Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Санкт-Петербургский государственный

университет гражданской авиации»

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Методические указания по

выполнению курсового проекта

Для студентов ФАИТОП и ЗФ

Специальности «Эксплуатация воздушных судов и

организация воздушного движения»

специализации **ОрТОР** и

студентов 2-го высшего образования направления подготовки

«Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей»

профиль подготовки **ТОЛААД**

Санкт-Петербург

2019

Одобрено и рекомендовано к изданию

Учебно-методическим советом Университета

Ш87 (03)

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**: Методические указания по выполнению курсового проекта / СПб ГУГА. С.-Петербург, 2019.

Издаются в соответствии с программой курса «Методы и средства диагностирования авиационной техники».

Содержат теоретические положения, исходные данные и методические указания для выполнения курсового проекта, примеры решения задач статистического анализа с использованием различных критериев, приложение с примером выполнения и оформления курсового проекта, список литературы.

Предназначены для студентов ФАИТОП и ЗФ специальности «Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения» специализации ОрТОР и студентов 2-го высшего образования направления подготовки «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» профиль подготовки ТОЛААД.

Табл.6 , библ. 8 назв., Ил. 6.

Составители И.В. Любимов канд. техн. наук, доц.,

Д.А. Иванов канд. техн. наук, доц.

Рецензент В.Н. Тарасов, д-р техн. наук, доц.

© Университет гражданской авиации, 2019

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

В результате изучения дисциплины студент должен получить знания о теории и практических методах и средствах технического диагностирования (ТД) и неразрушающего контроля (НК) авиационной техники, ознакомиться с основами организации служб ТК и НК в условиях авиационной технической базы авиапредприятия, иметь представление об организационных и технических основах системы сбора, анализа и использования полетной информации. С целью закрепления знаний полученных при изучении дисциплины студенты выполняют курсовой проект.

Тема курсового проекта **«Расчет амплитуд колебаний ротора и корпуса газотурбинного двигателя, обусловленных неуравновешенностью диска турбины ротора при обрыве лопатки и оценка технического состояния газотурбинного двигателя**». Для лучшего усвоения материала и написания курсового проектав приложении данных методических указаний приведен пример выполнения и оформления курсового проекта (приложение на стр. 28).

Теоретические положения

**1 Дефекты ротора с лопатками**

Увеличение вибрации на роторной частоте происходит по следующим причинам:

- из-за недостаточной динамической балансировки ротора;

- от разрушения и деформации лопаток ротора;

- из-за коробления деталей ротора вследствие неравномерного их прогрева при работе;

- от износа или разрушения деталей подшипников опор ротора;

- из-за ослабления посадки деталей на роторе (если посадка ослаблена по достижении определенной скорости вращения роторов, то на этой скорости отмечается резкий скачок роста уровня вибрации);

- от задевания деталей ротора о неподвижные части. В этом случае появляется нестабильность вибрации ротора во времени. Форма осциллограммы, размах и частота вибрации непрерывно меняются, в спектрограмме появляется составляющая на частоте задевания, которая флюктуирует во время работы.

В случае начала или развития разрушения подшипников опор ротора двигателя помимо изменения и роста вибрации, растет температура масла на выходе из опор, появляются посторонние частицы в масле, меняется время выбега ротора.

Упрощенное моделирование дефекта роторного узла двигателя может осуществляться с учетом следующих конструктивных особенностей:

- ротор установлен в корпус двигателя на упругих опорах (под подшипниками качения);

- в качестве дефекта роторного узла рассматривается отрыв лопатки, что приводит к увеличению остаточной неуравновешенности ротора;

- считается, что масса двигателя существенно превышает массу ротора.

На рис. 1.1 показан роторный узел двигателя и расчетная схема.

Допустим, что масса ротора сосредоточена в центре тяжести его диска, а вал является упругим и невесомым. Считаем, что система совершает установившиеся вынужденные вертикальные колебания под действием сил, обусловленных динамической неуравновешенностью ротора. В случае рассмотрения только вертикальных колебаний (например, в направлении измерения вибрации) такая система имеет одну степень свободы.

