

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование кафедры)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника

(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Модернизация электрической схемы испытательного стенда

Студентка Е.В. Проскурякова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель А.К. Кудинов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2019

Аннотация

Объем 53 с., 27 рис., 10 табл., 20 источников.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД, СИСТЕМА ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ, БЛОК ИВ-Д-ПФ, МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Объектом исследования является система вибрационного контроля испытательного стенда для газотурбинных двигателей (ГТД).

Цель работы: модернизация электрической схемы испытательного стенда.

Задачи работы заключались в исследовании существующей системы вибрационного контроля испытательного стенда ГТД, разработке общего вида испытательного стенда и структурной схемы измерителя параметров вибрации, проработке каждого элемента этой схемы, разработке схемы электрической соединений, а также схемы структурной блока БЭ-38, разработать схемы электрические принципиальные входного устройства и фильтра 4-го порядка, произвести расчеты по их модернизации, а также расчет затрат.

Работа состоит из трех глав, в которых решены упомянутые задачи. Математические расчеты проводились с использованием пакета MathCad 14.

Степень внедрения: произведены теоретические расчеты, создана экспериментальная аппаратура.

Областью применения данной системы являются испытательные стенды для ГТД.

Применение модернизированной системы вибрационного контроля на испытательном стенде позволит повысить надежность ГТД, своевременно выявляя дефекты и нежелательные процессы в двигателе на ранней стадии, тем самым продляя ресурс работы двигателя, экономя на дорогостоящем ремонте. Так же модернизируя схему, затрачивается меньше средств и времени, чем на покупку нового оборудования и введение его в эксплуатацию.

Содержание

Введение.....	4
1. Состояние вопроса	6
1.1. Общее описание и работа стенда	6
1.1.1. Виды испытаний ГТД.....	6
1.1.2. Испытательный стенд для ГТД	8
1.2. Описание модуля ИВ-Д-ПФ	23
1.3. Задачи работы.....	31
2. Основная часть	33
2.1. Модернизация входного устройства	33
2.1.1. Расчет входного устройства	33
2.1.2. Выбор элементов	35
2.1.3. Реализация проекта на плате входного устройства	35
2.2. Модернизация фильтра	37
2.2.1. Расчетная часть	37
2.1.2. Расчет ФВЧ.....	38
2.1.3. Расчет ФНЧ	39
2.1.4. Выбор элементов	40
2.1.5. Реализация проекта на плате полосового фильтра 4-го порядка.....	42
3. Экономическая часть	45
3.1. Расчет затрат на модернизацию	45
3.1.1. Расчет стоимости проектирования	45
3.1.2. Расчет стоимости электротехнических работ	47
3.1.3. Расчет затрат на покупные изделия	49
3.1.4. Расчет окончательной стоимости модернизации электрической схемы испытательного стенда.....	50
3.1.5. Анализ экономической эффективности модернизации	50
Заключение	51
Список используемой литературы	53

Введение

В наше время малые и мощные установки с приводом от конвертируемого газотурбинного двигателя (ГТД) авиационного типа находят все большее применение для производства электроэнергии, транспортировки природного газа и других энергетических целей, благодаря небольшим габаритам и массе, низкой стоимости и при этом высоким значениям КПД, надёжности, транспортабельности. Наибольшее применение эти двигатели в настоящее время находят в качестве привода газоперекачивающих агрегатов.

Для того, чтобы оценить состояние двигателя, его надёжность, проводятся испытания на испытательных стендах для ГТД. При этом очень важно, чтобы данные испытаний были достоверные, и все характеристики двигателя были точно измерены.

При анализе выявляются характер и специфические особенности вибрационного состояния агрегата: режимы с повышенным уровнем, резкими изменениями и всплесками вибрации; наличие низкочастотной и высокочастотной вибрации, резонансов отдельных элементов установки и др.

Своевременное выявление резонансных колебаний с точной локализацией места возбуждения позволяет предупредить усталостные повреждения деталей и узлов ГТД, предотвратить цепь последующих разрушений и сохранить работоспособность агрегата, тем самым, предотвращая аварийные остановки и дорогостоящие ремонтные работы. Модернизация электрической схемы испытательного стенда позволит в разы сэкономить время и средства на покупку, отладку и пуск в эксплуатацию нового оборудования.

Цель этой работы - модернизация электрической схемы испытательного стенда для ГТД.

Объект исследования – испытательный стенд для ГТД цеха №198, предприятия ПАО «Кузнецов».

Предмет исследования - система вибрационного контроля
испытательного стенда для ГТД.

1 Состояние вопроса

1.1 Общее описание и работа стенда

1.1.1 Виды испытаний ГТД

Каждый конвертируемый ГТД авиационного типа пройдя этапы проектирования, конструирования и изготовления подвергается испытаниям, при которых определяются и контролируются основные характеристики двигателя, определяется ресурс, надежность, а также фактическое состояние при рабочем процессе. Результаты напрямую зависят от режимов испытаний и воздействующих факторов.

Существуют следующие виды испытаний для ГТД:

- научно-исследовательские испытания (эксперимент);
- узловые испытания;
- доводочные и специальные испытания опытного двигателя;
- государственные испытания;
- испытания серийных двигателей 1 .

Научно-исследовательские испытания – проводят для изучения и анализа характеристик.

Узловые испытания проводят для отдельных узлов двигателя, для отработки новых технических решений при создании новых ГТД.

Доводочные и специальные испытания опытных ГТД проводят для определения газодинамических и прочностных характеристик, в процессе доводки двигателей. При этих испытаниях имитируются высотно-скоростные условия двигателей. Основным результатом испытаний является контроль дроссельной стендовой характеристики.

При прочностной доводке проводят следующие испытания:

- определение уровня переменных напряжений в деталях двигателя;
- проверка отсутствия автоколебаний лопаток компрессора (вентилятора);
- термометрирование деталей горячей части двигателя;

- определение осевых сил в подшипниках;
- определение уровня вибраций в заданных точках двигателя;
- тензометрирование трубопроводов;
- ресурсные испытания.

Экспериментальный двигатель проходит порядка пятидесяти специальных испытаний.

Государственные испытания – проводятся государственной комиссией, которая создается из представителей Заказчика и Исполнителя. В задачу государственных испытаний входят:

- установление соответствия параметров двигателя параметрам, заданным в техническом задании (ТЗ);
- проверка двигателя по 150 – часовой программе испытаний;
- оценка уровня внедрения на двигателе унифицированных и стандартизованных изделий конструкций;
- оценка эксплуатационного совершенства двигателя, контролепригодности, ремонтпригодности, обслуживаемости;
- установление эталона двигателя для серийного производства [1].

Испытания серийных ГТД – это проверка качества серийной продукции завода. Эти испытания проводятся по техническим условиям, разработанным опытно-конструкторским бюро (ОКБ) для каждого типа двигателя.

Все серийные ГТД проходит кратковременные испытания и высотно-скоростные.

Кратковременные испытания делят на:

- предъявительские (сдаточные) испытания, принимаемые отделом технического контроля (ОТК) предприятия-изготовителя;
- приемо-сдаточные (контрольные испытания), проводятся в присутствии представителя отдела технического контроля (ОТК) и заказчика;
- квалификационные испытания.

Периодические испытания:

- заводские периодические испытания по проверки ресурса и данных (150...300 ч);
- технологические испытания;
- специальные испытания.

Основной технической документацией на всех видах испытаниях ГТД является программа испытаний, технологическая карта и протокол измерений.

Программа испытаний - документ, в котором указаны условия подготовки и проведения испытаний.. В ней описана цель испытания, объект, параметры, подлежащие измерению, и необходимое препарирование, методика проведения эксперимента, режимы, ограничения, перечень зависимостей, которые необходимо получить, и порядок обработки измеренных величин.

Технологическая карта испытания – это программа для механика, управляющего двигателем. В ней указана последовательность установки режимов, время наработки и время измерений на каждом режиме, детальный перечень измерений и т.п.

Протокол испытаний - заносят следующие данные: дату и время, № двигателя, стенда, программы, наименование испытания, сведения о наработке двигателя, результаты всех измерений, а также осмотров двигателя.

1.1.2 Испытательный стенд для ГТД

Испытательный стенд – это комплекс средств и испытательного оборудования, предназначенный для проведения испытаний авиационных ГТД.

На предприятии ПАО «Кузнецов» испытательный стенд находится в цехе №198 и представляет собой сложное техническое сооружение. Он предназначен для экспериментально-доводочных, контрольных и приемо-сдаточных испытаний газотурбинных двигателей типа НК-16СТ, НК-36СТ, НК-37СТ (усовершенствованный НК-36СТ), работающих на природном газе, и используемых в качестве привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на магистральных газопроводах и в качестве привода электрогенераторов.

ГТД созданы на базе авиационных двигателей НК-8-2У, НК-25, у

которых при конвертировании была сохранено более 65% узлов и деталей, проверенных работой на самолётах и имеющих достаточный запас по ресурсу для дальнейшей эксплуатации на земле [2]. Общий вид ГТД типа НК-16СТ, НК-36СТ, НК-37СТ показан на рисунке 1.1.

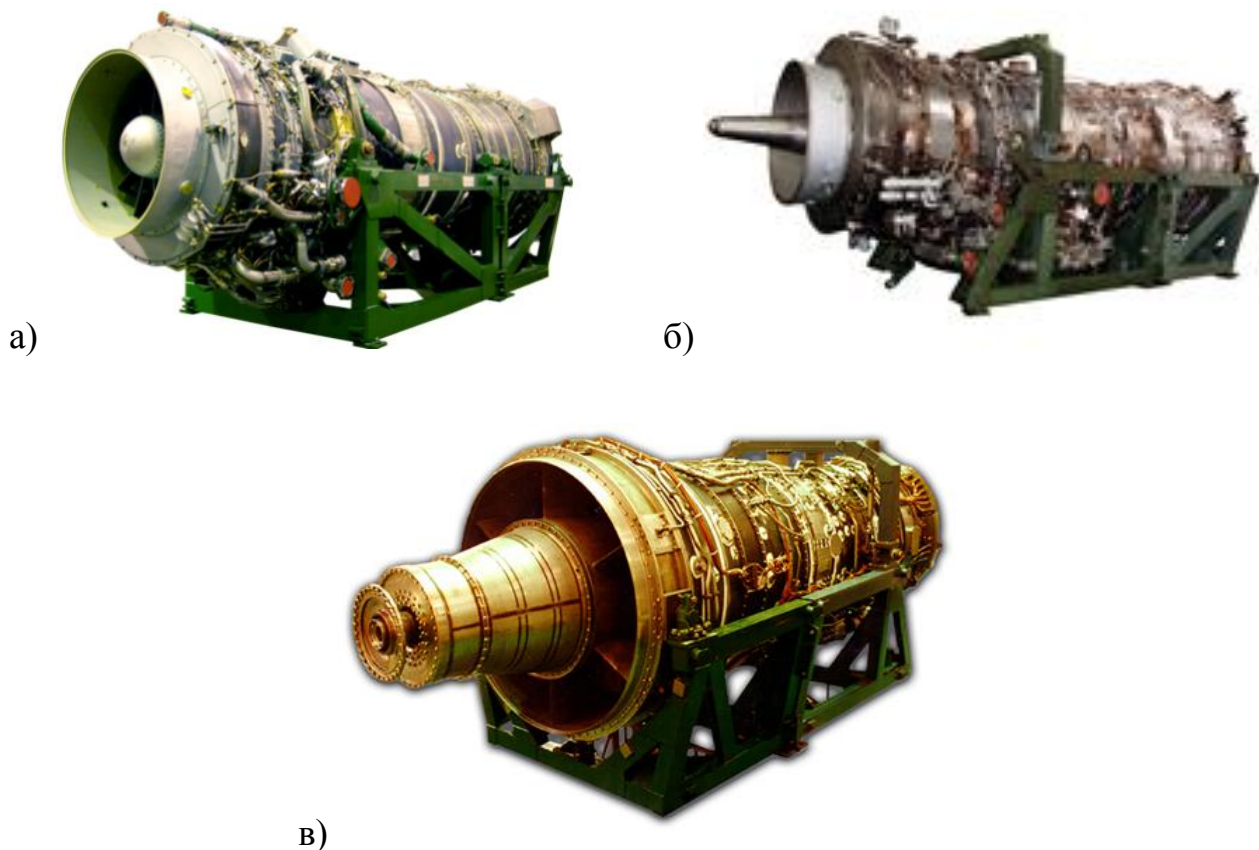


Рисунок 1.1 – Общий вид ГТД:
а) НК-16СТ; б) НК-36СТ; в) НК-37СТ.

ГТД состоит из двух модулей, имеющих каждый свою раму:
- газогенератора (ГГ);
- свободной турбины (СТ).

Принцип работы двигателя рассмотрим на примере НК-16СТ, который изображен на рисунке 1.2 в разрезе. Атмосферный воздух через воздухоочистительное устройство входного направляющего аппарата (ВНА) поступает в компрессор, где он сжимается и направляется в камеру сгорания. В камере сгорания в потоке воздуха сжигается топливо - природный газ. Из камеры сгорания горячие газы направляются на лопатки турбин.

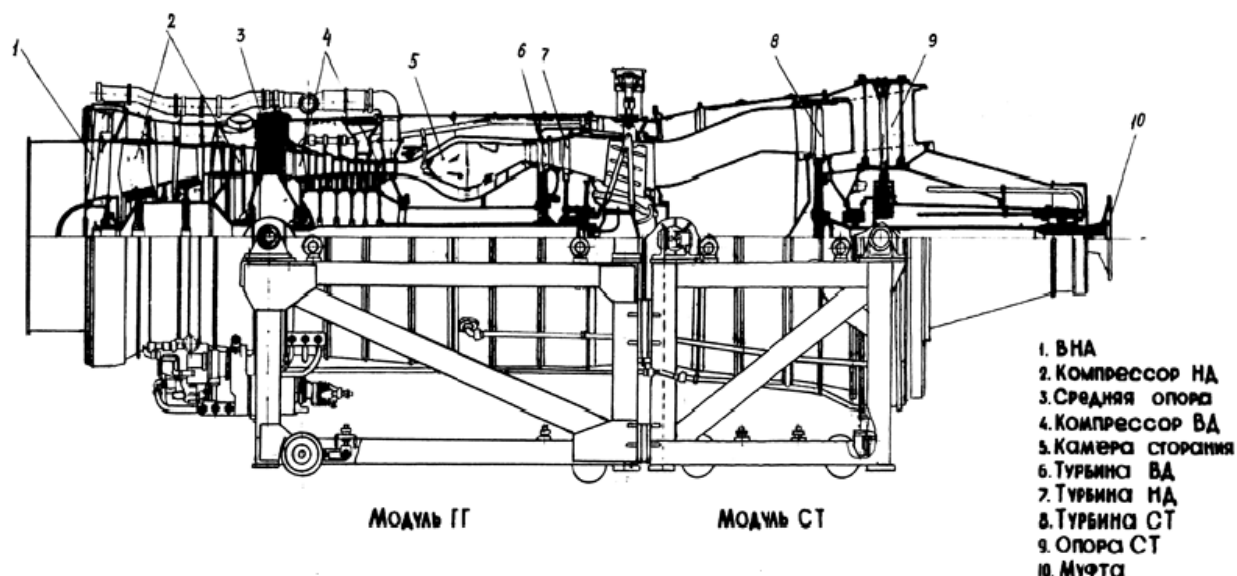


Рисунок 1.2 – Газотурбинный двигатель НК-16СТ в разрезе.

