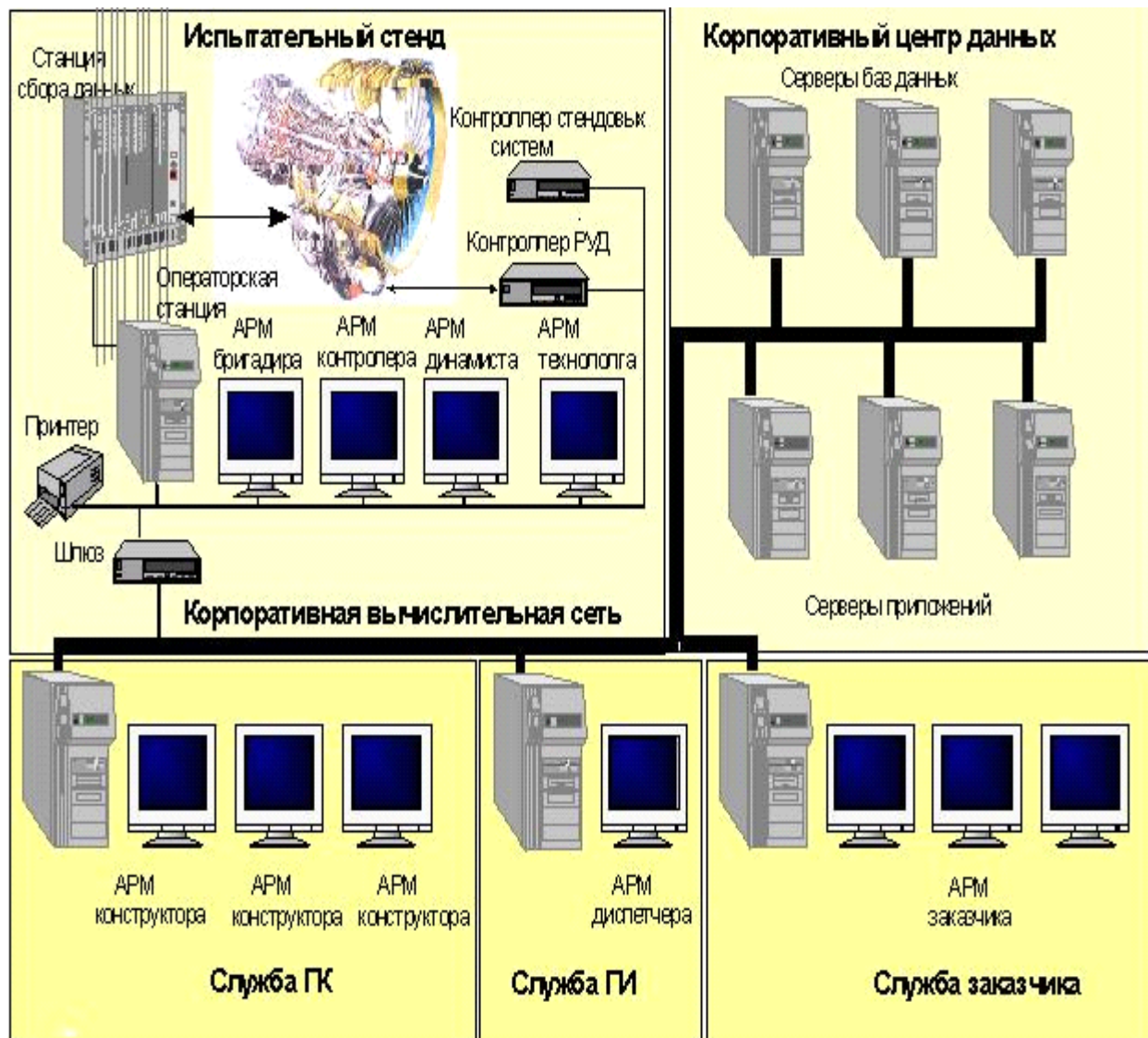


Рис. 7.2. Структурная схема измерительного комплекса

Он обеспечивает:

сбор и обработка с выдачей на принтеры и в виде распечатки, получаемой при испытаниях информации; выдача протоколов испытаний;

автоматическое измерение параметров объекта испытаний и стеновых систем на установившихся и неустойчивых (переходных) режимах;

автоматическое и ручное управление режимами работы изделия и стеновых систем, поддержание режимов в технологическом цикле испытаний всех видов, в том числе циклических;

связь и управление технологическими системами в комплексе с САУ двигателей;

математическую обработку и сравнение полученных экспериментальных характеристик испытуемого объекта с расчетными (заданными);

выдачу оперативной дискретной информации (в том числе с визуализацией) в режиме испытания;

контроль и замер параметров при проведении специальных испытаний;

выдачу протокола испытаний (в том числе в виде распечатки) таблиц параметров и графиков характеристик;

выдачу рекомендаций и управляющих сигналов на исполнительные механизмы по корректировке регулировки объекта испытаний в целях получения заданных характеристик;

выдачу визуальной информации об аварийных ситуациях на объекте испытаний и испытательном стенде, и автоматическую блокировку с выдачей необходимой информации на пульт управления;

автоматическую визуализацию (видеосъемки, включая высокоскоростную) процессов, происходящих с объектом в процессе испытания;

калибровку и автотестирование каналов и элементов измерительной системы, электрических схем и электрических систем перед испытанием и в ходе испытания;

архивирование результатов испытаний и обеспечение записи на носители информации;

передачу информации, в том числе оперативной, о полученных результатах испытаний в обработанном виде в ОКБ в автоматическом режиме по заданным адресам;

автоматическую увязку измеренных параметров с метеоусловиями;

точный учет расхода топлива по этапам испытаний с идентификацией конкретного вида испытаний и исполнителя;

обмен информацией по каналу общего пользования (КОП) при прочностных испытаниях;

измерение, обработку и оценку эмиссионных характеристик;

защиту передаваемой и получаемой информации от помех, утраты и несанкционированного доступа.