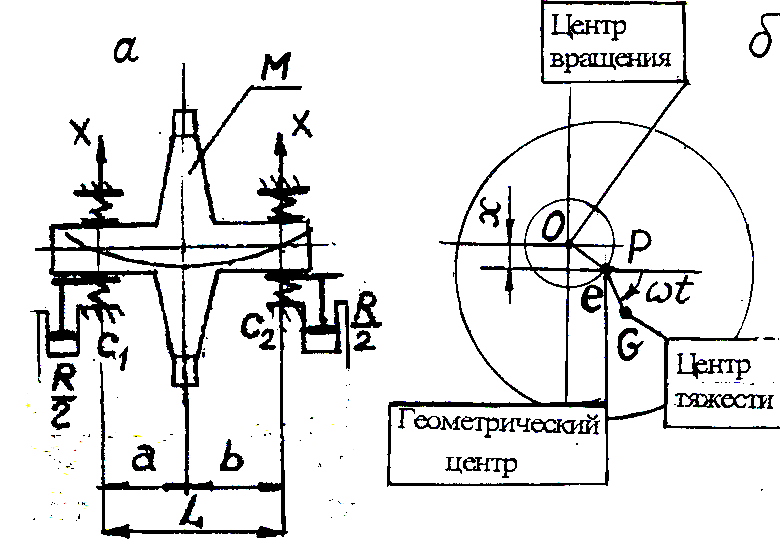


Рис. 1.1. Узел двигателя с неуравновешенным ротором (а)

и расчётная схема (б):

M – масса ротора; e1 – начальный эксцентриситет массы ротора;

R – коэффициент затухания вибрации в упругих опорах ротора;

с– суммарная жесткость вала ротора и упругих опор;

,

где *a* и *b* – расстояния от центра тяжести ротора до передней и задней опор;

L – расстояние между опорами; *с1* и *с2* – жёсткость передней и задней опор;

*EI* – изгибная жёсткость вала.

Допустим, что ротор вращается с угловой скоростью ω = 2π fp, где fp - частота вращения ротора в Гц. Вертикальное перемещение массы ротора с начальным эксцентриситетом  равно .

Суммируя вертикально действующие динамические силы можно записать дифференциальное уравнение колебаний центра масс ротора в следующем виде:

,

или иначе

.

Здесь 

В случае обрыва лопатки ротора .

В рассматриваемой двухмассовой системе колебания центра масс корпуса двигателя в вертикальном направлении также можно описать линейным дифференциальным уравнением:

.

После преобразований этих уравнений с использованием метода механического импеданса (производится замена Fэквsinωt на Fэквexp(jωt)),

x(t) на , x∂(t) на , где  и  - комплексные амплитуды, соответствующие x(t) и x∂(t)) и сокращения на множитель exp(jωt), получаем систему алгебраических уравнений:

;



Установившиеся колебания центра масс ротора выражается уравнением:

, (1.1)

где:  - коэффициент динамичности;

*β*  – безразмерный коэффициент затухания;

r = ω/ω0,(*ωо= * - частота собственных колебаний ротора на упругих опорах);

- начальная фаза колебаний.

Из этой системы определяются комплексные амплитуды колебаний ротора и корпуса двигателя  и  по правилу Крамера:

Здесь:

Δ = (-Mω2 + C)(-M∂ω2 + С + С∂) - R(R + R∂)ω2 - C2 +R2ω2 +

+ jω[R(-M∂ω2 + (R + R∂)(- Mω2 + С) -2CR] = a0+b0j;

Δ1 = Fэкв(-M∂ω2 + C + C∂) + j Fэквω(R + R∂) = a1+b1j;

Δ2 = FэквC + j FэквωR = a2+b2j.

При этом если x(t) = Xcos(ωt-ϕ); x∂(t) = X∂cos(ωt-ϕ∂), то амплитуды X и X∂ вынужденных колебаний при установившемся режиме можно вычислить по формулам:

 и .

Из выражения (1.1) видно, что амплитуда колебаний ротора X (в микрометрах) прямо пропорциональна его начальной неуравновешенности, квадрату частоты вращения и коэффициенту динамичности, который зависит от коэффициента затухания в упругих опорах и отношения частоты вращения ротора к частоте собственных колебаний на упругих опорах.

На рис. 1.2 представлена зависимость амплитуды колебаний ротора от отношения частот r коэффициента затухания β = 0,1.