В турбинах тепловая энергия продуктов сгорания превращается в механическую энергию вращения роторов. Мощность, полученная на валах турбин низкого и высокого давления (ТНД и ТВД), расходуется на вращение компрессоров низкого и высокого давления (КНД и КВД) и вспомогательных приводов. Мощность, полученная на валу свободной турбины (СТ), расходуется на привод нагнетателя природного газа и его вспомогательных агрегатов. Отработанные продукты сгорания через выхлопное устройство выбрасываются в атмосферу [3].

Испытательные стенды авиационных ГТД должны обеспечивать проведение испытаний, определяемых ГОСТ 16504 и ОСТ 1 02525, и в соответствии с общими техническими условиями (ОТУ) для серийного и опытного производства ГТД.

В состав испытательного стенда входят:

- 2 испытательных бокса;
- пультовая, из которой осуществляется контроль и управление двигателем;
- технологические и вспомогательные помещения;
- измерительная (помещение для размещения комплекта измерительной аппаратуры и персональных компьютеров);

- основное оборудование испытательного стенда и систем для обеспечения испытаний.

В испытательном боксе расположен испытательный станок (1) с установленной на нем платформой (2), как показано на рисунке 1.3.

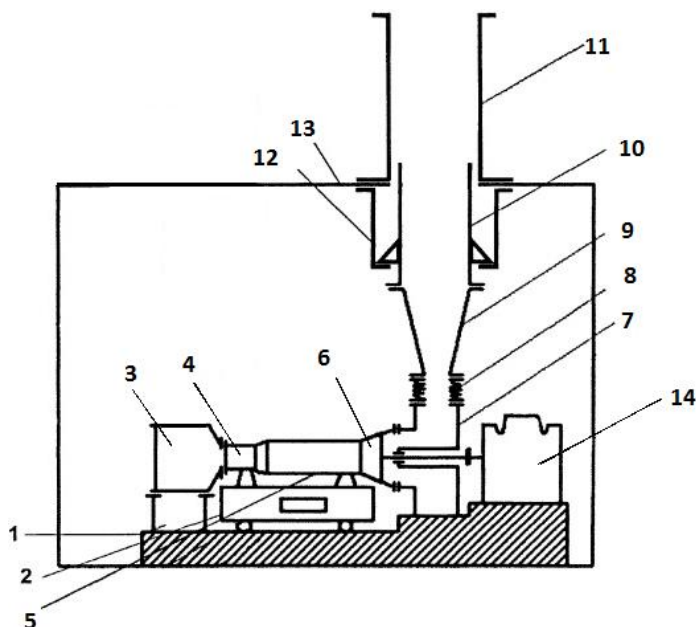


Рисунок 1.3 – Схема испытательного бокса.

На входе расположен воздушный коллектор (4), с защитной сеткой (3), газотурбинный двигатель (5), свободной турбины (6), выхлопное устройство (улитка), выполненное в виде выпускного вертикально расположенного газохода, который включает в себя выпускной коллектор (7), термокомпенсирующий и виброгасящий блок (8), пристыкованный к нему переходный канал (9), присоединенную к переходному каналу (9) нижнюю секцию (10) выхлопной трубы, верхнюю секцию (11) выхлопной трубы, каркасную конструкцию (12). При этом нижняя секция (10) выхлопной трубы расположена внутри каркасной конструкции (12) и опирается на ее нижнюю часть, а сама каркасная конструкция (12) подвешена к выходному устройству крыши (13) – улитки. Для разгрузки свободной турбины используют компрессор воздушный – пневмотормоз (14), соединенный с выхлопной трубой. На рисунке 1.4 показан монтаж двигателя в испытательном боксе.



Рисунок 1.4 - Монтаж двигателя НК-16СТ в испытательном боксе.

Испытательный стенд для ГТД оснащен масляной и газовой системой, а также необходимыми измерительными приборами. Контроль за состоянием двигателя, а также управление испытанием проводятся из пультовой, с как показано на рисунке 1.5.

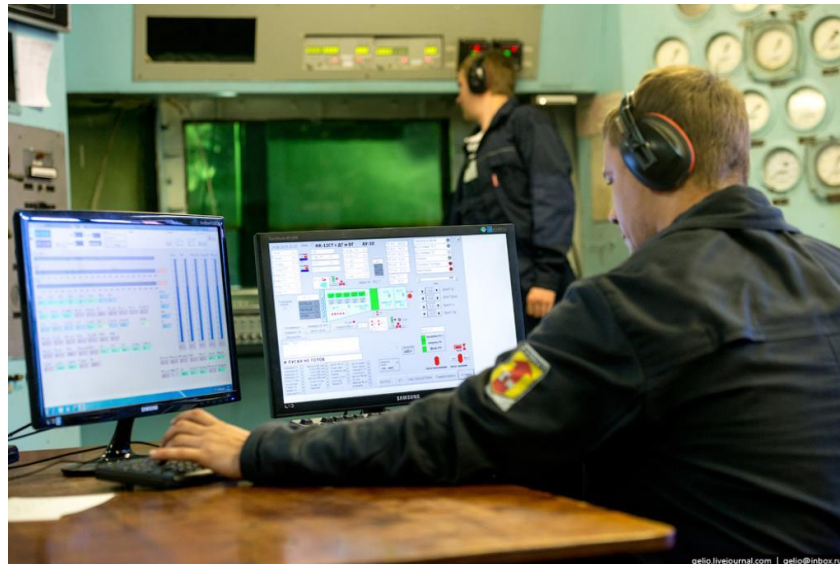


Рисунок 1.5 - Пультовая испытательного стенда.

На испытательном стенде существует три основных, осуществляющих контроль состояния ГТД:

- система автоматического управления испытательного стенда (САУ ИС);
- система вибрационного контроля;

- система параметрического контроля [3].

Основные уровни получения и обработки данных на испытаниях:

1. получение сигнала;
2. первичная обработка;
3. мониторинг состояния двигателя;
4. формирование параметрического и вибрационного паспорта двигателя;
5. прогноз состояния двигателя, остаточного ресурса;
6. интерфейсный уровень.

Все уровни обработки данных связаны между собой, более высокие используют информацию нижних уровней. Например, спектральные характеристики уровней вибрации (второй уровень) для мониторинга состояния двигателя (третий уровень). Все системы испытательного стенда обмениваются между собой данными.

В этой работе рассмотрим подробнее систему вибрационного контроля на испытательном стенде для ГТД.

Система вибрационного контроля – это комплекс аппаратных и программных средств, адаптированных к конкретным условиям стенда и конкретному типу двигателя [3].

Система является штатно-экспериментальной, задействована во всех типах испытаний ГТД.

В состав технических средств для измерений и обработки вибрационных сигналов входят:

- виброизмерительные преобразователи (вибрационные датчики);
- многоканальная усилительно-преобразующая аппаратура;
- универсальные мобильные многоканальные комплексы для регистрации и анализа измерительных данных;
- кабели и соединения для передачи электрических сигналов;
- компьютер для обработки вибрационного сигнала, анализа и визуализации полученных результатов.

Структурная схема измерителя параметров вибрации на стенде показана на рисунке 1.6.

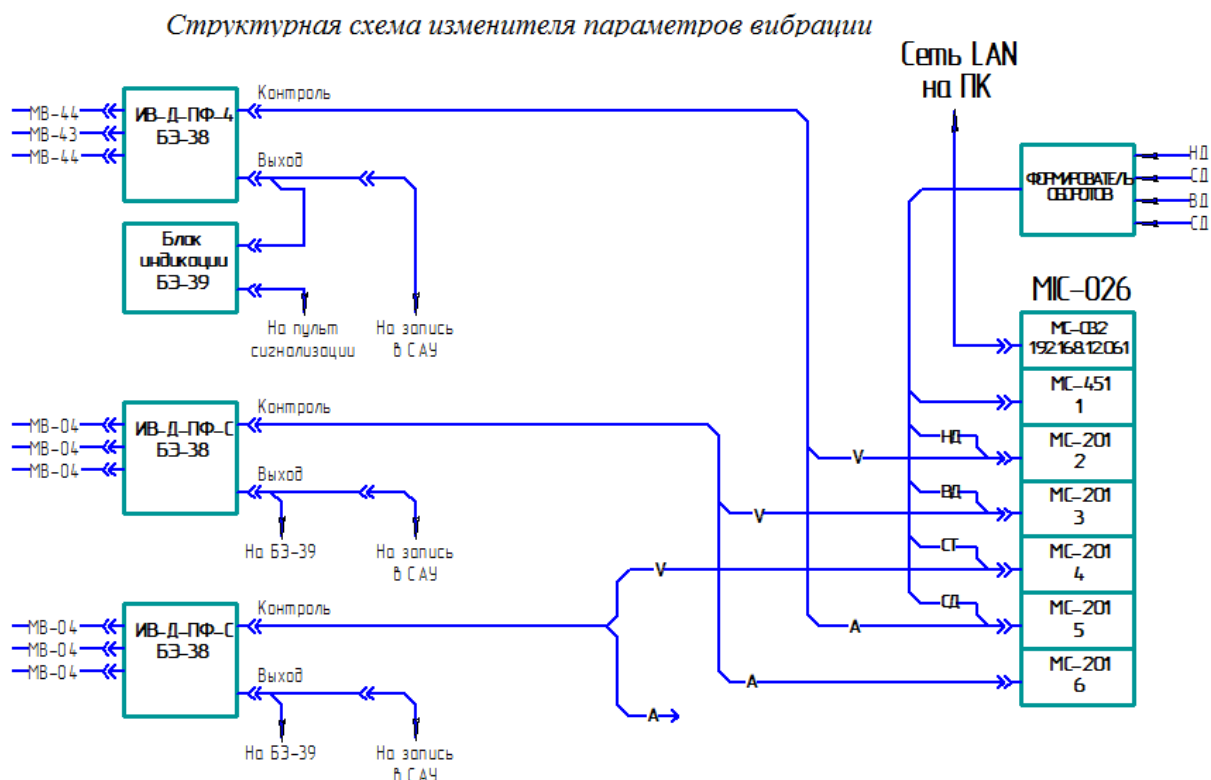


Рисунок 1.6 – Структурная схема измерителя параметров вибрации.

Измерений вибраций корпусов двигателя основано на преобразовании виброускорения корпуса в электрический заряд при помощи датчиков вибрации (вибропреобразователей) типа МВ. Монтаж датчиков на ГТД производится через фланцевые отверстия тремя винтами типа М4. На корпусах модулей газогенератора (ГГ) и свободной турбины (СТ) в штатных точках устанавливаются:

- МВ-43 на передней опоре ГГ;
- МВ-44 на корпусе опоры турбины ГГ;
- МВ-44 на заднем фланце корпуса СТ;
- МВ-04 на корпусе пневмотормоза (ПТ).

Внешний вид вибропреобразователя типа МВ показан на рисунке 1.7

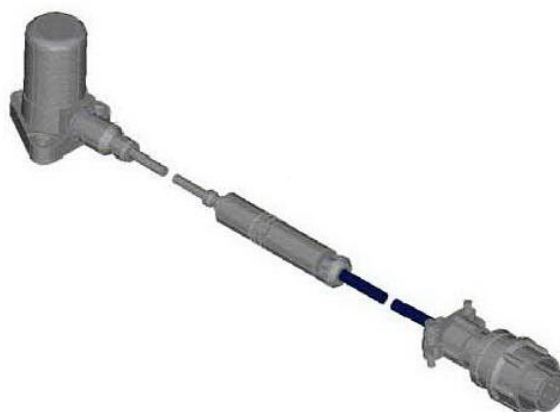


Рисунок 1.7 – Вибропреобразователь типа МВ.

Для виброметрирования в штатных измеряемых точках применяется аппаратура ИВ-Д-ПФ-4М с частотным диапазоном 30-180 Гц. Внешний вид и размеры ИВ-Д-ПФ-4М на рисунке 1.8.

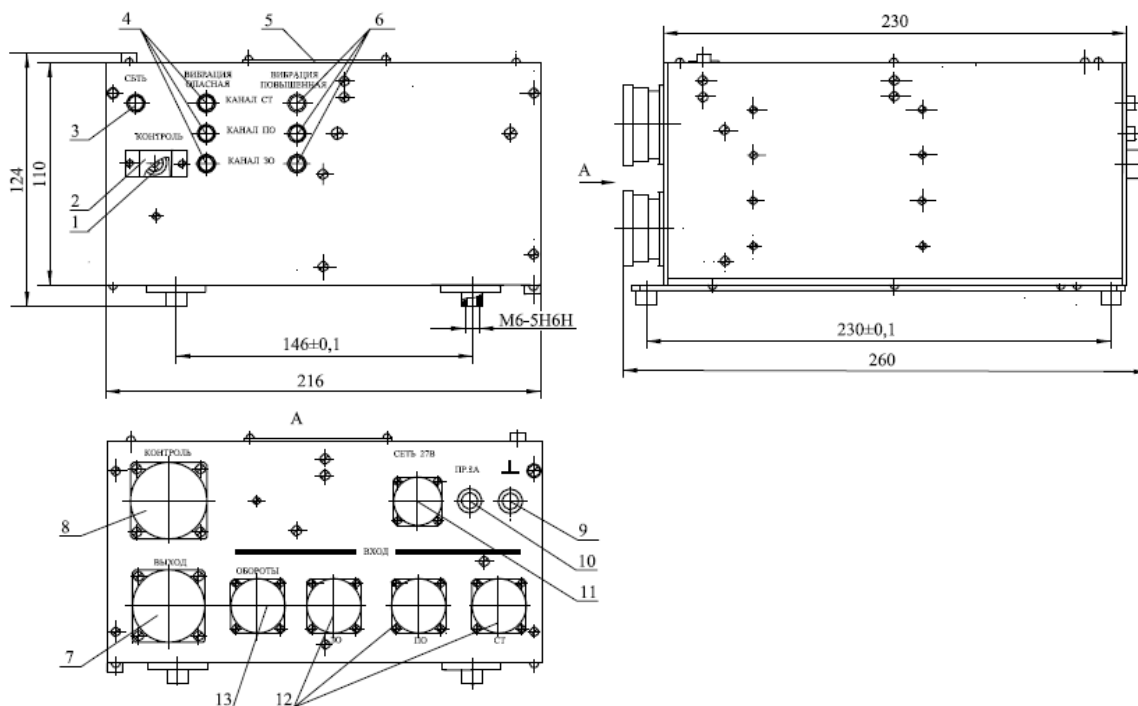


Рисунок 1.8 – Внешний вид

и габаритно-установочные размеры ИВ-Д-ПФ-4М.