Все функции ИВК должны реализовываться в темпе эксперимента и в масштабе реального времени.

Схема системы сбора и обработки информации ИВК показана на [рис.7.3](#).

7.5. Назначение и устройство автоматизированной системы экспресс-анализа для испытаний ТРДД АИ-25

Автоматизированная система для обработки результатов испытаний двигателя ТРДД АИ-25 с использованием платы ввода-вывода и ПЭВМ предназначена для сбора, преобразования и обработки измерительной информации в темпе проведения испытания. Данная система была внедрена в учебный процесс на кафедре ТДЛА.

Она обеспечивает:

- усиление и преобразование электрических сигналов с датчиков регистрирующих тягу двигателя, давление, температуру, расход топлива и частоту вращения валов двигателя;
- преобразование аналоговых электрических сигналов в цифровой код;
- первичную обработку данных, получение физических значений параметров;
- вторичную обработку данных, включающую осреднение параметров по сечениям, вычисление основных параметров ГТД, их приведение к САУ;
- выдачу результатов обработки данных на печать в виде протокола испытания содержащего измеренные и приведенные параметры.

Датчики и вторичная аппаратура представляют собой систему, задача которой наиболее точно и стабильно измерять физические параметры, преобразовывая их в соответствующие изменения электрических сигналов.

При испытании двигателя на учебном стенде осуществляется измерение следующих его основных параметров: тяги P , расхода топлива G_T , частоты вращения роторов низкого $n_{нд}$ и высокого $n_{вд}$ давления, температур T_i^* и давлений p_i^* , p_i в характерных сечениях его проточной части

Схема препариования двигателя приведена на [рис.7.4](#). Каналы измерения, датчики и приборы, используемые на испытательном стенде приведены в [таблице7.1](#).

Для повышения точности определения среднемассовых значений температуры и давления их величины измеряются в нескольких точках соответствующих сечений.

Номенклатура измеренных параметров, схема препариования, датчики и измерительные приборы выбраны исходя из необходимости определения наиболее важных параметров двигателя и его узлов, а также из условия экономической целесообразности с учетом учебного характера испытаний.

Блок схема АСНИ на стенде для испытания ТРДД АИ-25 показана на [рис.7.5](#).

Рассматриваемая автоматизированная система испытаний ориентирована на получение основных газодинамических характеристик и технических данных двигателя АИ-25.

В целом структурная схема данной автоматизированной системы испытаний ГТД включает три основных функциональных элемента:

- 1 датчики (первичные преобразователи);
- 2 аналого-цифровой интерфейс, который преобразует сигналы с датчиков в цифровой код, т.е. в вид, пригодный для ввода в ПЭВМ;
- 3 ПЭВМ, которая выполняет задачи получения значений параметров, осуществляет отбраковку аномальных значений, проводит осреднение параметров, приведение параметров к САУ и вывод полученных данных на монитор с последующей распечаткой протокола результатов испытаний.

Информация с двигателя обрабатывается непосредственно в темпе поступления в ПЭВМ и система измерений обеспечивает выдачу протокола измерений в период между двумя

соседними измерениями, величина которого обусловлена технологией проведения испытания (при определении дроссельных характеристик он равен 3-5 минутам).

Поэтому считается, что система работает в так называемом реальном масштабе времени и с её помощью может быть осуществлена экспресс-обработка испытаний двигателя.

Примененный на стенде измерительно-вычислительный комплекс, входящий в автоматизированную систему, включает ПЭВМ с принтером, АЦП на плате ввода-вывода типа L-152, блок оптической развязки и защиты АСИ, а также датчики и вторичная аппаратура, в состав которой входят усилители и преобразователи.

Данный ИВК относится к системам с частичной автоматизацией, т.к. обеспечивает только сбор, обработку измерительной информации.

Системы с комплексной автоматизацией включают в себя подготовку, управление, контроль, обработку измерительной информации, оформление результатов испытаний и их анализ, что позволяет повысить качество проводимых испытаний ГТД и существенно сократить время их проведения.

7.6. Измерительно-вычислительный комплекс с комплексной автоматизацией процесса испытаний ТРДД АИ-25.

Цели создания комплексной автоматизированной системы Испытаний

Целью создания системы являются переход на более высокий качественный уровень при решении следующих основных технологических, организационных и экономических задач:

- повышение эффективности и надежности управления режимами работы ГТД и стендовых систем,
- повышение информативности и достоверности полученных результатов,
- оптимизация режимов работы, сокращение времени испытаний и экономия топлива и ресурса,
- увеличение сроков эксплуатации, снижение финансовых затрат на испытание двигателя,
- улучшение условий труда эксплуатационного персонала.

Поставленные цели решаются путем:

- рациональной автоматизации сбора, обработки и представления информации пользователям,
- автоматического и ручного управления исполнительными механизмами,
- оптимального регулирования параметров технологических процессов,
- выявления опасных и предаварийных ситуаций в автоматическом режиме.

Основным требованием обеспечения процесса испытаний ГТД с использованием комплексной автоматизированной системы на учебно–исследовательском стенде является автоматизация предпусковых операций, запуск, установки режимов работы двигателя, его остановки после выполнения программы.

Управление стендом в ручном режиме осуществляется оператором с пульта, на котором размещаются все органы управления и штатные индикаторы двигателей АИ–9 и АИ–25.