Здесь же показана зависимость амплитуды колебаний ротора Х2  при увеличенном эксцентриситете e2 = 5e1 из-за обрыва лопатки.

.

Из анализа графика (рис. 1.2) видно, что на критических оборотах, соответствующих резонансной частоте дефектного ротора *ω0*, наблюдается значительное увеличение его амплитуды колебаний, что может привести к задеванию ротора за неподвижные части, если не предусмотрено ужесточение упругих опор с ростом амплитуды колебаний ротора. Также видна прямая связь диагностического параметра (виброперемещения Х) с изменением структурного параметра – увеличением дисбаланса ротора с дефектной лопаткой.

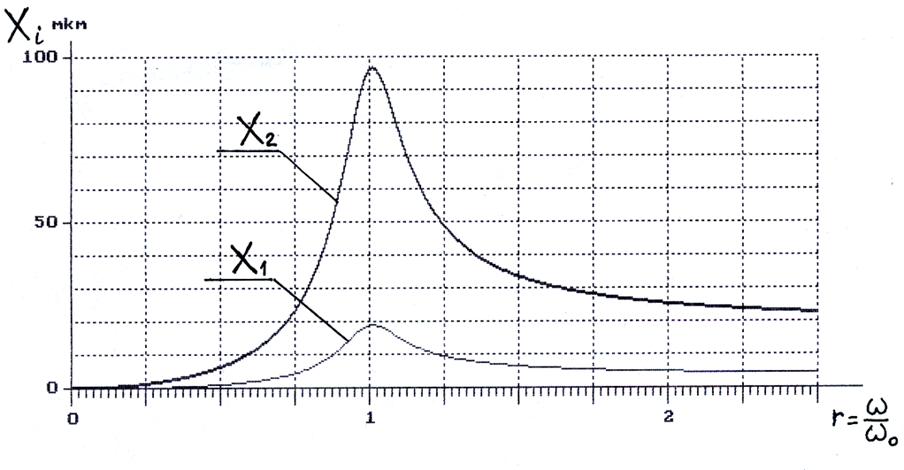


Рис. 1.2. Частотные зависимости амплитуд колебаний

дефектного и бездефектного роторов

В реальных условиях работы двигателя имеется много источников вибрации с периодическими и случайными составляющими, которые могут маскировать роторную вибрацию двигателя на рабочем режиме. Учитывая рост уровня вибрации на роторной частоте в области резонанса *(ω0),* представляется перспективным диагностировать состояние лопаток ротора на выбеге, когда, с одной стороны, снизятся вибропомехи от рабочего процесса, а, с другой стороны, при проходе через резонанс ротора на упругих опорах возрастет амплитуда колебаний на роторной частоте.

Дефекты лопаток проявляются не только на частоте вращения ротора, но и в области более высоких частот в виде модуляции колебаний с несущей лопаточной частотой.

Причиной модуляции, помимо обрыва лопаток, может быть проявление других дефектов лопаток типа трещин, деформаций.

Во всех случаях увеличивается амплитудная и частотная модуляция возмущающих сил, связанная с усилением взаимодействия различных колебательных процессов друг с другом.

Несущей является «лопаточная» частота * = n*, где *n* -число лопаток ротора; ** - угловая частота вращения ротора.

В качестве модулирующего процесса выступает оборотная частота ротора ** и кратные гармоники (*К*).

Математическая модель этого процесса может быть представлена в виде виброакустического сигнала со смешанной модуляцией:

,

где *mk* – парциальные глубины амплитудной модуляции; - индекс модуляции; *mn* – глубина угловой модуляции с частотой *n;*

*mn = Δ,* где *Δ* – девиация частоты.

Частотная модуляция возникает при деформации лопаток (развороте).

В случае отсутствия частотной модуляции модулирующая функция принимает вид

.

На рис. 1.3 представлен сигнал и спектр вибрации ротора с дефектной лопаткой, смоделированный на основании вышеприведенной формулы.