На передней панели расположены: 1 – кнопка КОНТРОЛЬ; 2 – крышка кнопки КОНТРОЛЬ; 3 – световой индикатор СЕТЬ; 4 – заводской знак; 5 – световые индикаторы ВИБРАЦИЯ ПОВЫШЕННАЯ КАНАЛ СТ, КАНАЛ ПО, КАНАЛ ЗО поканальной сигнализации повышенной вибрации; 6 – световые индикаторы ВИБРАЦИЯ ОПАСНАЯ КАНАЛ СТ, КАНАЛ ПО, КАНАЛ ЗО

поканальной сигнализации опасной вибрации. На задней панели: 7 – соединитель КОНТРОЛЬ; 8 – соединитель СЕТЬ 27В; 9 – вставка плавкая; 10 – зажим заземления «⊥»; 11 – соединители ВХОД СТ, ПО, ЗО; 12 – соединитель ОБОРОТЫ; 13 – соединитель ВЫХОД.

В дополнительных точках устанавливаются:

- МВ-04 на опоре приводного вала СТ;
- МВ-04 на раме пневмотормоза;
- МВ-04 на такелажной площадке средней опоры, в трех направлениях.

Для виброметрирования в дополнительных измеряемых точках применяется аппаратура ИВ-Д-ПФ-С с частотным диапазоном 30-150 Гц, внешний вид показан на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Внешний вид ИВ-Д-ПФ-С

- 1 - блок электронный БЭ-38; 2 – блок электронный БЭ-39,
3 - вибропреобразователь типа МВ.

Аппаратура ИВ-Д-ПФ-4М и ИВ-Д-ПФ-С располагается в пультовой, на стеллаже.

Сигналы с преобразователей типа МВ поступают в электронный блок БЭ-38 аппаратуры контроля вибрации ИВ-Д-ПФ, где преобразуются в переменное напряжение, усиливается, интегрируется, фильтруются, выпрямляется и

передаются с разъема «ВЫХОД» на вход блока формирования сигналов управления БЭ-39, контроля и сигнализации уровней вибрации и регистрации на ПЭВМ в системе автоматического управления испытательного стенда (САУ ИС). При уровне вибрации 40 мм/с формируется сигнал «Повышенной вибрация», который показывается на световом табло. При уровне вибрации 60 мм/с формируется сигнал аварийного останова и включается табло «Опасная вибрация» [4].

С разъёма "КОНТРОЛЬ" электронного блока БЭ-38 переменное напряжение пропорциональное виброскорости подаётся на вход измерительного комплекса МИС-026, общий вид представлен на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Измерительный комплекс МИС-026.

В корпусе установлен крейт-контроллер, который осуществляет связь с ПК и управляет измерительными модулями, объединительная плата и шасси для модулей МС-451 и МС-201, блок питания и вентиляция. Работает аппаратура МИС-026 под управлением программного обеспечения ПО «Recorder», структура комплекса показана на рисунке 1.11. Сигнал с разъёма "КОНТРОЛЬ" электронного блока БЭ-38 в виде переменное напряжения, пропорционального виброскорости поступает в модуль для измерения динамических сигналов МС-201. Туда же поступают сигналы с преобразователей частоты вращения ротора (обороты) двигателя из САУ ИС, и

на модуль измерения частоты периодического сигнала МС-451. Далее с крейт-контроллера МС-032 по сети LAN сигнал проходит на ПК, для регистрации вибрационных процессов в рабочем диапазоне частот.

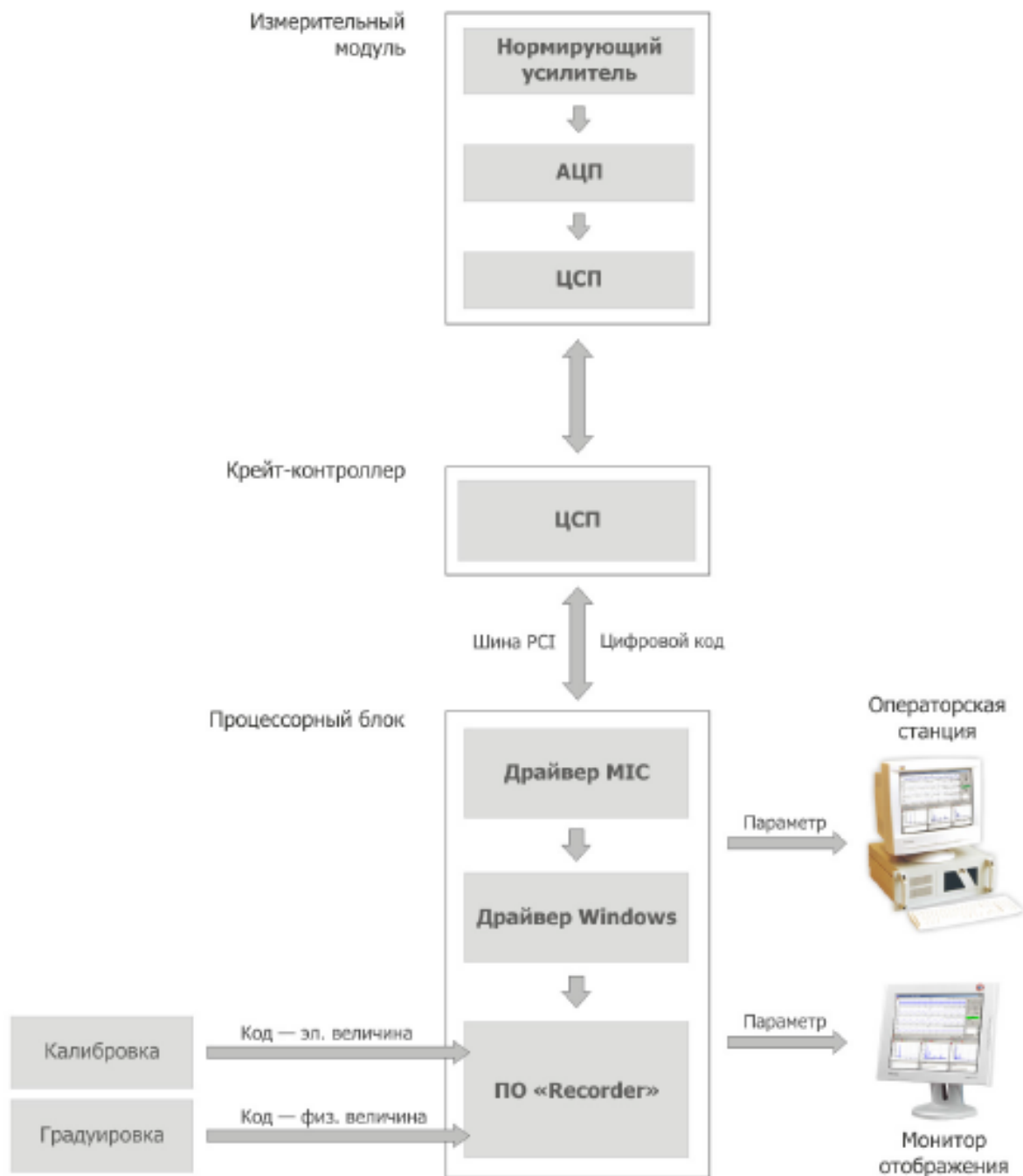


Рисунок 1.11 – Структура МІС-026.

При настройке, калибровке измерительных каналов вибрации, регистрации вибропроцессов применяются следующие средства измерений:

- генератор ГЗ-109,

- электронный вольтметр В7-34А,
- персональный компьютер ПК.

Коэффициент преобразования датчика Кд, $\text{пКлс}^2/\text{м}$, необходимый для настройки системы контроля и регистрации, берётся из паспорта на датчик.

Выполнение измерений вибрации двигателя включает следующие операции:

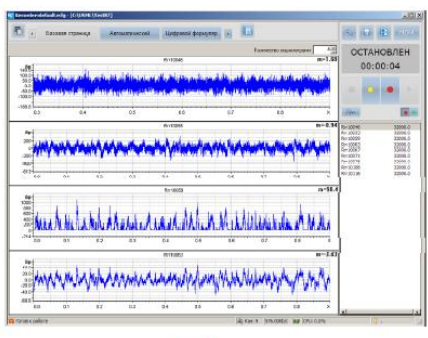
- контроль работоспособности и калибровка системы измерения встроенным контролем;
- регистрация на ПК уровней виброскорости с выхода блока БЭ-38 на установившихся режимах работы изделия;
- запись вибросигналов на ПК в рабочем диапазоне частот для спектральной обработки; оформление протокола измерений, содержащего перечень записанной информации.

При подготовке и проведении измерений, а также при обработке информации и представлении ее результатов в виде, необходимом пользователю, используется программное обеспечение (ПО) предприятия-изготовителя: – для подготовки и проведения измерений — программа управления и регистрации Recorder; – для обработки и анализа зарегистрированной информации — программа WinПОС.

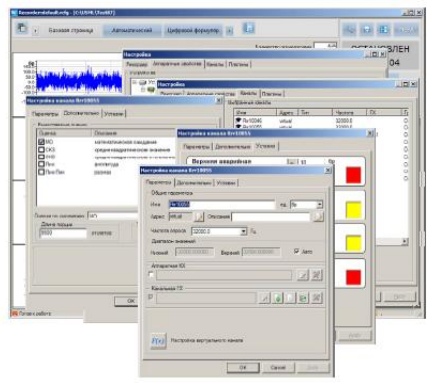
В программе Recorder осуществляется настройка каналов, ввод, регистрацию и запись оцифрованных сигналов на ПК, отображение их в виде гистограмм, графиков, осциллограмм, а также цифровом отображении.

Схематично процесс подготовки и проведения измерений, а также обработки полученной информации изображен на рисунке 1.12.

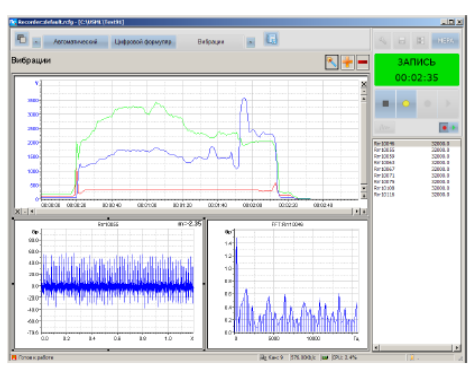
Запуск Recorder



Настройка конфигурации



Регистрация данных и экспресс-анализ



Передача замера в WinPOS для подробного анализа

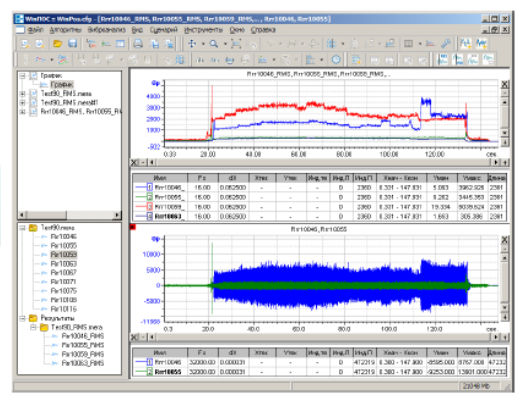


Рисунок 1.12 – Процесс получения результатов измерения.

Обработка результатов измерений проводится на ПК в программе WinПОС методом спектрального анализа по алгоритму быстрого преобразования Фурье. Рассчитывается масштабный коэффициент записи.

$$K_c = U_{\text{кал.}} / K_{\text{ив.}}, \quad (1.1)$$

где, $U_{\text{кал}}$ – калибровочный сигнал (мВ);

$K_{\text{ив}}$ – коэффициент чувствительности аппаратуры ИВ-Д-ПФ (мВ/мм/с).

С учетом масштабного коэффициента рассчитываются значения амплитуд спектральных составляющих в единицах виброскорости (мм/с) на каждом замере.

Рассчитывается частота вращения каждого ротора с учетом коэффициента редукции.

Производится сравнение частот в спектре вибрации f_i , Гц с частотами вращения роторов f_{rj} , Гц на каждом зарегистрированном замере, определяя, таким образом, какому ротору принадлежит спектральная составляющая.

Полученные массивы данных по каждому каналу выводятся в виде графиков и таблиц зависимости амплитуд роторных гармоник от оборотов, как показано на рисунках 1.13 -1.15.

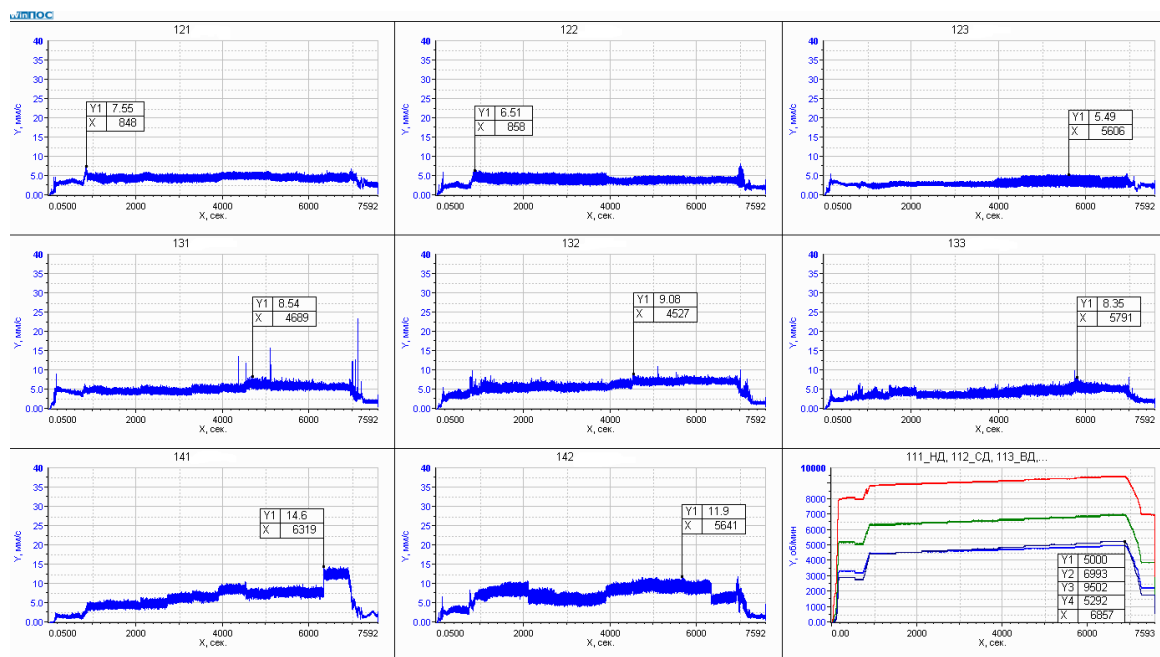


Рисунок 1.13 – Тренды каналов измерений в среднеквадратичных значениях (СКЗ) и оборотов всех роторов ГТД