Управление может осуществляться при помощи виртуальных манипуляторов, отображаемых на АРМ оператора и при помощи штатного рычага управления двигателем.

При автоматическом режиме управления ходом испытания оператор имеет возможность в любой момент времени вмешаться в процесс управления — остановить двигатель с помощью кнопки «Аварийный останов».

Запуск и останов двигателя АИ–25 осуществляется в соответствии с инструкцией по запуску двигателя АИ–25, а так же в соответствии с инструкцией по запуску АИ–9.

До и после испытания выполняются градуировки измерительных каналов и формируются градуировочные зависимости.

Структура автоматизированной системы и средства связи для информационного обмена

Автоматизированная система испытаний АИ–25 состоит из следующих главных компонентов, (рис. 7.6):

- ≡ датчики и исполнительные механизмы,
- ≡ программируемый логический контроллер,
- ≡ АРМ оператора,
- ≡ сервер БД,
- ≡ АРМ преподавателя и студента.

Помимо вышеперечисленных компонентов в систему включены демонстрационные панели, сервер видеоконференции, видеосервер, коммуникационное оборудование.

АСИ АИ–25 образует два уровня:

- ≡ нижний уровень: датчики, контроллер, демонстрационные панели и АРМ оператора;

≡ верхний уровень: сервер БД и АРМ преподавателя и студента.

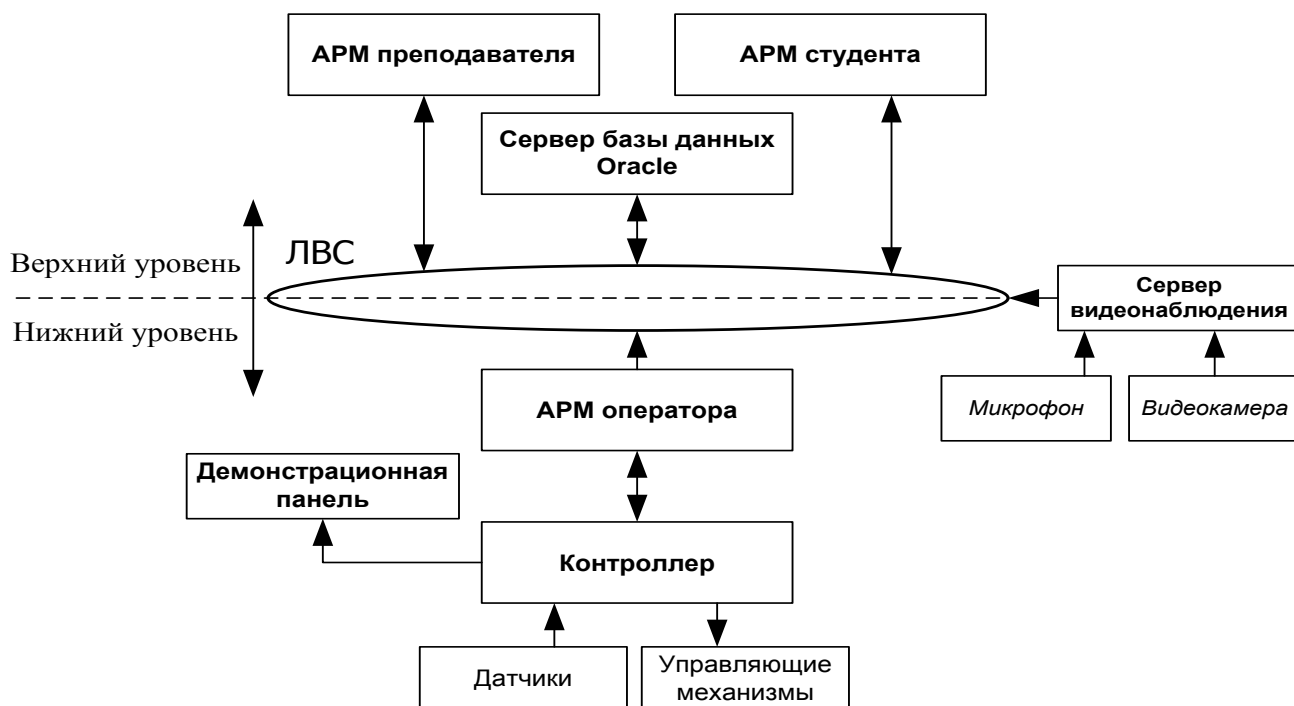


Рис. 7.6. Схема взаимодействия компонентов АСИ АИ-25

Нижний уровень системы функционирует в реальном времени и обеспечивает регистрацию параметров технологического процесса.

Система нижнего уровня строится на базе программно-аппаратных средств SIMATIC S7 фирмы Siemens

Аппаратные средства системы нижнего уровня включает программируемый контроллер SIMATIC S7-300 с набором модулей ввода/вывода, демонстрационные панели, АРМ оператора.

Для обеспечения информационного обмена между контроллером и демонстрационными панелями используется сеть нижнего уровня Profibus.

Информационная подсистема верхнего уровня функционирует на базе локальной вычислительной сети и включает сервер баз данных, автоматизированные рабочие места преподавателя и студентов, сервер видеоконференции. Все компьютеры подключаются к ЛВС с использованием стандартного сетевого адаптера 10/100 Мбит/с через коммутатор Ethernet.

На сервере БД формируется база данных технологической информации АСИ АИ-25 в целом, поддерживается возможность конфигурирования базы данных и сопровождения архива значений параметров. Сбор/передача данных с АРМ оператора в архив на сервере БД осуществляется специализированным интерфейсным приложением.