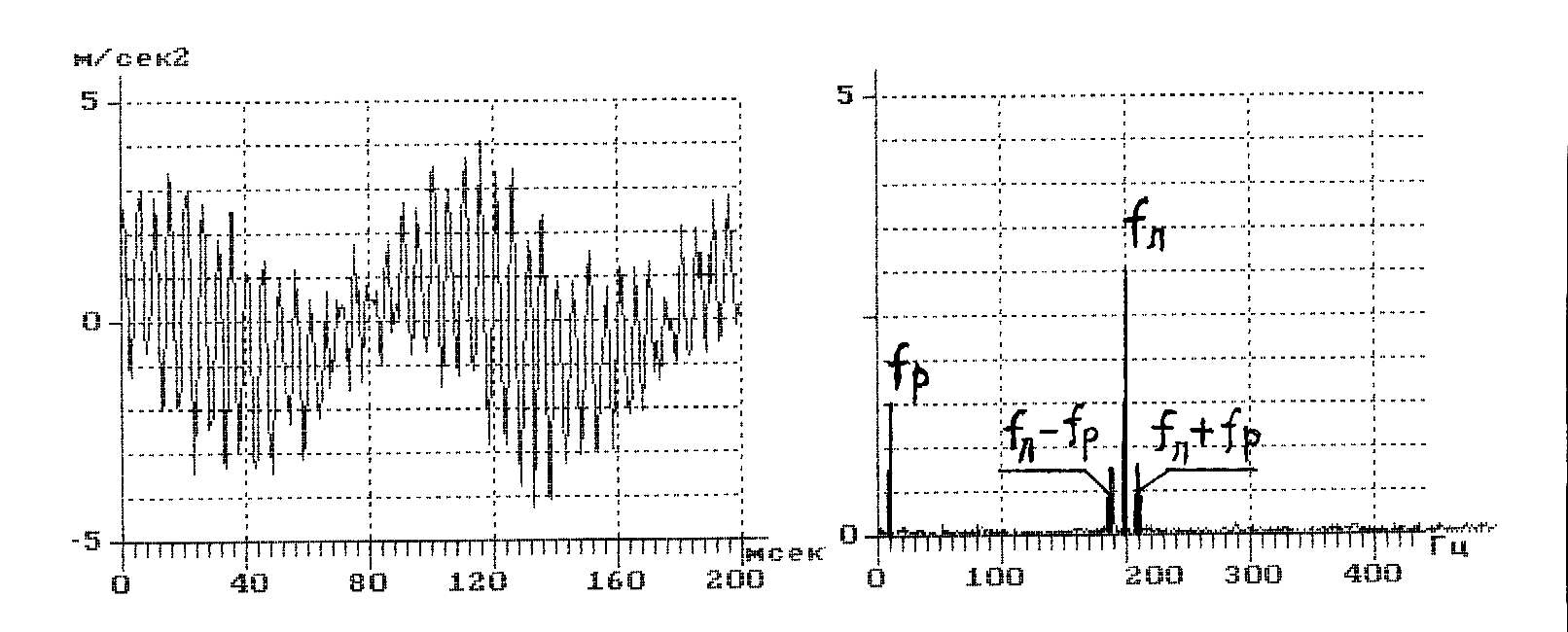


Рис. 1.3. Моделирование дефекта лопатки ротора турбины

Видно, что дефект лопатки, например, в виде трещины приводит к появлению симметрично расположенных «боковых» частот относительно «несущей» лопаточной частоты.

Степень развития этого дефекта оценивается глубиной амплитудной модуляции по формуле

,

здесь Sfл  - амплитуда несущей («лопаточной») частоты;

*S(fл-fp)* и *S(fл+fp)* – амплитуды боковых составляющих спектра вибрации.

**2 Методы теории статистических решений**

Ошибки I и II рода. Выбор признакового пространства в условиях вероятностного описания классов. Критерий Байеса. Минимаксный критерий. Критерий Неймана-Пирсона.

В условиях неполной информации отнесение объекта диагностирования к классу исправного или неисправного состояний может быть выполнено с использованием статистической теории проверки гипотез, созданной Нейманом и Пирсоном.

Положим в основу объект диагностики. Это может быть отдельный узел или целый механизм. Каждый объект будем относить к одному из двух классов:

класс I – объект исправен,

класс II – объект неисправен.

О состоянии объекта будем судить по значениям измеряемых параметров. Например, объект – газотурбинный двигатель (ГТД), измеряемый параметр – СКЗ виброскорости, рассчитанный по сигналу с датчика вибрации.