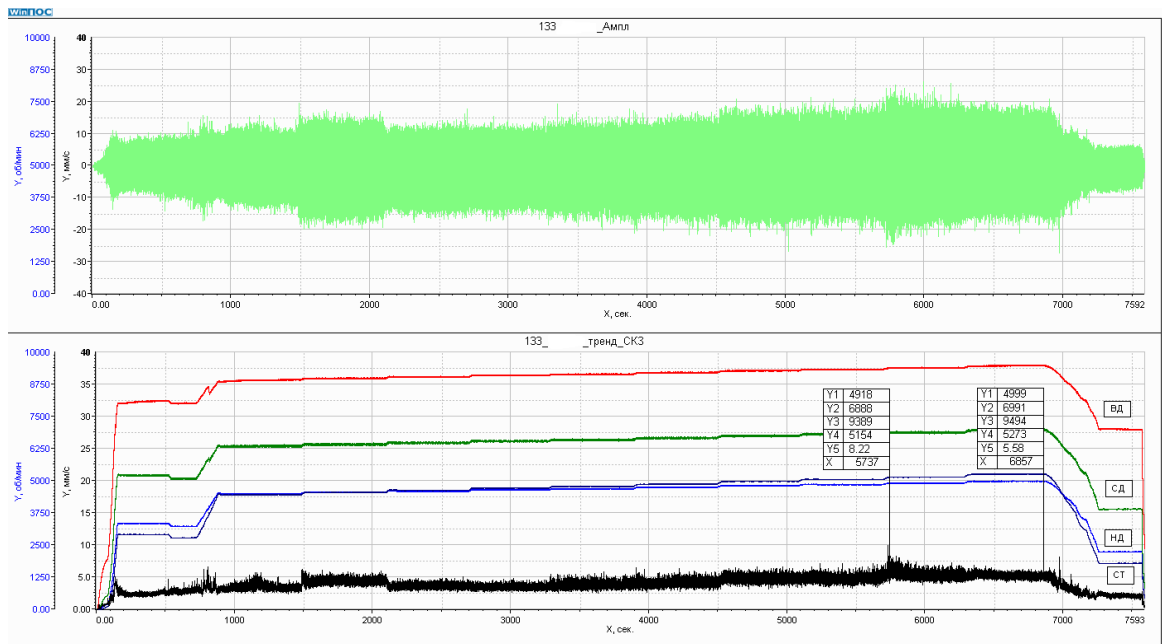


Рисунок 1.14 – Амплитудная характеристика:

в верхней части - график «живого процесса» параметра вибрации; в нижней части – тренд этого параметра в СКЗ с графиками оборотов всех роторов двигателя.

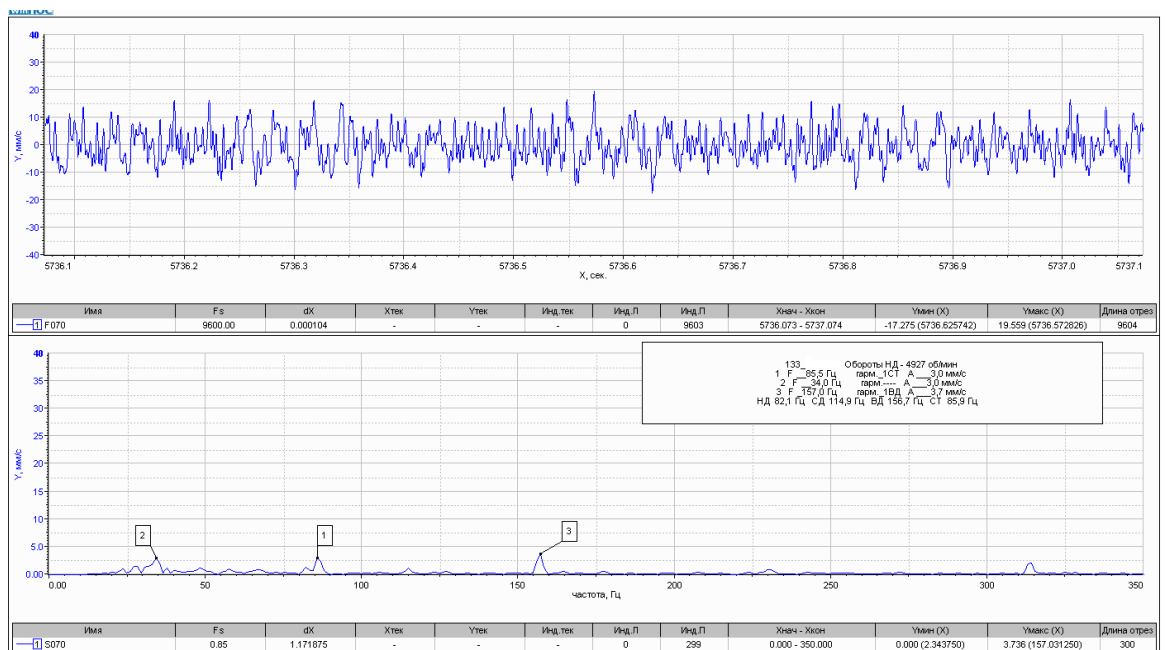


Рисунок 1.15 – Спектральный анализ вибраций.

По результатам обработки измерительной информации создается техническая справка (отчет), далее отчет передается в отдел конструкторского бюро (ОКБ) завода, отдел прочности для дальнейшего исследования.

1.2 Описание модуля ИВ-Д-ПФ

Аппаратура типа ИВ-Д-ПФ предназначена для измерения параметров вибрации газотурбинных двигателей НК-16СТ, НК-36СТ, НК-37СТ путем выдачи сигналов, пропорциональных амплитудному значению виброскорости, в виде напряжения постоянного тока (250 – 5000) мВ и сигналов частоты вращения ротора двигателя для регистрации в автоматической системе контроля двигателя (АСК) [4], а также в системе вибрационного контроля.

Аппаратура состоит из пьезоэлектрических вибропреобразователей (акселерометров) типа МВ и электронного блока БЭ-38.

Условия эксплуатации элементов аппаратуры представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Условия эксплуатации элементов ИВ-Д-ПФ:

Вибропреобразователь МВ-43	Вибропреобразователь МВ-44	Электронный блок БЭ-38
Частный диапазон вибрации от 10 до 5000 Гц при ускорении до $1962 \text{ м/с}^2 (200 \text{ g})$	Частный диапазон вибрации от 10 до 5000 Гц при ускорении до $1962 \text{ м/с}^2 (200 \text{ g})$	Частный диапазон вибрации от 10 Гц до 500 Гц с амплитудой ускорения 1 g
Ударные воздействия с ускорением до $147 \text{ м/с}^2 (15 \text{ g})$, длительностью ударного импульса от 2 до 50 мс	Ударные воздействия с ускорением до $147 \text{ м/с}^2 (15 \text{ g})$, длительностью ударного импульса от 2 до 50 мс	Ударные воздействия при транспортировании с ускорением 10 g и длительностью ударного импульса 15 мс
Рабочая температура окружающей среды: от минус 60 до 250°	Рабочая температура окружающей среды: от минус 60 до 400°	Рабочая температура окружающей среды: от минус 40 до 60°
Относительная влажность – до 98 % при температуре 35 °С	Относительная влажность – до 98 % при температуре 35 °С	относительная влажность – до 98 % при температуре 25 °С
Воздействие пыли и песка, специальных сред	То же	-

Аппаратура на испытательном стенде имеет разные модификации, отличающиеся диапазонами измеряемых частот и коэффициентом преобразования. Основные технические характеристики аппаратуры ИВ-Д-ПФ-4М и ИВ-Д-ПФ-С представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные технические характеристики аппаратуры ИВ-Д-ПФ-4М и ИВ-Д-ПФ-С.

Наименование параметра	ИВ-Д-ПФ-4М	ИВ-Д-ПФ-С
Количество каналов измерения амплитудного значения виброскорости	3	3
Диапазон измерения амплитудного значения виброскорости, мм/с	5-100	5-100
Номинальное значение коэффициента преобразования вибропреобразователя Кд, пКл с ² /м: для МВ-43, МВ-04 для МВ-44	2 2	5 - 8 -
Диапазон частот измеряемых параметров вибрации, Гц	30 – 180	30 – 150
Относительное затухание частотной характеристики вне диапазона частот измерения, дБ/октаву, не менее	20	20
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения, %	±10	±10
Диапазон выходного постоянного напряжения, пропорционального измеряемой виброскорости, на нагрузку не менее 10 кОм, мВ	250-5000	250-5000
Пределы допускаемой основной относительной погрешности преобразования виброскорости в выходное постоянное напряжение, пропорциональное виброскорости, %	≥ 0,99 пределов допускаемой основной относительной погрешности	≥0,99 пределов допускаемой основной относительной погрешности
Номинальное значение виброскорости при срабатывании световых сигнализаций, мм/с: ВИБРАЦИЯ ПОВЫШЕННАЯ ВИБРАЦИЯ ОПАСНАЯ	40 60	40 60
Пределы допускаемой основной относительной погрешности срабатывания световых сигнализаций, %	±10	±10
Значение выходного напряжения постоянного тока при включении встроенного контроля, мВ	4250 ± 250	4250 ± 250
Количество каналов формирования сигналов от датчиков оборотов	3	3
Коэффициент деления частоты	1	1

Продолжение таблицы 1.2

Наименование параметра	ИВ-Д-ПФ-4М	ИВ-Д-ПФ-С
Уровень входных сигналов от датчиков оборотов (ампл.), В	0,5 – 10,0	0,5 – 10,0
Напряжение питания постоянного тока, В	18,0 – 36,0	18,0 – 36,0
Потребляемая мощность, Вт, не более	15	25
Время готовности, мин, не более	1	1
Масса, кг, не более: – МВ-43, МВ-44 (без жгута) – БЭ-38 – БЭ-39	0,15 3,2 -	0,15 9,0 9,0
Габаритные размеры (L x H x D), мм: блок БЭ-38 блок БЭ-39	260 x 216 x 124 -	390 x 520x 174 390 x 520 x174

Чувствительный элемент вибропреобразователя типа МВ состоит из блока пьезоэлементов (7), изолированного электрически от основания (1) изоляционными шайбами (2), и прижатого к нему гайкой (5) груза (6). Регулировка коэффициента преобразования осуществляется путем изменения массы груза (6). Крышка (4) соединяется с основанием (1) сваркой. К основанию (1) приварена вилка (9), которая представляет собой герметичное соединение [4]. Конструкция вибропреобразователя типа МВ представлена на рисунке 1.16.

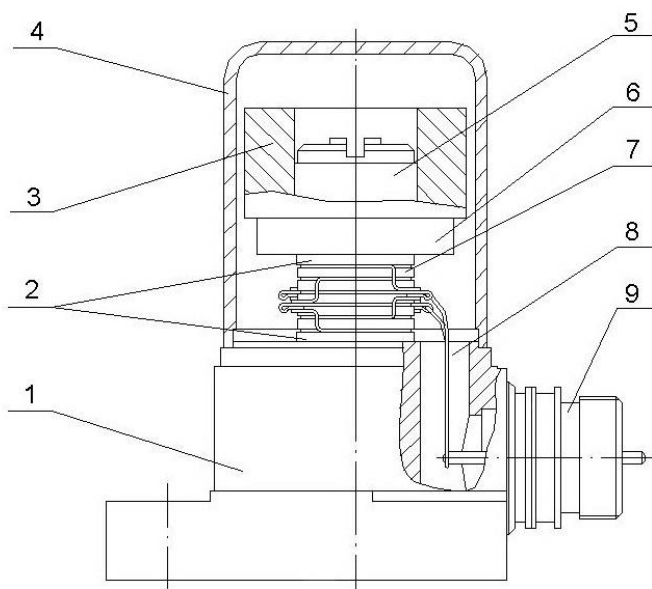


Рисунок 1.16 - Конструкция вибропреобразователя типа МВ.

Жгут неразъемно соединен с датчиком и состоит из высокотемпературного кабеля с минеральной изоляцией и антивибрационного двухпроводного экранированного кабеля и заканчивается розеткой соединителя. Присоединение жгута к штырям вилки (9) осуществляется при помощи пайки высокотемпературным припоем.

Для снижения влияния разности потенциалов корпуса объекта и ВИП экран кабеля электрически изолирован от корпуса вибропреобразователя и соединителя и подведен к гнезду 4 соединителя. Принципиальная электрическая схема МВ приведена на рисунке 1.17.

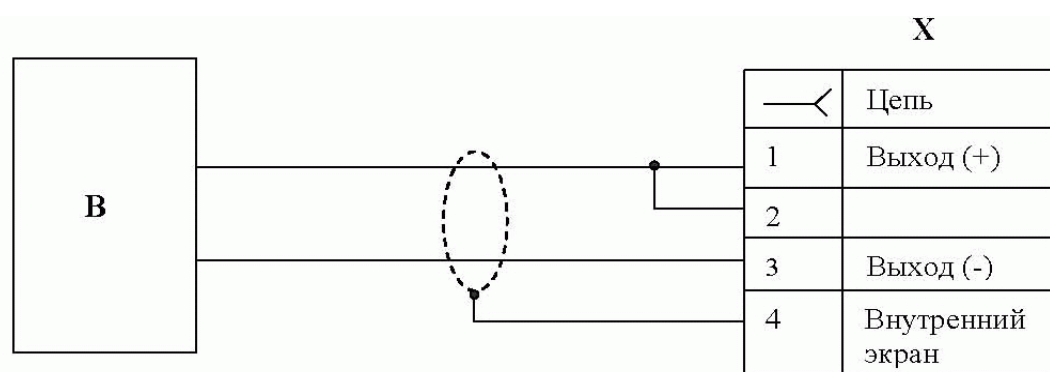


Рисунок 1.17 - Принципиальная электрическая схема вибропреобразователя типа МВ.

При вибрации объекта контроля, на котором смонтирован акселерометр, сила инерции груза вибропреобразователя действует на блок пьезоэлементов, в результате чего генерируется электрический заряд, пропорциональный амплитуде виброускорения объекта контроля.

Сигналы от вибропреобразователей через соединители, расположенные на объекте контроля, и далее с помощью жгута "ИВ-Д-ПФ-4М" через соединители СТ, ПО, ЗО поступают на вход блока БЭ-38. Схема электрическая соединений показана на рисунке 1.18.