Функционально автоматизированную систему испытаний АИ-25 можно разделить на следующие подсистемы:

- управления двигателем, включающая, комплекс датчиков, преобразующих физическое значение параметра в изменение электрических параметров, комплекс исполнительных механизмов и программируемый логический контроллер, предназначенный для ввода/вывода и предварительной обработки контролируемых параметров и управляющих сигналов стенда;
- визуализации процесса испытаний, состоящей из демонстрационных панелей и АРМ оператора;
- информационная подсистема, включающая сервер баз данных на основе СУБД Oracle для длительного хранения данных и видеопотока и учебно-исследовательские

рабочие места, предназначенные для организации и визуализации процесса испытаний, проведения научно–исследовательских расчетов и выполнения учебных лабораторных работ;

- подсистема видеоконференции
- подсистема видеонаблюдения
- подсистема локальной вычислительной сети.

В основу построения АСИ АИ–25 положена концепция открытых систем, базирующаяся на применении международных стандартов в области автоматизации и современных информационных технологий. К основным проектным решениям относятся следующие:

- использование стандартных программно-аппаратных средств SIMATIC для системы контроля двигателем, обеспечивающих возможность расширения и модифицирования системы по контролируемым параметрам и т.п
- применение стандартных промышленных шин Industrial Ethernet и Profibus;
- использование инструментальной системы программирования контроля и визуализации данных (SCADA–системы) WinCC (Siemens, Германия), обеспечивающей высокоуровневое программирование человеко-машинного интерфейса для автоматизированных рабочих мест.

Принятые решения соответствуют общей тенденции системной интеграции систем автоматизации.

7.7. Процесс испытания двигателя с использованием комплексной АСИ

Процесс испытания ТРДД АИ-25 с использованием комплексной автоматизированной системы состоит из нескольких этапов:

1. После включения всех систем стенда и автоматизированной системы испытаний на АРМ оператора запускается ПО «АИ25». На один из мониторов выводится изображение двигателя, фиксируемое с помощью цифровой камеры, установленной в боксе. На втором мониторе АРМ оператора и на 5 демонстрационных панелях осуществляется контроль всех измеряемых параметров на виртуальных приборах в виде манометров или гистограмм ([рис.7.7](#)).

При проведении лабораторных работ студенты могут снимать показания с демонстрационных панелей.

На АРМ оператора задается программа испытаний, в которой прописываются необходимые режимы, на которых производятся измерения параметров, длительность работы на режимах. Для запуска двигателя с АРМ оператора на мониторе отображаются кнопки управления ([рис.7.7](#)).

2. В процессе подготовки к запуску со стенда управления или с АРМ оператора подаются команды на открытие заслонок канала всасывания и башни шумоглушения, а также включаются топливные насосы. Если опрос системы сигнализации и блокировки указывает, что заслонки канала всасывания и башни шумоглушения открыты, в топливной магистрали установлено необходимое давление, то на мониторе загорается табло «Стенд готов к пуску».

3. В автоматическом режиме управления процессом испытания запуск вспомогательного газотурбинного двигателя АИ-9 происходит автоматически после появления сигнала о готовности стенда к запуску.

В ручном (со стенда) и полуавтоматическом (с АРМ оператора) режимах для запуска АИ-9 требуется нажать соответствующую кнопку на стенде или на экране монитора. При этом на АРМ оператора контролируется режим работы вспомогательного двигателя ([рис.7.7](#)).

После прогрева в течение 1-2 минут, если все параметры в норме, в автоматическом режиме производится запуск ТРДД АИ-25. В ручном и полуавтоматическом режиме для запуска ТРДД АИ-25 требуется нажатие кнопки.

Во время запуска АИ-25 контролируются следующие параметры двигателя: температура на срезе сопла первого конура и давление в топливной системе ГТД.

В случае если контролируемые параметры не соответствуют заданным значениям, то контроллер выдает команду «Аварийный останов», все системы отключаются, и запуск двигателя прекращается.

Если запуск двигателя АИ-25 проходит без отклонения параметров от ТУ, то в соответствии с заданной программой происходит отключение

АИ-9, а ТРДД АИ-25 прогревается на режиме «малого газа» в течение 1-2 минут. Кнопка «Аварийный останов» на стенде и панели оператора доступна в любом режиме управления и в любом режиме работы стенда.

4. После прогрева ТРДД АИ-25 контроллер, управляя положением РУДа с помощью специального исполнительного устройства, переводит двигатель на 1-ый режим работы по значению частоты вращения ротора высокого давления. При достижении заданного режима и работы на нем двигателя в течение 1-2 минут производятся измерения параметров, обработка результатов испытаний на данном режиме и вывод на монитор АРМ оператора таблиц с измеренными параметрами.

Через заданный по программе интервал времени происходит перевод ТРДД АИ-25 на следующий режим работы и после его установки, аналогично первому режиму производятся измерения и обработка параметров. Аналогичные операции производятся на всех режимах

работы ТРДД, количество которых задается программно перед испытанием.

5. После выполнения заданной программы контроллер отключает авиационный двигатель после его работы в режиме малого газа в течение 20-40 секунд. Сохраненные значения параметров на АРМ оператора можно посмотреть в виде графиков и таблиц. В ходе испытаний значения параметров и изображение двигателя, фиксируемое с помощью видеокамеры, записываются в базу данных на сервере Oracle и становятся доступными для математической обработки на АРМах студентов и преподавателя.

В процессе испытания студенты знакомятся с особенностями системы измерения параметров ТРДД. Снятие экспериментальной дроссельной характеристики проводят на 4-х режимах работы двигателя: взлетный режим, максимальный продолжительный режим, крейсерский режим и режим малого газа.