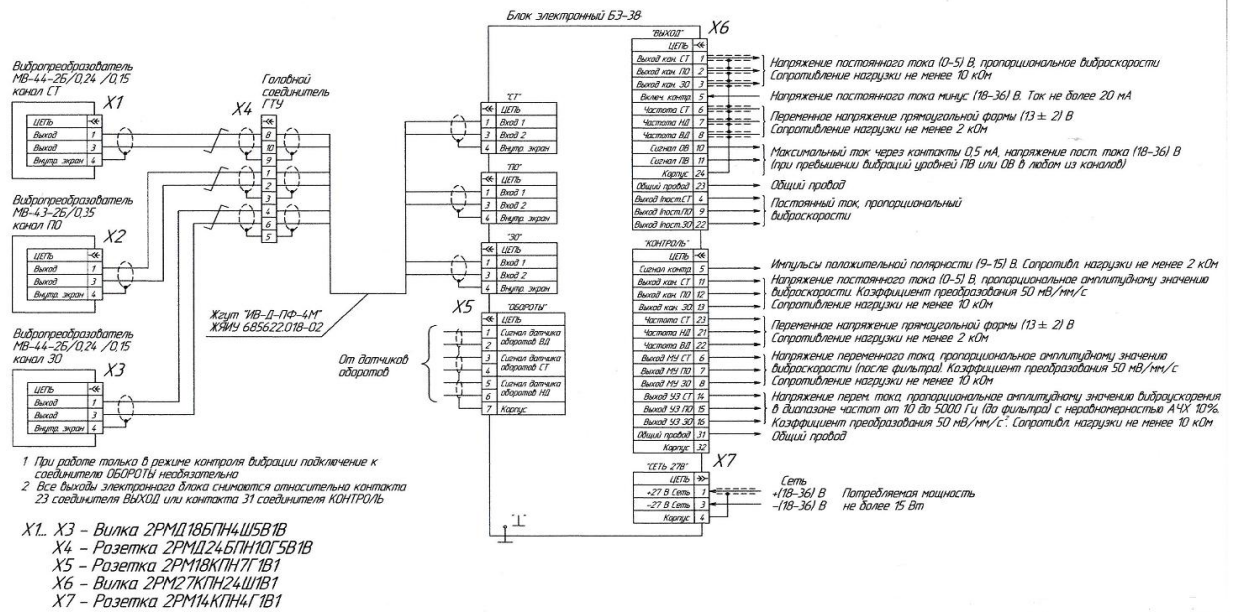


Рисунок 1.18 Схема электрическая соединений ИВ-Д-ПФ-4М.

Аппаратура типа ИВ-Д-ПФ имеет блочную конструкцию. В соответствии с рисунком 1.19, функциональные узлы БЭ-38, выполнены на отдельных печатных платах (рисунок 1.20), которые крепятся к корпусу блока и подключаются в общую электрическую схему с помощью соединителей.

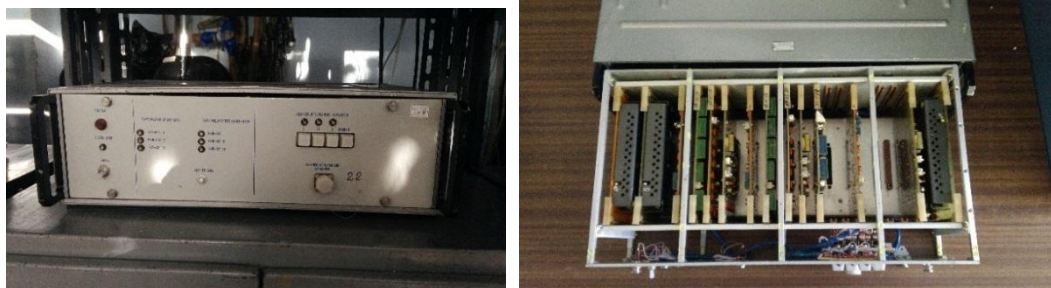


Рисунок 1.19 – Блок электронный БЭ-38.

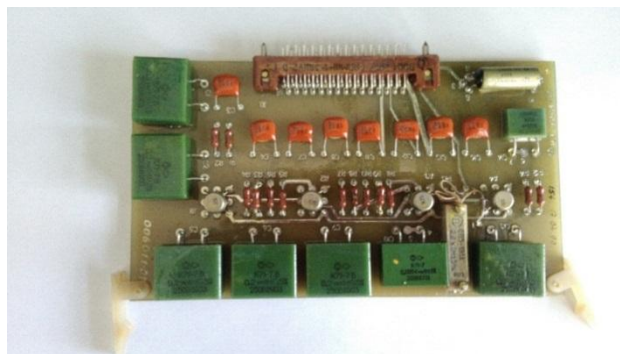


Рисунок 1.20 – Печатная плата БЭ-38.

Электрические разряды переменной частоты, пропорциональные виброускорению, от каждого вибропреобразователя типа МВ поступают во входное устройство соответствующего канала БЭ-38-2, работа которых идентична. Структурная схема БЭ-38-2 представлена на рисунке 1.21.

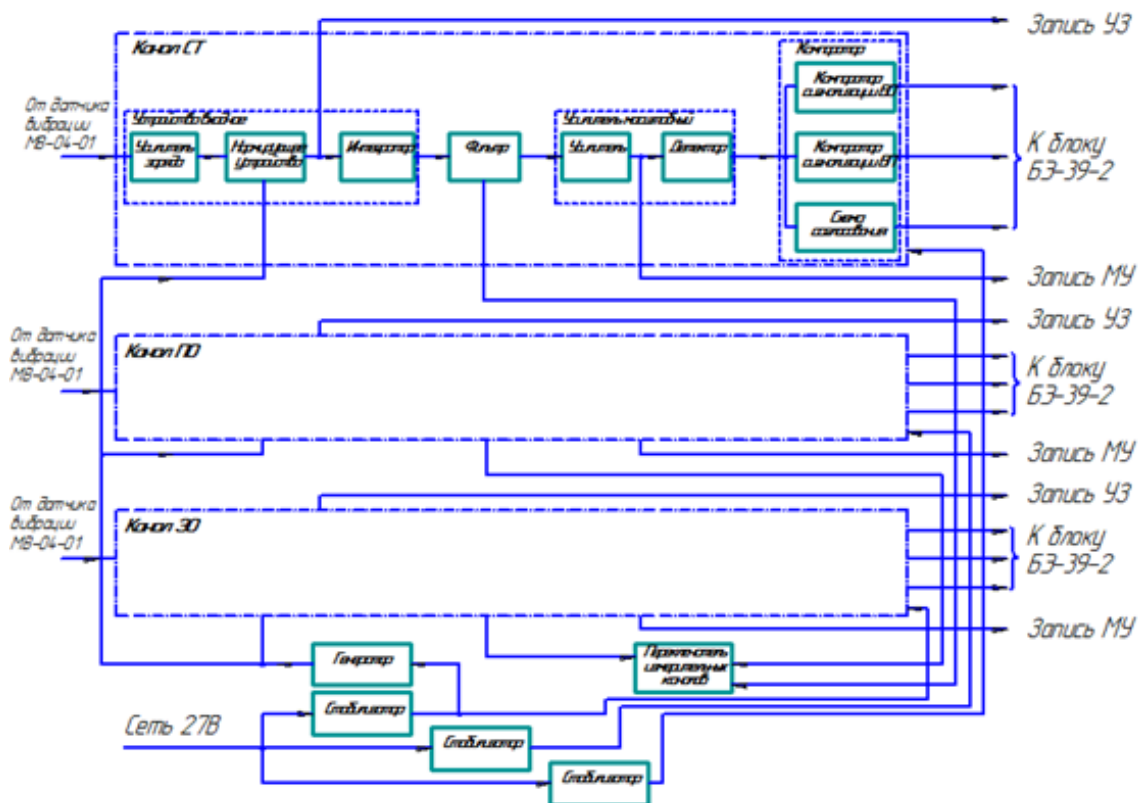


Рисунок 1.21 – Структурная схема БЭ-38-2.

Входное устройство состоит из преобразователя заряда, нормирующего устройства и интегратора. Преобразователь заряда выполнен на двух операционных усилителях по схеме усилителя, охваченного глубокой отрицательной обратной связью. Выходное напряжение преобразователя заряда, пропорциональное виброускорению датчика, нормируется до значения 50 мВ/г нормирующим устройством.

Нормирующее устройство выполнено на одном операционном усилителе по схеме инвертирующего усилителя. Выходное напряжение нормирующего устройства с движка переменного резистора R15 поступает на вход интегратора и выходную розетку «КОНТРОЛЬ», расположенную на задней панели блока БЭ-38.

Интегратор выполнен из двух операционных усилителях по схеме активных фильтров второго порядка. Выходное напряжение интегратора, пропорциональное виброскорости, поступает на вход фильтра.

Фильтр каждого канала состоит из последовательно соединенных фильтра высших частот и фильтра низших частот. Каждый из фильтров является фильтром 4 порядка.

Фильтры обеспечивают заданную неравномерность в полосе пропускания канала и заданное затухание вне полосы пропускания. Активная часть каждого фильтра выполнена на двух операционных усилителях, а пассивная на высокочастотных высокостабильных резисторах и конденсаторах.

Выходное напряжение фильтра поступает на масштабный усилитель. Он выполнен на операционном усилителе по схеме неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления «10». Выходное напряжение переменного тока с масштабного усилителя поступает на вход детектора средних значений и на выходную розетку «КОНТРОЛЬ», расположенную на задней панели блока БЭ-38.

Детектор преобразует напряжение переменного тока в напряжение постоянного тока, пропорциональное средневыпрямленному значению переменного напряжения.

Детектор состоит из однополупериодного выпрямителя с единичным усилением и интегрирующего сумматора, выполненного на двух операционных усилителях.

Напряжение постоянного тока, с выхода детектора поступает на компаратор и выходные розетки «КОНТРОЛЬ» и «ВЫХОД». В компараторе расположены схемы сигнализаций повышенной вибрации и опасной вибрации. Схемы сигнализаций двух уровней идентичны и каждая состоит из компаратора и электронного реле. Компаратор реализован на операционном усилителе.

Выходное напряжение поступает на соединенные вместе неинвертирующие входы операционных усилителей обоих компараторов.

На неинвертирующие входы операционных усилителей подаются опорные напряжения постоянного тока для сигнализации «ВИБРАЦИЯ ПОВЫШЕННАЯ» и «ВИБРАЦИЯ ОПАСНАЯ». При значении выходного напряжения меньше значения опорного напряжения компаратора, последний закрыт, и отрицательное напряжение на его выходе надежно закрывает транзистор, подключенной к нему схемы электронного реле.

При значении выходного напряжения больше значения опорного напряжения на выходе компаратора появляется положительное напряжение, которое открывает транзистор схемы электронного реле, подключенного к его входу.

Электронное реле срабатывает и через нормально разомкнутые контакты реле постоянного тока плюс 27 В поступает на соответствующий световой индикатор.

Блок БЭ-38 имеет встроенный контроль, состоящий из задающего генератора и схемы включения встроенного контроля. Задающий генератор собран на трех операционных усилителях, из которых два включены по схеме интегратора, а третий по схеме усилителя-ограничителя, стоит в цепи обратной связи и вместе с диодным мостом служит для стабилизации амплитуды выходного сигнала. Частота выходного напряжения задающего генератора находится в пределах полосы пропускания фильтра канала. Выходное напряжение снимается с движка переменного резистора R7, расположенного в генераторе. При нажатии кнопки «КОНТРОЛЬ» выходное напряжение генератора через переменный резистор R7 поступает на входы интеграторов всех трех каналов. При этом выходное напряжение находится в пределах от 3750 до 4750 мВ постоянного тока, и световые индикаторы «ВИБРАЦИЯ ПОВЫШЕННАЯ» и «ВИБРАЦИЯ ОПАСНАЯ» всех трех каналов включаются.

В блоке также установлены 3 стабилизатора напряжения, по одному в каждом измерительном канале. Предназначены для питания цепей одного канала и преобразует питание сети 27 В постоянного тока в стабилизированные

напряжения 15 В и минус 15 В и напряжение постоянного тока 24 В. Выходное напряжение постоянного тока поступает на вход блока БЭ-39.

1.3 Задачи работы

В настоящее время АО «Виброприбор» выпускает новые вибропреобразователи типа МВ, которые имеют нормализованную чувствительность, т.е. возможна замена элементов аппаратуры без настроек (регулировок). Номинальное значение коэффициента преобразования K_d нового вибропреобразователя типа МВ составляет:

$$K_d = 2 \text{ пКлс}^2/\text{м}.$$

В составе средств вибрационного контроля ГТД на испытательном стенде № 198 состоит аппаратура ИВ-Д-ПФ-4 и ИВ-Д-ПФ-С. Аппаратура ИВ-Д-ПФ-4 нового образца и соответствует характеристикам последних вибропреобразователей, а ИВ-Д-ПФ-С устарела, т.к. изготовлена под вибропреобразователи типа МВ с коэффициентом K_d :

$$K_d = 5 - 8 \text{ пКлс}^2/\text{м}.$$

Этот вопрос можно решить двумя способами:

1. покупка нового оборудования;
2. модернизировать электрическую схему стенда.

Покупка нового оборудования, отладка, пуск в эксплуатацию – это долгий и дорогостоящий процесс. На приобретение оборудования уйдет много времени на заключение договоров, поставку, а нам необходимо быстро и эффективно решить вопрос, не нарушая сроков проведения испытаний.

Мы можем модернизировать электрическую схему стенда, а именно изменить под новые вибропреобразователи коэффициент усиления во входном устройстве, а также расширить частотный диапазон фильтров.

Модернизация позволит эффективнее работать системе вибрационного контроля, своевременно выявляя нежелательные процессы в двигателе на

ранней стадии, тем самым продляя ресурс работы двигателя, экономя на дорогостоящем ремонте. Так же модернизируя схему, затрачивается меньше средств и времени, чем на покупку нового оборудования и введение его в эксплуатацию.

2 Основная часть

2.1 Модернизация входного устройства

2.1.1 Расчет входного устройства

Как уже отмечалось ранее, аппаратура ИВ-Д-ПФ-4 и ИВ-Д-ПФ-С имеют одинаковую блочную конструкцию, а узлы БЭ-38 конструктивно выполнены на отдельных печатных платах.

Для модернизации электрической принципиальной схемы мы берем за образец печатные платы ИВ-Д-ПФ-4, которые соответствуют новым вибропреобразователям, и изменим коэффициент усиления K входного устройства в аппаратуре ИВ-Д-ПФ-С.

Входное устройство блока БЭ-38 состоит из преобразователя заряда, нормирующего устройства и интегратора. Принципиальная электрическая схема входного устройства приведена на рисунке 2.1.