Результаты эксперимента заносятся студентами в протокол испытания, и проводится обработка полученных данных с последующим построением экспериментальных зависимостей и анализом рабочих процессов в ТРДД АИ-25.

Контроль параметров при градуировке измерительных каналов осуществляется на мониторе АРМ оператора ([рис.7.8](#)).

Процесс выполнения лабораторных работ в информационной среде

В информационной среде поддерживаются все организационно-технические аспекты, сопровождающие процессы организации выполнения лабораторных работ и представление испытания двигателя:

- разграничение прав доступа к системе;
- регистрация студентов;
- доступ к методическим материалам;
- наблюдение за процессом испытания двигателя на рабочих местах преподавателя и студентов с задержкой в несколько секунд от реального времени (определяется на уровне настроек);
- воспроизведение процесса испытания на основе архивных данных с дискретностью регистрации данных (минимум 1 секунда);
- доступ к значениям параметров по требуемому срезу времени любого испытания;
- регистрация результатов (расчётных значений) выполнения лабораторных работ в базе данных.

До начала эксплуатации информационной среды администратор системы регистрирует пользователей и назначает им соответствующие права. На основе назначенных прав каждый участник процесса испытания двигателя будет иметь доступ к соответствующим возможностям системы.

Для проведения лабораторных работ преподаватель регистрирует студентов в системе и определяет лабораторную работу для выполнения. Допуск студента к выполнению работы также фиксируется в базе данных.

Далее преподаватель уточняет, с использованием каких испытаний будет выполняться лабораторная работа - на реальном испытании или на основе испытания ранее записанного в архив. Значения параметров испытания из архива воспроизводятся с дискретностью 1 секунда и, таким образом, студент имеет возможность наблюдать испытание в псевдо-реальном времени.

Студенты получают доступ к методическим материалам, к архиву испытаний или к просмотру реального испытания. Возможности студентов по ручной регистрации данных с отображаемых на дисплее приборов одинаковы, как при наблюдении реального испытания, так и при просмотре испытания из архива.

Кроме ручной регистрации студенты имеют возможность выбрать из архива любое испытание, просмотреть из него любой перечень параметров и экспортировать в файл

формата Excel требуемые значения параметров за указанное время.

На основе полученных данных студент выполняет требуемые расчёты и вносит их в базу данных. Преподаватель в эту же базу данных вносит свои «эталонные» значения. Имеется возможность визуального сравнения расчётных значений студента и преподавателя.

Результат (оценка) выполнения лабораторной работы студентом фиксируется преподавателем в базе данных.

7.8. Структура программного обеспечения измерительно -вычислительного комплекса с полной автоматизацией процесса испытаний ТРДД АИ-25

Основные требования к системному программному обеспечению определены в техническом задании на автоматизированную систему измерений учебного стенда для испытаний ТРДД АИ–25.

АСИ АИ–25 выполнена с использованием серийных программных продуктов. Программное обеспечение сервера баз данных по ТЗ включает следующие компоненты: операционную систему – Microsoft Windows Server 2003, систему управления базами данных (СУБД) – Microsoft SQL Server 2000 или Oracle,

ПО для доступа к данным, хранящимся в БД на базе СУБД,

ПО для резервирования и хранения данных.

Программное обеспечение для клиентских компьютеров включает следующие компоненты:

операционную систему – Microsoft Windows XP,

ПО для доступа к данным, хранящимся в БД на базе СУБД,

ПО для работы с текстовыми, графическими данными.

Все программные продукты выбирались из условия взаимодействия с современными клиент-серверными СУБД.

Программные продукты имеют модульную структуру и объединяются полностью или частично в программный комплекс и должны взаимодействовать с различными внешними устройствами. Программные продукты должны быть надежными, эффективными, коммуникативными и иметь возможность быстрой модификации.

При создании АСИ АИ–25 использовались следующие программные средства:

ПО SIMATIC STEP7 версия 5.4 SP1 фирмы SIEMENS (Германия) для разработки программы для контроллера,

ПО SIMATIC WinCC flexible 2005 Advanced фирмы SIEMENS для разработки проекта для операторских панелей,

SIMATIC WinCC версии 6.0 SP4 фирмы SIEMENS для разработка проекта для операторской станции,

Borland Delphi 7 компании CodeGear для разработки программ для АРМ преподавателя и студентов.

Программное обеспечение АСИ АИ–25 построено как децентрализованный программный комплекс, в котором программы и данные распределены между различными уровнями системы.

Программное обеспечение АСИ АИ–25 представляет собой совокупность программных средств системного ПО и прикладного программного обеспечения, разработанного с целью реализации функциональных возможностей автоматизированной системы.

Системное ПО

Системное ПО АСИ АИ–25 включает в себя следующие компоненты:

операционную систему MS Windows 2003 Standard Server, установленную на сервере БД и сервере видеоконференций,

операционную систему MS Windows XP Prof, установленную на автоматизированных рабочих местах,

операционную систему MS Windows CE 3.0, установленную на демонстрационных панелях,

систему управления базами данных Oracle 9i, установленную на сервере БД,

SCADA-систему WinCC.

Прикладное ПО

Прикладное ПО представлено совокупностью взаимосвязанных в рамках автоматизированной системы измерений АИ–25 программных средств, обеспечивающих выполнение всех функций системы. Все прикладное ПО функционирует в среде системного программного обеспечения.

Прикладное ПО АСИ АИ-25 состоит из следующих компонентов:

- проект STEP7, определяющий конфигурацию контроллера,
- проект WinCC на АРМ оператора,
- проект WinCC Flexible для демонстрационных панелей,
- ПО сбора данных,
- ПО создания и поддержки информационной среды,
- ПО визуализации и обработки информации,
- ПО для работы с видеоизображениями,
- ПО описания испытаний и журнализация выполнения лабораторных работ.