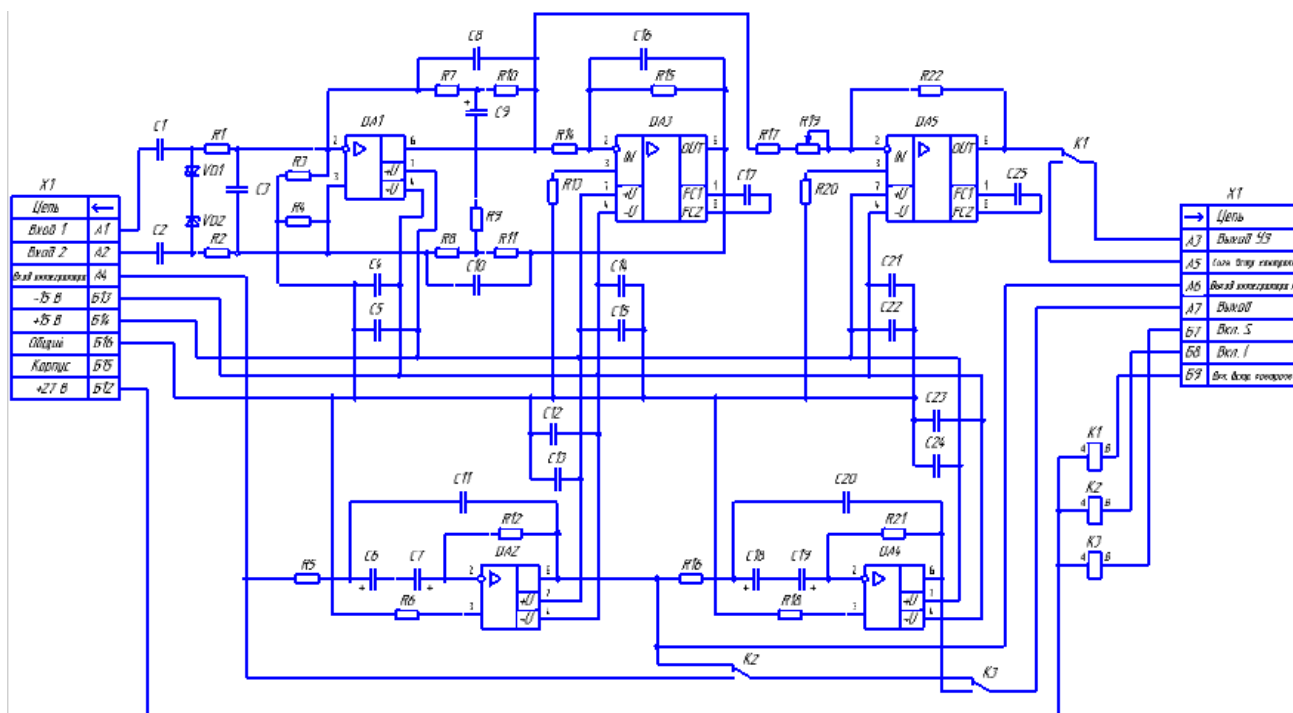


Рисунок 2.1 Входное устройство. Схема электрическая принципиальная.

Преобразователь заряда выполнен на двух операционных усилителях по схеме усилителя, охваченного глубокой отрицательной связью, далее идет

нормирующее устройство, которое выполнено на одном операционном усилителе по схеме инвертирующего усилителя и интегратор, выполненный из двух операционных усилителей по схеме активных фильтров второго порядка. Модернизировать будем нормирующее устройство, где номинал резисторов R_{17} , R_{22} отличаются от номиналов резисторов в ИВ-В-ПФ-4. Номиналы данных резисторов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Номиналы резисторов

№ R на схеме	ИВ-Д-ПФ-4	ИВ-Д-ПФ-С
R_{17}	1,0 кОм \pm 0,5 %	5,11 кОм \pm 0,5 %
R_{22}	51 кОм \pm 0,5 %	7,5 кОм \pm 0,5 %

Нормирующее устройство выполнено на операционном усилителе К153УД6, основные характеристики которого представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Основные характеристики операционного усилителя К153УД

Тип ОУ	K_{U0}	$R_{вх0}$, Мом	$\pm U_{max}$ вых, В	$U_{с.м.}$, мВ	$I_{вх.ср}$ нА	$\Delta I_{вх.}$ нА	$K_{ос.сф.}$, дБ	$U_{max сф.}$, В	$I_{вых. доп.}$, мА
153УД6	50000	0,3	10	2	75	10	80	12	5

Коэффициент усиления K_U инвертирующего усилителя рассчитаем по формуле:

$$K_U = \frac{R_{22}}{R_{17} + R_{19(0...10)}}, \quad (2.1)$$

Где, R_{19} - построечный – 10 кОм \pm 10 %;

R_{17} , R_{22} – берем из таблицы 2.1 для соответствующей модели.

Определим K_{Umax} и K_{Umin} для ИВ-Д-ПФ-С:

$$K_{Umax} = \frac{R_{22}}{R_{17} + R_{19}} = \frac{7,5}{5,11 + 0} = 1,5$$

$$K_{Umin} = \frac{R_{22}}{R_{17} + R_{19}} = \frac{7,5}{5,1 + 10} = 0,5$$

Найдем K_{Umax} и K_{Umin} для ИВ-Д-ПФ-4:

$$K_{Umax} = \frac{R_{22}}{R_{17}+R_{19}} = \frac{53}{1+0} = 53$$

$$K_{Umin} = \frac{R_{22}}{R_{17}+R_{19}} = \frac{53}{1+10} = 4,8$$

Проанализировав данные расчета, принимаем решение о увеличении коэффициента усиления, а, следовательно, о замене резисторов R_{17} , R_{22} .

2.1.2 Выбор элементов

Поскольку мы не создавали новую, а модернизировали готовую электрическую принципиальную схему то нам необходимо выбрать только заменяемые резисторы из ряда E192, так как нам необходимы элементы с 0,5% допуском. Для модернизации будем использовать резисторы постоянные непроволочные общего применения неизолированные С2-23-0.25 ОЖО 467.081 ТУ.

Выбираем:

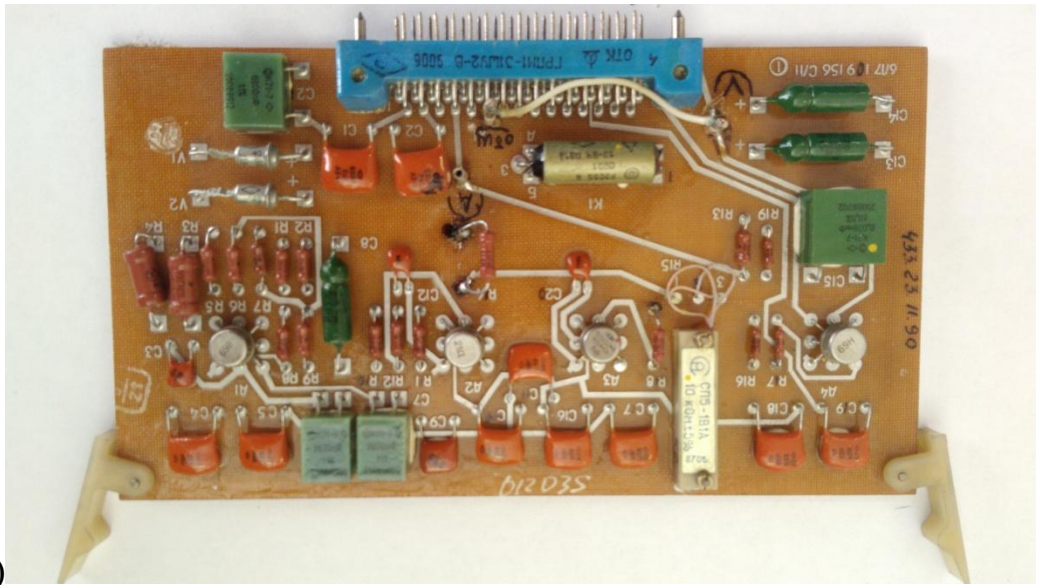
R_{17} - С2-23-0,25-1,0 кОм $\pm 0,5$ %

R_{22} - С2-23-0,25-53 кОм $\pm 0,5$ %

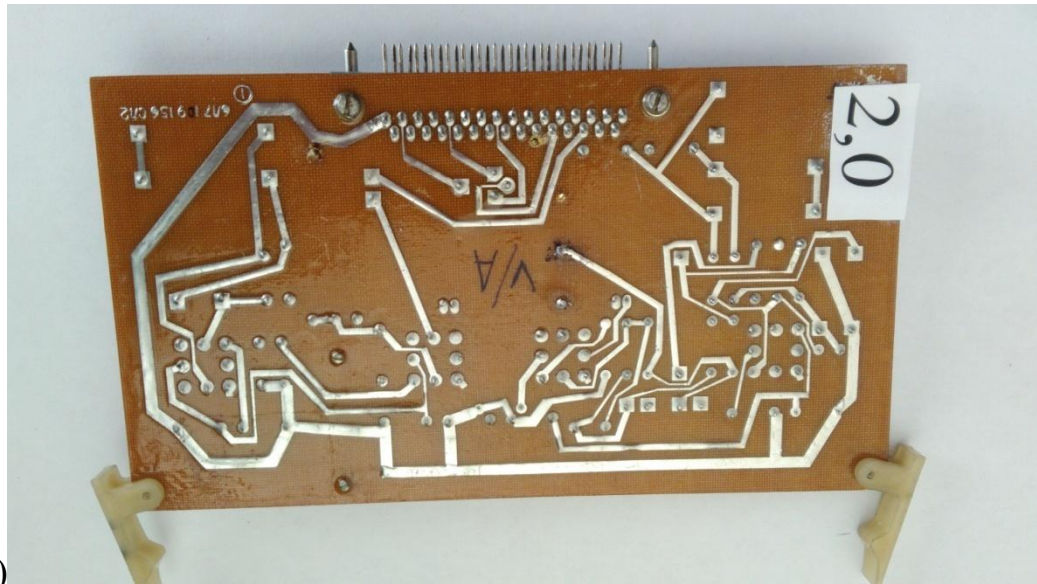
Перечень элементов на электрическую схему представлен в приложении.

2.1.3 Реализация проекта на плате входного устройства

На предприятии ПАО «Кузнецов», в соответствии с выбранными элементами, была проведена модернизация электрической схемы входного устройства путем замены резисторов в нормирующем устройстве, тем самым изменен коэффициент усиления аппаратуры ИВ-Д-ПФ-С. Теперь стала возможна работа аппаратуры с современными вибропреобразователями, коэффициент преобразования которых $K_d = 2,0$. Вид платы входного устройства после модернизации электрической схемы представлен на рисунке 2.2.



а)



б)

Рисунок 2.2 Плата входного устройства аппаратуры ИВ-Д-ПФ-С после модернизации.

2.2 Модернизация фильтра

2.2.1 Расчетная часть

Фильтр – это электронное устройство, который пропускает сигналы только определенных частот.

Существуют фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовые фильтры, режекторные фильтры [6].

В электрических схемах аппаратуры ИВ-Д-ПФ-С и ИВ-Д-ПФ-4 используется активный полосовой фильтр 4-го порядка, его идеальная и реальная АЧХ [6] показана на рисунке 2.3

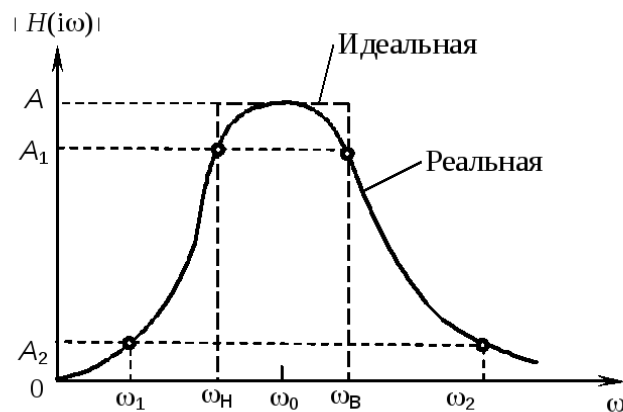


Рисунок 2.3- Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра.

Исходные данные:

Порядок фильтра – 4;

Граничные частоты– 10 Гц, 500 Гц;

Коэффициент передачи (К) – 1.

В данной аппаратуре используется активный полосовой фильтр 4-го порядка, который реализован схемой на источнике напряжения, управляемом напряжением (ИНУН), при соединении каскадно двух ФВЧ и двух ФНЧ вторых порядков. Электрическая принципиальная схема представлена на рисунке 2.4.

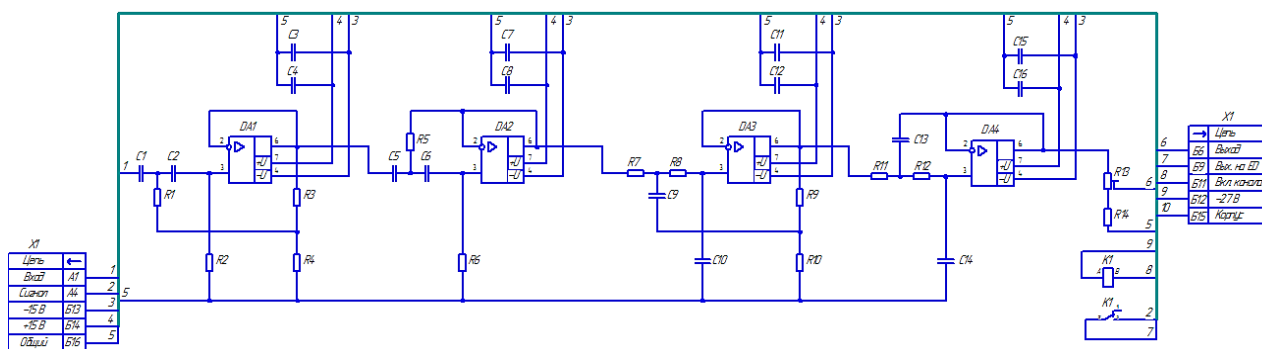


Рисунок 2.4 Полосовой фильтр 4-го порядка.

2.2.2 Расчет ФВЧ

ФВЧ 4-го порядка получен из двух, каскадно включенных ФВЧ 2-го порядка.

Для расчета находим нормализованные значения коэффициентов нижних частот В и С из приложения А справочника [6] для фильтра 4-го порядка:

$$B_1 = 0,76 \text{ и } B_2 = 1,82;$$

$C = 1$, для обеих звеньев

Частота $f_c = 10$ Гц (из задания);

Коэффициент передачи $K = 1$ (из задания)

Значение емкости C_1, C_2 оставим те, что стоят в электрической схеме:

$$C_1 = C_2 = 0,2 \text{ мкФ.}$$

Значение резистора R_2 найдем по формуле, подставляя значение В для первого звена:

$$R_2 = \frac{4C}{\sqrt{B} + \frac{B^2 + 8C \cdot K - 1}{\sqrt{2} \omega_c \cdot C_1}}, \quad (2.2)$$

Где, ω_c – угловая частота (рад/с), $\omega_c = 2 \pi f_c$.

$$R_2 = \frac{4C}{\sqrt{B} + \frac{B^2 + 8C \cdot K - 1}{\sqrt{2} \omega_c \cdot C_1}} = \frac{4 \cdot 1}{0,76 + \frac{0,76^2 + 8 \cdot 1 \cdot 1 - 1}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 10^{-7}}} = 79,6 \text{ кОм}$$

R_1 находим по формуле:

$$R_1 = \frac{C}{\omega_c \cdot C_1^2 \cdot R_2}, \quad (2.3)$$

$$R_1 = \frac{C}{\omega_c \cdot C_1^2 \cdot R_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot 79,6} = 49,3 \text{ кОм}$$

Резисторы $R_3 = 110 \text{ Ом}$ и $R_4 = 22,6 \text{ кОм}$ оставим в схеме без изменений.