Интерфейс Windows используется в качестве стандарта для взаимодействия пользователей со всеми компонентами комплекса.

Прикладное программное обеспечение контроллера (ППО ПЛК) предназначено для реализации функций сбора и обработки информации от модулей ввода-вывода, автоматического управления процессом и дистанционного управления.

ППО контроллера осуществляет следующие функции:

- сбор и обработка информации от датчиков температуры, давления и т.д.,
- вычисление физических значений по градуировочным характеристикам,
- проверка данных по установкам,
- сбор и обработка информации о состоянии, исправности технологического оборудования, о наличии напряжения в управляющих цепях задвижек и насоса,
- анализ данных для выявления условий выработки управляющих воздействий,
- автоматическое и ручное дистанционное управление основным и вспомогательным оборудованием,

- передача данных в SCADA–систему WinCC на АРМ оператора,
- диагностика системы.

Прикладное программное обеспечение демонстрационных панелей осуществляет следующие функции:

- предоставление данных о ходе технологического процесса,
- предупредительная и предаварийная сигнализация,
- архивация значений процесса.

Прикладное программное обеспечение АРМ оператора предназначено для получения значений параметров с контроллера, отображения полученной информации и ее архивирования.

ППО операторской станции осуществляет следующие функции:

- получение текущих значений всех параметров, обрабатываемых контроллером,
- предоставление данных о ходе технологического процесса,
- дистанционное управление технологическим оборудованием,
- формирование предупредительной и аварийной цветовой и звуковой сигнализации,
- регистрация аварийных, предупредительных и технологических сообщений с возможностью их просмотра,
- регистрация действий технологического персонала,
- контроль состояния системы,
- архивация выбранного подмножества значений процесса с возможностью их визуализации в виде графиков.
- разграничение прав пользователей.

Программное обеспечение сбора данных предназначено для получения данных об испытаниях АИ–25 (аналоговые и дискретные параметры работы двигателя, действующие

значения уставок параметров, сообщения и видеоизображение испытания) и их записи во вторичную БД (на сервере БД).

Программное обеспечение сбора данных об испытании выполняет следующие функции:

подключение к АРМу оператора, как к источнику данных испытания;
анализ параметра состояния испытания ("испытание проводится" / "испытание не проводится");

обращение к источнику данных (разовое) для получения набора установок параметров (производится при изменении значения параметра состояния с "испытание не проводится" на "испытание проводится") и запись полученного комплекта установок в БД ООА;

выборку значений параметров с требуемой периодичностью;

запись значений параметров в соответствующие таблицы ВтБД;

выборку сообщений из архива источника;

запись сообщений в базу данных сообщений;

запись видеоизображения испытания (с видеосервера) в файл на сервере БД (запись может производиться как по значению параметра состояния "испытание проводится", так и в ручном режиме);

ведение журнала ошибок/сообщений.

Выборка данных об испытании и запись их во ВтБД производится при значении параметра состояния "испытание проводится".

Приложение сбора данных запускается на АРМ оператора в автоматическом режиме.

Приложение постоянно анализирует состояние испытания, и только в процессе выполнения испытания собирает данные. Так же приложение отслеживает потерю связи, как с источником, так и с приемником данных.

Во время работы приложения ведется журнал, в который записываются все ошибки работы приложения, служебные сообщения и сообщения о запуске/останове приложения.

ПО создания и поддержки информационной среды. Для создания, конфигурирования и сопровождения архива данных информационной среды проведения испытаний созданы следующие программные компоненты:

приложение «Описание объекта автоматизации» (ООА),

приложение «Администрирование вторичной базы данных» (ВтБД),

приложение «Кросс система параметров»,

приложение «Конструктор расчетных параметров»,

набор функций «Доступ к данным».

При формировании архивов для вычисления значений параметров в пределах интервала регистрации поддерживаются следующие алгоритмы: сумма, среднее значение, минимальное значение, максимальное значение и последнее значение.

Взаимосвязь данных во ВтБД параметров представлена на рис. 7.9.