Значения C_5, C_6 выбираем следующие:

$$C_5=C_6=C_1=C_2=0,2 \text{ мкФ.}$$

Значение R_6 определяем по формуле 2.2, подставляя значения B для второго звена:

$$R_6 = \frac{4C}{\sqrt{B + \frac{B^2 + 8C \cdot K - 1}{2\omega_c \cdot C_1}}} = \frac{4 \cdot 1}{1,85 + \frac{1,85^2 + 8 \cdot 1}{1 - 1} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 10^{-7}} = 402 \text{ кОм}$$

Значение R_5 определяем по формуле 2.3:

$$R_5 = \frac{C}{\omega_c \cdot 2 \cdot C_1^2 \cdot R_6} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 402} = 21 \text{ кОм}$$

2.2.3 Расчет ФНЧ

ФНЧ 4-го порядка получен путем каскадного включения двух ФНЧ 2-го порядка. Коэффициенты B и C звена 4-го порядка фильтра Баттерворта берутся из приложения А справочника [6] и составляют:

$B = 0,76$ и $1,85$ – для первого и второго звена;

$C = 1,0$

Коэффициент передачи $K=1$ (из задания)

Граничная частота $f_c=500 \text{ Гц}$.

Расчет 1-го звена ФНЧ:

Выберем емкость конденсатора $C_9= 8300 \text{ пФ}$.

Значение C_{10} определяется из условия:

$$C_{10} \leq \frac{B^2 + 4 \cdot C \cdot K - 1}{4C} \cdot C_9, \quad (2.4)$$

$$C_{10} \leq \frac{0,76^2 + 4 \cdot 1 \cdot 1 - 1}{4 \cdot 1} \cdot 8,3 \cdot 10^{-9} \leq 3380 \text{ пФ}$$

Выбираем $C_2 = 3380 \text{ пФ}$.

Сопротивление резистора R_7 находим по формуле:

$$R_7 = \frac{2}{\sqrt{B C_1 + \frac{B^2 + 4C \cdot K - 1}{2\omega_c \cdot C_9} - 4C C_9 C_{10}}}, \quad (2.5)$$

Где ω_c - угловая частота, (рад/с), $\omega_c = 2 \pi f_c$

$$R_7 = \frac{2}{0,76 + \frac{0,76^2 + 4 \cdot 1 \cdot 1 - 1}{8,3 \cdot 10^{-9}} - 4 \cdot 1 \cdot 8,3 \cdot 10^{-9} \cdot (3,38 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 500)} = 79,6 \text{ кОм}$$

Значение R_8 находим по формуле:

$$R_8 = \frac{1}{CC_9 C_{10} R_7 \omega_c^2}, \quad (2.6)$$

$$R_8 = \frac{1}{CC_9 C_{10} R_7 \omega_c^2} = \frac{1}{1 \cdot 8,3 \cdot 10^{-9} \cdot 3,38 \cdot 10^{-9} \cdot 79,6 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 500^2} = 19,6 \text{ кОм}$$

Расчет второго звена

Емкости конденсатора C_{13} возьмем 0,027 мкФ.

Емкость C_{14} определяется из условия, по формуле 2.4, подставляя значения B для второго звена:

$$C_{14} \leq \frac{B^2 + 4 \cdot C \cdot K - 1 \cdot C_{13}}{4C} \leq \frac{1,85^2 + 4 \cdot 1 \cdot 1 - 1 \cdot 2,7 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 1}$$

Получаем $C_{14} \leq 1195$ пФ. Выбираем $C_{14} = 1195$ пФ.

Резистор R_{11} определим по формуле 2.5, подставляя значения B для второго звена фильтра:

$$R_{11} = \frac{2}{BC_{13} + \frac{B^2 + 4C \cdot K - 1}{C_{13}^2 - 4CC_{13}C_{14}} \cdot \omega_c} =$$

$$= \frac{2}{1,85 + \frac{1,85^2 + 4 \cdot 1 \cdot 1 - 1}{2,7 \cdot 10^{-8}} - 4 \cdot 1 \cdot 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1,195 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 500)} = 53,6 \text{ кОм}$$

Значение R_{12} находим по формуле 2.6, подставляя значения B для второго звена фильтра:

$$R_{12} = \frac{1}{CC_{13} C_{14} R_7 \omega_c^2} = \frac{1}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1,195 \cdot 10^{-9} \cdot 79,6 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 500^2} = 52,3 \text{ Ком}$$

Блокировочные конденсаторы по питанию в схеме $C_3, C_4, C_7, C_8, C_{11}, C_{12}$ оставим прежние - 0,68 мкФ.

2.2.4 Выбор элементов

В схеме фильтра в качестве активной части применены операционные усилители (ОУ) марки К44УД1Б.

ОУ К544УД1Б имеет следующие характеристиками:

Упит ± 15 В;

I - 8 мА;

$K_{U0} = 20000$;

U смещ - 50 мВ;

$I_{вх} - 1 \text{ нА}$;

$R_{0вх} - 10 \text{ МОм}$;

граничная полоса частот 10 МГц.

Выбор резисторов и конденсаторов:

В электрической схеме используются высокоточные и высокостабильные резисторы и конденсаторы, поэтому для модернизации будем выбирать элементы с 0,5% допуском из ряда E192.

Выбираем резисторы С2-23-0,25 ОЖО 467.081 ТУ, для которых диапазон значений сопротивлений плюс минус 0,5 %, с рассеиваемой мощностью 0.25 Вт.

В соответствии с рядом E192 и рассчитанными значениями сопротивлений получаем:

$$R_1 = 49,3 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-49,3 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_2 = 79,6 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-79,6 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_3 = 110 \text{ Ом } \text{С2-23-0,25-110 Ом} \pm 0,5\%$$

$$R_4 = 22,6 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-22,6 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_5 = 21 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-21 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_6 = 402 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-402 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_7 = 79,6 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-79,6 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_8 = 19,6 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-19,6 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_9 = 5,62 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-5,62 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_{10} = 22,6 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-22,6 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_{11} = 53,6 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-53,6 кОм} \pm 0,5\%$$

$$R_{12} = 52,3 \text{ кОм } \text{С2-23-0,25-52,3 кОм} \pm 0,5\%$$

Выберем конденсаторы марки К71-7, X7R и NPO:

$$C_1 = C_2 = 0,2 \text{ мкФ } \text{К71-7-0,2 мкФ} \pm 0,5\%$$

$$C_3 = C_4 = 0,68 \text{ мкФ } \text{X7R-0,68 мкФ } 50 \text{ В}$$

$$C_5 = C_6 = 0,2 \text{ мкФ } \text{К71-7-0,2 мкФ} \pm 0,5\%$$

$C_7=C_8=0,68 \text{ мкФ X7R}-0,68 \text{ мкФ 50В}$

$C_9=8300 \text{ пФ K71-7-8300 кФ}\pm 0,5\%$

$C_{10}=3380 \text{ пФ K71-7-3380 пФ}\pm 0,5\%$

$C_{11}=C_{12}=0,68 \text{ мкФ X7R}-0,68 \text{ мкФ 50В}$

$C_{13}=0,028 \text{ пФ K71-7-0,027 мкФ}\pm 0,5\%$

$C_{14}=1200 \text{ пФ K71-7-1200 пФ}\pm 0,5\%$

$C_{15}=C_{16}=0,68 \text{ мкФ X7R}-0,68 \text{ мкФ 50В}$

2.2.5 Реализация проекта на плате полосового фильтра 4-го порядка

На предприятии ПАО «Кузнецов», в соответствии с выбранными элементами, была произведена модернизация электрической схемы фильтра 4-го порядка. Результат показан на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Плата полосового фильтра 4-го порядка после модернизации.

По окончании монтажных работ была поведена была проведена проверка (тарировка) аппаратуры стандартными измерительными приборами, подключенными в соответствии со схемой на рисунке 2.9.

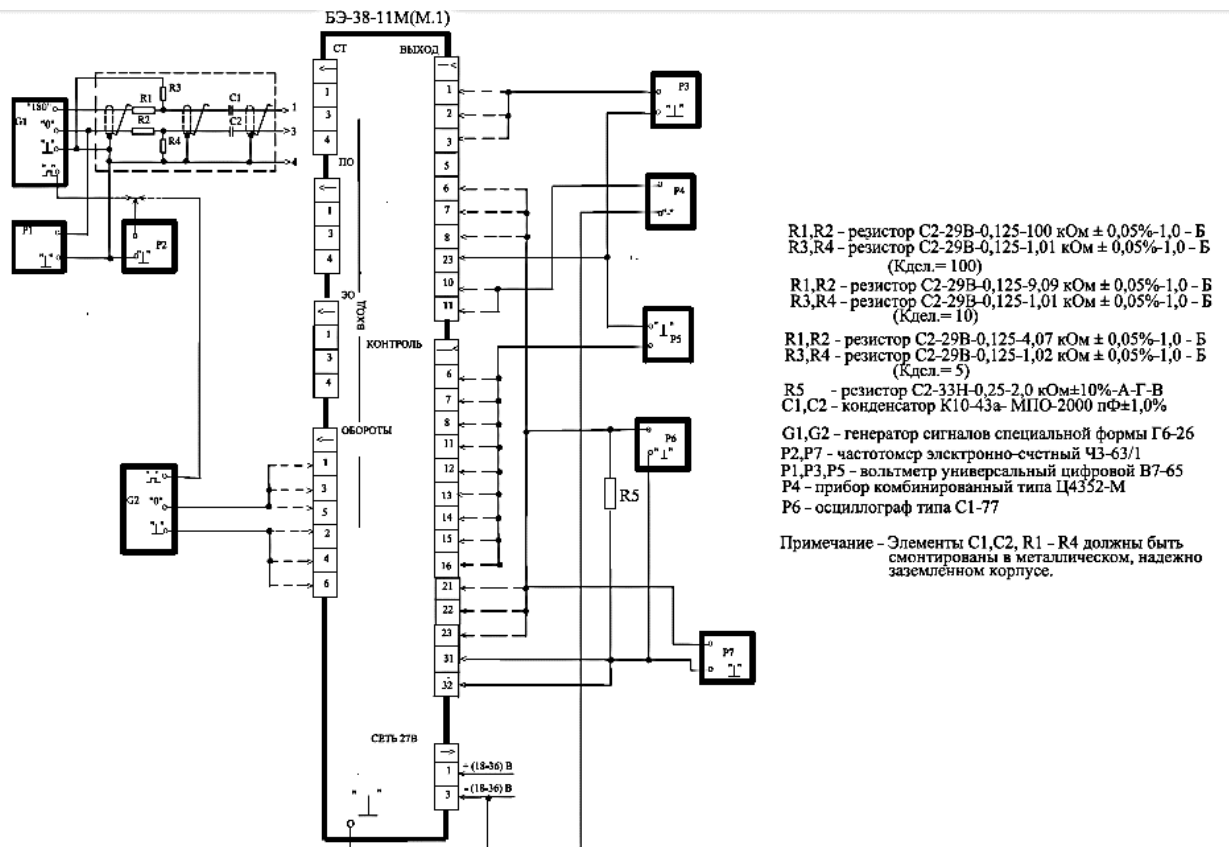


Рисунок 2.9 – Схема подключения со стандартными измерительными приборами, для проверки аппаратуры

Для расчета входного напряжения $U_{ВХ}$, применим формулу:

$$U_{ВХ} = \frac{10 \cdot 2\pi f \cdot V \cdot 10^{-3} \cdot K_D \cdot 10^3}{2 \cdot 1,414 \cdot C_{ЭКВ}}, \quad (2.7)$$

Где, 10 - коэффициент деления делителя;

$$\pi = 3,14$$

f – частота 125 Гц;

V - значение виброскорости, 50 (100), мм/с;

K_D – паспортное значение коэффициента преобразования датчика;

$C_{ЭКВ} = 1000$ пФ – значение эквивалента, на входе блока.

Подставим значения в формулу 2.7 определим $U_{ВХ1}$, $U_{ВХ2}$:

$$U_{ВХ1} = \frac{10 \cdot 2\pi f \cdot V \cdot 10^{-3} \cdot K_D \cdot 10^3}{2 \cdot 1,414 \cdot C_{ЭКВ}} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 125 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,414 \cdot 1000} = 277,7 \text{ мВ}$$

$$U_{ВХ2} = \frac{10 \cdot 2\pi f \cdot V \cdot 10^{-3} \cdot K_D \cdot 10^3}{2 \cdot 1,414 \cdot C_{ЭКВ}} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 125 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,414 \cdot 1000} = 555,4 \text{ мВ}$$

Была проведена последовательная проверка каналов измерения.

При подаче от генератора G_1 на вход канала напряжения $U_{вх1}$, по вольтметру $P_1 = 277$ мВ и частотомеру $P_2 = 125$ Гц, показания вольтметра P_3 на контактах 1,2,3 соединителя «ВЫХОД» находились в пределах от 2,35 до 2,65 В, по каждому проверенному каналу измерения.

При подаче от генератора G_1 на вход канала напряжения $U_{вх2}$, по вольтметру $P_1 = 555,4$ мВ и частотомеру $P_2 = 125$ Гц, замеряли напряжение переменного тока на выходе усилителя заряда $U_{ввых.уз}$ вольтметром P_5 на контактах 14,15,16 соединителя «КОНТРОЛЬ».

Далее вольтметром P_5 замеряли напряжение переменного тока на выходе масштабного усилителя $U_{ввых.му}$ на контактах 6,7,8 соединителя «КОНТРОЛЬ», а также напряжение постоянного тока на выходе каналов $U_{ввых=}$ с контактов 11,12,13. Все значения отражены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Замеренные значения выходных сигналов.

Канал	$U_{ввых.му}$, мВ	$U_{ввых.му}$, мВ	$U_{ввых=}$, В
Допустимые значения	100-122	3182-3890	4,70-5,30
СТ	119	3186	5,2
ПО	118	3189	5,1
ЗО	106	3184	4,9

Все замеры соответствуют допускам, значит все расчеты и модернизация выполнена правильно.

3 Экономическая часть

3.1 Расчет затрат на модернизацию

В общую стоимость расходов на модернизацию электрической схемы испытательного стенда входит:

- расчет стоимости проектирования (разработка чертежей, расчет и выбор элементов);
- расчет стоимости электротехнических работ (выполнение демонтажных/монтажных работ и работ по тарировке модернизированного оборудования;
- расчет затрат на покупные изделия.

3.1.1 Расчет стоимости проектирования

Одной из статей затрат является заработная плата проектировщика. Расчет будем производить при следующих условиях:

Количество дней (сколько работал) – 5 дней;

Тарифная ставка – 70 р/ч;

Рабочий день - 8 ч.

Рассчитаем основную заработную плату ($O_{зп}$):

$$O_{зп} = D_p \cdot t \cdot б, \quad (3.1)$$

где, D_p - количество дней работы;

t - продолжительность рабочего дня, ч;

$б$ – тарифная ставка, исходя из разряда квалификации, руб.

$$O_{зп} = D_p \cdot t \cdot б = 5 \cdot 8 \cdot 70 = 2800 \text{ руб.}$$

Рассчитаем дополнительную заработную плату по формуле:

$$D_{зп} = 20\% \cdot O_{зп}, \quad (3.2)$$

$$D_{зп} = 20\% \cdot O_{зп} = 20\% \cdot 2800 = 560 \text{ руб.}$$

Рассчитаем премию по формуле:

$$П = 30\% \cdot O_{зп}, \quad (3.3)$$

$$П = 30\% \cdot 2800 = 840 \text{ руб.}$$

Рассчитаем фонд заработной платы по формуле:

$$\Phi ЗП_{np} = O_{зп} + Д_{зп} + П, \quad (3.4)$$

где, $O_{зп}$ - основная заработная плата, руб.;

$Д_{зп}$ - дополнительная заработная плата, руб.;

$П$ - премия, руб.;

$$\Phi ЗП_{np} = 2800 + 560 + 840 = 4200 \text{ руб.}$$

Вычислим единый социальный взнос (ЕСВ):

$$ЕСВ = 26\% \cdot \Phi ЗП_{np}, \quad (3.5)$$

$$ЕСВ = 26\% \cdot 4800 = 1248 \text{ руб.}$$

Накладные расходы:

Затраты на канцелярские товары показаны в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Затраты на канцелярские товары при проектировании

Наименование	Цена за единицу, руб.	Количество	Сумма, руб.
Лист бумаги А1	12	6	72,0
Карандаш	6,5	1	6,5
Ручка	9,5	1	9,5
Лист А4	0,4	100	40,0
Итого:			128,0

Всего накладные расходы на канцелярию составили 128 руб.

Общие затраты на проектирование представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Общие затраты на проектирование

Статьи расходов	Сумма, руб.
$\Phi ЗП_{np}$	4200,0
ЕСВ	1248,0
Накладные расходы	128,0
Итого:	5576,0

Стоимость проектирования C_{Π} модернизации составляет 5576,0 руб.

3.1.2 Расчет стоимости электротехнических работ

При модернизации необходимы работы, связанные с подготовкой деталей, демонтаж старых элементов, монтаж новых при помощи пайки, тарировка аппаратуры и определение характеристик.

Произведем расчет заработной платы для испытателя-механика 7-разряда, который выполнил работу за 3 дня, при 8-ти часовом рабочем дне с тарифной ставкой $b = 72,0$ руб. по формуле 3.1:

$$O_{ЗП} = D_p \cdot t \cdot b = 3 \cdot 8 \cdot 72,0 = 1728 \text{ руб.}$$

Дополнительную зарплату ($D_{ЗП}$) определим по формуле 3.2:

$$D_{ЗП} = 20\% \cdot O_{ЗП} = 20\% \cdot 1728 = 345,6 \text{ руб.}$$

Премииальные (Π) определим по формуле 3.3

$$\Pi = 20\% \cdot O_{ЗП} = 30\% \cdot 1728 = 518,4 \text{ руб.}$$

Рассчитаем фонд заработной платы испытателя – механика по формуле 3.4:

$$\Phi_{ЗП \text{ и.м.}} = O_{ЗП} + D_{ЗП} + \Pi = 1728,0 + 345,6 + 518,4 = 2592 \text{ руб.}$$

Отчисления по единому социальному взносу (ЕСВ) вычисляются по формуле 3.5:

$$ЕСВ = 26\% \cdot \Phi_{ЗП \text{ и.м.}} = 26\% \cdot 2592 = 673,92 \text{ руб.}$$

Определим амортизационные отчисления:

$$AO = N_a \cdot T \cdot C_{\text{перв.}} \tag{3.6}$$

Где, N_a - норма амортизации;

T - срок службы оборудования;

$C_{\text{перв.}}$ - первоначальная стоимость оборудования

В свою очередь норма амортизации равна:

$$N_a = (1/T) \cdot 100\%, \tag{3.7}$$

За 1 день использования:

$$AO_{\text{д}} = (N_a \cdot T \cdot C_{\text{перв.}}) / D_p, \tag{3.8}$$

где, D_p - количество дней работы оборудования в году (251 день).

Производим расчет и результат вычислений заносим в таблицу 3.3, где представлено необходимое для модернизации оборудование.

Таблица 3.3 – Амортизационные отчисления

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Стоимость за ед. (С _{перв}), руб.	Фонд службы, лет	Na, %	АО, руб.	АО _д , руб.	Кол-во дней	Итого за 3 дня, руб.
1	Паяльник электрический	1	180,0	5	20	36	0,14	3	0,42

Общая стоимость амортизационных отчислений за 3 дня - 0,42 руб.

Затраты на электроэнергию паяльника ($Z_{э/э}$) будем вычислять по формуле:

$$Z_{э/э} = N \cdot T \cdot n \cdot C_{ед\ э/э}, \quad (3.9)$$

Где, $N = 0,4$ кВт - потребляемая мощность;

$T = 24$ часов - время работы;

$n = 0,8$ - коэффициент неравномерности использования;

$C_{ед\ э/э} = 5,7$ руб. – цена за 1 кВт электроэнергии.

$$Z_{э/э} = N \cdot T \cdot n \cdot C_{ед\ э/э} = 0,4 \times 24 \times 0,8 \times 5,7 = 43,78 \text{ руб.}$$

Затраты на электротехнические работы представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Затраты на электротехнические работы

Статьи расходов	Сумма, руб.
ФЗП _{и.м.}	2592,0
ЕСВ	673,92
Амортизационные отчисления	0,42
Затраты э/э	43,78
Итого:	3310,12

Стоимость электротехнических работ $C_{эп}$ составляет 3310,12 руб.

3.1.3 Расчет затрат на покупные изделия

Для дальнейшей модернизации электрической схемы испытательного стенда нам необходимо правильно рассчитать кол-во элементов, так как предстоит модернизировать 2 блока БЭ-38 аппаратуры ИВ-Д-ПФ-С, по 3 канала в каждом. Ниже, в таблице 3.5 представлен перечень покупных (основных и вспомогательных) изделий для модернизации электрической схемы.

Таблица 3.5 – Перечень покупных изделий для модернизации

Наименование товара	Цена за единицу, руб.	Кол-во, шт	Сумма, руб
Резистор С2-23-0,25-1 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Резистор С2-23-0,25-53 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Резистор С2-23-0,25-49,3 кОм±0,5%	5,64	6	33,84
Резистор С2-23-0,25-79,6 кОм±0,5%	5,8	12	69,6
Резистор С2-23-0,25-21 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Резистор С2-23-0,25-402 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Резистор С2-23-0,25-19,6 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Резистор С2-23-0,25-5,62 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Резистор С2-23-0,25-53,6 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Резистор С2-23-0,25-52,3 кОм±0,5%	5,8	6	34,8
Конденсатор К71-7-8300 пФ±0,5%	12,0	6	72,0
Конденсатор К71-7-3380 пФ±0,5%	12,0	6	72,0
Конденсатор К71-7-0,027 пФ±0,5%	12,0	6	72,0
Конденсатор К71-7-1200 пФ±0,5%	12,0	6	72,0
Припой ПОС-61	79	1	79,0
Канифоль сосновая	16	1	16,0
Флюс ЛТИ-120	58	1	58,0
Кисточка	35	1	35,0
Салфетки	15,0	1	15,0
Изопропанол 99,7%, 0,4 л.	177,63	1	177,63
Итого:			1050,47

Общая стоимость покупных изделий $C_{\text{пи}}$ составляет 1050,47 рублей.

3.1.4 Расчет окончательной стоимости модернизации электрической схемы испытательного стенда

Расчет общей стоимости C произведем по формуле:

$$C = C_{\text{п}} + C_{\text{эр}} + C_{\text{пи}}, \quad (3.10)$$

Где, $C_{\text{п}}$ – стоимость проектирования, берем из п.3.1.1;

$C_{\text{эр}}$ – стоимость электротехнических работ, берем из п.3.1.2;

$C_{\text{пи}}$ – стоимость покупных изделий, берем из п. 3.1.3.

$$C = C_{\text{п}} + C_{\text{эр}} + C_{\text{пи}} = 5576,0 + 3310,0 + 1050,47 = 9936,47 \text{ руб.}$$

Рассчитаем прибыль, в размере 5% от C :

$$П = 9936,47 \cdot 5\% = 496,82 \text{ руб.}$$

Рассчитаем налог на добавленную стоимость (НДС), который составляет 18% от общей стоимости C и прибыли $П$:

$$\text{НДС} = (C + П) \cdot 18\%, \quad (3.11)$$

$$\text{НДС} = (9936,47 + 496,82) \cdot 18\% = 1878,0 \text{ руб.}$$

Рассчитаем сумму стоимости модернизации электрической схемы испытательного стенда $C_{\text{мод}}$ по формуле:

$$C_{\text{мод}} = C + П + \text{НДС}, \quad (3.12)$$

$$C_{\text{мод}} = C_{\text{мод}} = 9936,47 + 496,82 + 1878 = 12311,3 \text{ руб.}$$

3.1.5 Анализ экономической эффективности модернизации

Проведя модернизацию электрической схемы, мы получили возможность продолжать осуществление вибрационного контроля ГТД на испытательном стенде. Увеличив коэффициент усиления входного устройства и расширив частотный диапазон фильтра, мы сможем более качественно и своевременно проводить анализ вибрационного состояния ГТД с помощью модернизированной аппаратуры.

По окончании расчетов мы получили общую сумму стоимости модернизации $C_{\text{мод}} = 12311,3$ руб. Это сумма очень мала по сравнению с покупкой нового оборудования, стоимость которого составляет 473716,62 руб.

Заключение

В результате выполнения бакалаврской работы была модернизирована электрическая схема испытательного стенда.

В процессе работы было изучено состояние вопроса, а именно общее описание и работа стенда, система вибрационного контроля ГТД, виды испытаний, проводимых на нем, описание модуля ИВ-Д-ПФ, его модификаций. Были построены схемы общего вида испытательного стенда, структурная схема измерителя параметров вибрации, схема электрическая соединений ИВ-Д-ПФ, а также структурная схема блока БЭ-38-2.

В ходе анализа технических характеристик аппаратуры ИВ-Д-ПФ-4М и ИВ-Д-ПФ-С, выявлено, что аппаратура ИВ-Д-ПФ-С морально устарела, не соответствует новым вибропреобразователям. Были поставлены задачи и варианты их решения.

В основной части бакалаврской работы была взята за образец аппаратура ИВ-Д-ПФ-4М, которая является новой версией ИВ-Д-ПФ-С и соответствует современным вибропреобразователям. В работе были произведены расчеты и выбор новых элементов во входном устройстве ИВ-Д-ПФ-С, с целью изменения коэффициента усиления в его нормирующем устройстве, что бы он соответствовал новым датчикам. По окончании расчетов, была произведена реализация проекта на платах входного устройства (модернизация входного устройства).

Для расширения диапазона частот измеряемой виброскорости, нам необходима была модернизация фильтра. Согласно электрической схеме полосового фильтра 4-го порядка этого был произведен расчет, выбор элементов. Проект был реализован на плате фильтра 4-го порядка. Диапазон частот измеряемой виброскорости расширен с 30-150 Гц до 10-500 Гц.

В данной работе модернизировано два блока БЭ-38 аппаратуры ИВ-Д-ПФ-С, по три канала в каждом, т.е. всего двенадцать плат.

В экономической части был произведен расчет стоимости проектирования, электротехнических работ, стоимость покупного оборудования для модернизации, а также проведен анализ экономической эффективности модернизации. Сумма модернизации всего $C_{\text{мод}} = 12311,3$ руб., по сравнению с покупкой нового оборудования, стоимость которого составляет 473716,62 руб.

В результате модернизации мы получили экспериментальную аппаратуру, которая по своим техническим характеристикам соответствует новым вибропреобразителям, расширили частотный диапазон, что позволит нам в дальнейшем более точно и качественно производить вибрационный контроль ГТД на испытательном стенде. Кроме того, мы сэкономили средства и время на покупку нового, дорогостоящего оборудования.

Список используемой литературы

- 1 Григорьев, В.А. Испытания авиационных двигателей: Учебник для вузов / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.А. Гишварова — М.: Машиностроение, 2009. — 504с.
- 2 Зарецкий, С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом: / С.П. Зарецкий. - М: Недра, 1987. - 198с.
- 3 Двигатель НК-16СТ. Руководство по технической эксплуатации. Книга-1. – с.2-5
- 4 Аппаратура контроля вибрации ИВ-Д-ПФ-4М. Руководство по эксплуатации ЖЯИУ.421431.001-22 РЭ. ЗАО «Виброприбор». 2008 г. - 71 с.
- 5 Кульчихин, В.Г., Шабаетов, В.М., Гаранин И.В., Леонтьев М.К., Потапова О.Ю. Стендовые испытания приводов ГПА в условиях ремонтного предприятия. Монография. Тюмень: ОАО «Тюменские авиастроители», 2006. – 160 стр.
- 6 Джонсон, Д. Справочник по активным фильтрам: Пер. с англ./Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
- 7 ГОСТ Р ИСО 10816-4-99. Контроль состояния машин по результатам измерения вибраций на невращающихся частях. Часть 4. Газотурбинные установки. - Введ. 2000-07-01. – М.: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2000. – 10 с.
- 8 ГОСТ 28775-90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. – Введ. 1992-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 13 с.
- 9 Газотурбинный двигатель НК-16СТ. Руководство по технической эксплуатации», книга 3: раздел 9: «Система контроля работы двигателя» с.868-873.
- 10 Попов, В.М., Чигвинцев, А.А., Устинов, В.В. Авиационные приборы и

информационно-измерительные системы / В.М. Попов, А.А. Чигвинцев, В.В. Устинов. – Иркутск: МГТУ ГА ИФ, 2010. -217 с.

11 Габец, В.Н., Соловьев. Ю.С., Авиационные приборы. Авиационное оборудование контроля работы авиадвигателей: Учебное пособие. — М.: МГТУ ГА, 2017. — 60 с.

12 Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г., - Технология эксплуатации и ремонта авиационных двигателей. М: Высшая школа, 2002. – 355 с.

13 Быстров Ю.А., Мироненко И.Г. Электронные цепи и устройства. М.: Высшая школа, 1989.

14 Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. - Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.

15 ГОСТ 2.702-2011 Единая система конструкторской документации. Правила выполнения электрических схем. - Введ. 2012-01-01. - М.: Стандартиформ, 2011.- 27с.: ил.

16 Киселев. В.Ю. Диагностирование газотурбинных двигателей и их узлов по термодинамическим и виброакустическим параметрам: учеб. пособие / В.Ю. Киселев, Н.И. Епишев. – Самара: Из-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. – 200 с.

17 Комплексы вычислительные МПС. Руководство по эксплуатации. БЛИЖ.401250.001. РЭ.- ООО НПО «Мера», 2010. – 146 с.

18 Recorder. Программа управления комплексом МПС. Редакция 3.0. Руководство пользователя. – НПП «Мера», г. Мытищи, 2010. – 173 с.

19 WinПОС. Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя. Издание второе. – НПП «Мера», г. Королев, 2009. – 174 с.

20 Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справ./ Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко. - Мн.: Беларусь, 1994. – 591 с.