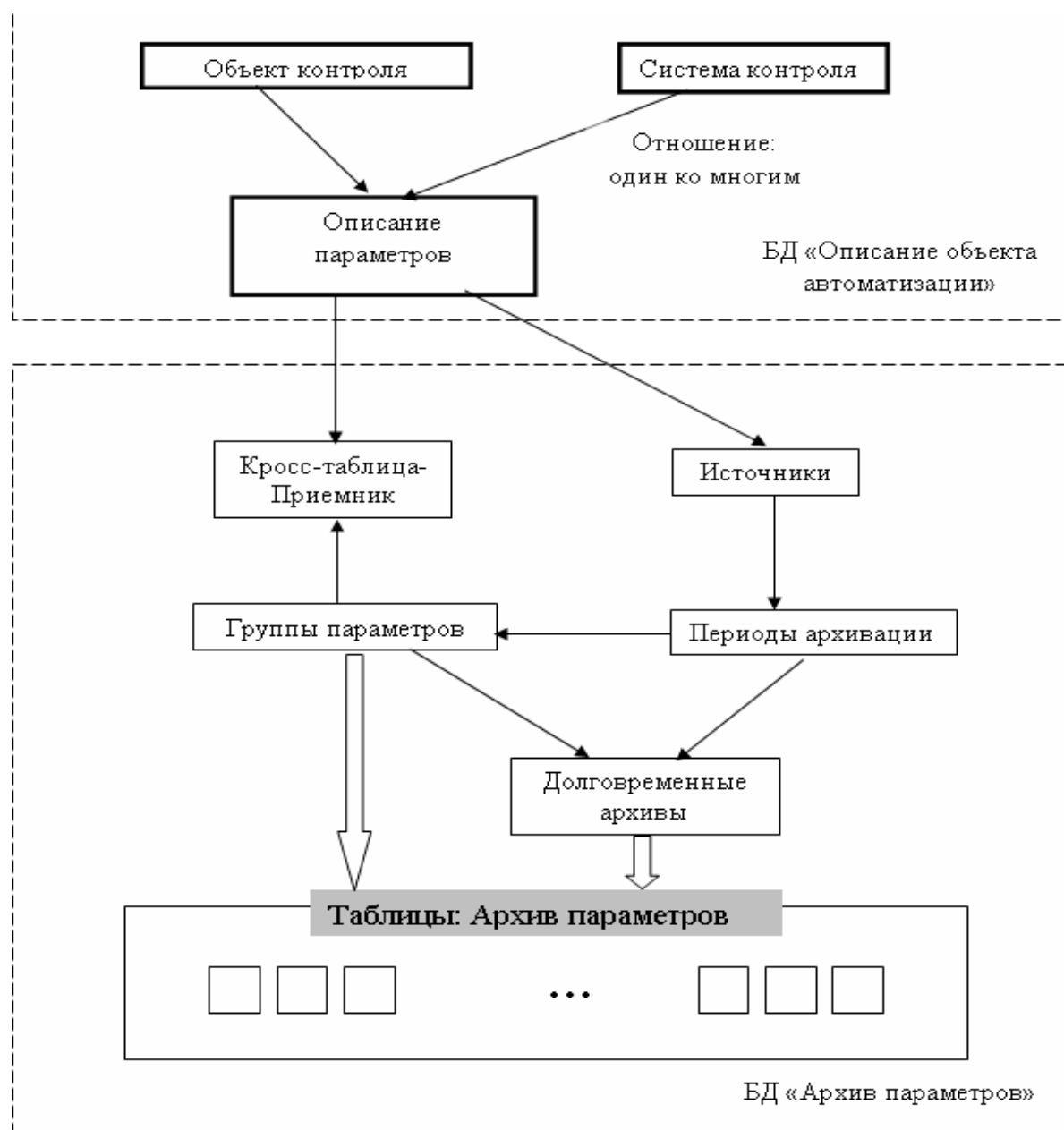


Рис. 7.9. Схема взаимосвязи информации в архивной БД

Вопросы

- 1) Какие существуют виды операций при испытаниях ГТД?
- 2) Какие операции относятся к подготовительно-заключительным?
- 3) Какие недостатки ручного управления ГТД при его испытании?
- 4) Почему необходимо автоматизировать процесс отладки двигателя?
- 5) Назовите основные преимущества автоматизированной обработки результатов обработки эксперимента?
- 6) Какие факторы повышают эффективность автоматизированной обработки результатов испытания?
- 7) Какие задачи возлагаются на АСИ перед испытаниями?
- 8) Какие задачи возлагаются на АСИ в процессе и после испытаний?
- 9) Для чего необходим термодинамический анализ ГТД при обработке результатов испытания

Вопросы

- 1) Что входит в состав структурной схемы АСИ ГТД?
- 2) Что представляет собой интерфейс?
- 3) Для чего необходимо прикладное математическое обеспечение?
- 4) Что определяется интерфейсом?
- 5) Как обеспечивается автоматизированное управление РУД?
- 6) Что представляет собой УСО и из каких элементов оно состоит?
- 7) Какие основные задачи испытаний решают с помощью АСИ?
- 8) Назовите основные требования к АСИ?
- 9) Какие задачи возлагаются на АСИ ГТД?
- 10) Какие особенности при обработке результатов при использовании АСИ?
- 11) Что необходимо для повышения эффективности обработки данных ?
- 12) Что представляет собой математическая модель ГТД ?
- 13) В чем заключается комплексная и частичная автоматизация ?

Вопросы

- 1) Какие датчики используются для измерения тяги?
- 2) Как устроен датчик ТВС?
- 3) Чем измеряется расход топлива?
- 4) Какую погрешность измерения имеет турбинный расходомер?
- 5) Для чего используется датчик углового перемещения?
- 6) Какая точность у датчика перемещения?
- 7) Какие датчики используются для измерения частоты вращения вала?
- 8) Какие датчики используются для измерения температуры и давления?
- 9) Какие датчики используются для измерения зазоров и перемещения?
- 10) Какие методы используются для измерения расхода воздуха?
- 11) На чем основан принцип работы карболисового расходомера?
- 12) На чем основан принцип работы вихревого расходомера?
- 13) На чем основан принцип работы электромагнитного расходомера?
- 14) Какую погрешность измерения имеют современные датчики измерения расхода и тяги?

Вопросы

- 1) Что входит в состав УСО?
- 2) Каково назначение счетного регистра и из каких элементов он состоит?
- 3) Для чего предназначен коммутатор?
- 4) Состав и предназначение АЦП, ЦАП?
- 5) Каков принцип работы АЦП?
- 6) Каков принцип ЦАП?
- 7) Зачем производится дискретизация сигналов в АСИ?
- 8) Какие основные стандарты используются в УСО АСИ?
- 9) Чем отличается приборный интерфейс?
- 10) Какие особенности имеются у УСО в стандарте КАМАК?
- 11) Какие особенности имеются у УСО в стандарте МЭК?
- 12) Устройство модулей УСО и какие их основные данные?

Вопросы

- 1) Структурная схема ЭВМ и принцип ее работы?
- 2) Какое программное обеспечение используется в АСИ ГТД?
- 3) Какие имеются категории операционной системы ?
- 4) Каков состав структурной схемы МО ИВК?
- 5) Какие особенности имеются у ПЭВМ и их основные характеристики?
- 6) Чем отличаются промышленные компьютеры ?
- 7) Что входит в состав математического обеспечения ?
- 8) Для чего служит специальное математическое обеспечение ? Какие особенности имеет рабочая станция в АСИ?
- 9) С какой целью используется промышленные ноутбуки в АСИ и какие основные параметры они имеют?

Вопросы

- 1) Какие особенности имеют многорежимные нелинейные ММ ГТД ?
- 2) Какие особенности имеют одnoreжимные линейные ММ ГТД ?
- 3) В чем заключается проблема появления грубых ошибок измерения ?
- 4) Особенности идентификация ММ 1 и 2-го уровня сложности ?
- 5) Какие особенности имеет метод диагностических матриц ?
- 6) Какие особенности обработки результатов испытаний методом Хубера ?
- 7) С какой целью разрабатываются ММ ГТД ?
- 8) Каковы особенности методов регуляции, уравнивания и МНК ?

Вопросы

- 1) Какие имеются виды испытаний?
- 2) Какова разновидность экспериментов?
- 3) Какие используются экспериментальные модели при отработке ГТД?
- 4) Каковы особенности и возможности АСНИ?
- 5) Какие возможности имеются у системы комплексной автоматизации испытаний?
- 6) С какой целью используются математические модели?
- 7) Каково назначение и устройство АСИ ТРДД АИ-25 с использованием платы ввода-вывода?
- 8) Какие возможности имеет измерительно-вычислительный комплекс с полной автоматизацией процесса испытаний ТРДД АИ-25?
- 9) Какую структуру имеет программное обеспечение измерительно-вычислительного комплекса с полной автоматизацией процесса испытаний ТРДД АИ-25?
- 10) Какие задачи решают автоматизированные системы испытаний?
- 11) Назовите основные операции, используемые при решении задач АСИ?
- 12) Почему использование ИВК улучшает технико-экономические показатели доводки ГТД?
- 13) Всегда ли необходимо стремиться к быstroдействию ИВК?
- 14) Что обеспечивает процесс многократных измерений в АСИ?
- 15) Что входит в состав системы сбора данных?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированные испытания в авиастроении/Адгамов и др. - М.:Машиностроение, 1989.-232 с..
2. Кузьмичёв Д.Д. и др. Автоматизация экспериментальных исследований. - М.:Наука, 1983.-393 с.
3. 3.Автоматизация испытаний и контроля ГТД/ под ред. Г.П. Шибанова - М.:Машиностроение,1977.-280 с.
4. Компанец В.К., Скобелев О.П. Технические средства АСНИ ГТД на базе КАМАК и микро-ЭВМ./ Уч. пособие: - Куйбышев КУАИ, 1983.-90 с.
5. Виттих В.К. и др. Системный анализ при проектировании АСНИ ГТД / Уч. пособие - Куйбышев КУАИ, 1983.- 84 с.
6. Ступин Ю.В. Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ - М.: Энергоатомиздат, 1983.- 288 с.
7. Капчев Р.Э. Измерительно-вычислительные комплексы. - Л.: Энерго - атомиздат, 1988.-176 с.
8. Новиков Ю.В. и др. Разработка устройств сопряжения, М.: ЭКОМ, 2002.- 235 с.
9. Отраслевой стандарт ОСТ 1 01021. Стенды для испытаний авиационных ГТД в наземных условиях. Общие технические требования.
10. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. РМГ62–2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при ограниченной исходной информации. Москва, МПК Издательство стандартов, 2004 г.
11. 11.ГОСТ Р 8.585–2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термодатчики. Номинальные статистические характеристики преобразования. Госстандарт России. Москва.
12. ГОСТ 20440–75. Установки газотурбинные. Методы испытаний. Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР.
13. Датчики давления. Тематический каталог. Выпуск 5.2. Группа предприятий «Метран». Челябинск. 2006 г.
14. Датчики температуры. Тематический каталог. Выпуск 5.2. Группа предприятий «Метран». Челябинск. 2006.
15. Датчики, измерители, регуляторы температуры и оборудование для поверки. Омский завод «Эталон». Омск. 1997 г.
16. Расходомеры. Счетчики. Тематический каталог. Выпуск 5.2. Группа предприятий «Метран». Челябинск. 2006 г.
17. Ж. Аш с соавторами. Датчики измерительных систем. Москва: «Мир», 1992–477с.
18. Ж.Маркос. Дискретизация и квантование. Москва: «Энергия», 1969–143с.
19. Г. П. Шибанов. Автоматизации испытаний и контроля авиационных ГТД. Москва: Машиностроение, 1977–279с.
20. Справочник по прикладной измерительной технике. Москва: Энергия, 1968–622с.
21. РМГ64–2003. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004.
22. РМГ29–99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. Минск, Межгосударственный совет стандартизации, метрологии и сертификации, 1999 г.

Авторы пособия

Григорьев Владимир Алексеевич - проректор по общим вопросам СГАУ, д.т.н., профессор кафедры ТДЛА, тел. 267-43-06

Бочкарев Сергей Константинович - заместитель проректора по науке и инновациям, к.т.н., доцент, тел. 267-43-10

Лапшин Александр Викторович - заведующий лабораторией АСНИ-Д, тел. 267-47-21

Ильинский Станислав Алексеевич - ведущий инженер СНТК имени академика Н.Д.Кузнецова