Далее ограничимся одним измеряемым параметром. Обозначим его через Х и будем считать случайной величиной.

Обозначим условную плотность вероятности случайной величины Х при отнесении объекта к классу I – f1(x), а при отнесении объекта к классу II – f2(x). Возможное взаимное расположение графиков этих функций представлено на рис. 2.1.

Пусть в результате обследования параметр принял значение Х. К какому классу отнести объект в этом случае? Эта вероятностная задача сводится к нахождению такого значения Х0, что при ХХ0 объект относят к классу I, а при ХХ0 – к классу II. Решения, принятые в условиях неполной определенности, называют гипотезами. Обозначим гипотезу о принадлежности объекта к классу I через Н1, а гипотезу о принадлежности объекта к классу II через Н2. При этом принятое решение может оказаться ошибочным.

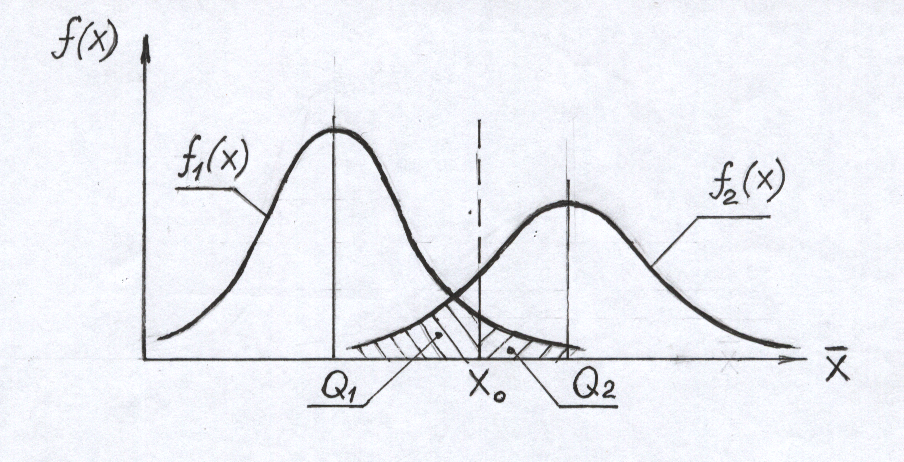


Рис. 2.1. Графики плотностей распределения вероятностей параметра при отнесении объекта к классам I и II

Ошибка первого рода (вероятность ложной тревоги) - объект относится к классу I, а его посчитали объектом класса II.

Ошибка второго рода (вероятность пропуска цели) – объект относится к классу II, а его посчитали объектом класса I.

Используя свойства случайных величин, можно вычислить вероятности ошибок соответственно первого и второго рода по формулам:

,

.

Если считать, что случайная величина Х для обоих классов имеет нормальное распределение (распределение Гаусса), то

,

,

где А1 и А2 - математические ожидания, а σ1 и σ2 – среднеквадратические отклонения соответствующих распределений.

Введя функцию Лапласа (значения функции Лапласа приведены в табл. 2.1), получим

, (2.1)

. (2.2)

Условные вероятности правильных решений при справедливости гипотез Н1 и Н2 соответственно равны:

,

.

При наличии достаточного статистического материала и методики расчета материальных потерь при принятии ошибочных решений можно ввести некоторые априорные характеристики объекта.

Обозначим априорные вероятности принадлежности объекта соответственно к первому и второму классам через P(I) и P(II).

Введем следующие обозначения:

С12 – ущерб (стоимость), причиненный ошибкой первого рода;

С21 – ущерб (стоимость), причиненный ошибкой второго рода;

С11 и С22 – стоимость правильных решений.

Матрица, составленная из чисел Сij, называется матрицей цен.

Тогда средняя величина потерь при многократном распознавании объектов равна сумме стоимостей неправильных и правильных решений с учетом вероятностей их появления и априорных вероятностей отнесения объекта к первому и второму классам:

C = P(I)∙C11∙P1 + P(I)∙C12∙Q1+ P(II)∙C22∙P2 + P(II)∙C21Q2.

С учетом полученных ранее соотношений:



**2.1 Критерий Байеса**

Правило, по которому стратегия решений выбирается так, чтобы минимизировать средний риск (среднюю стоимость), называется критерием Байеса. При этом величина С должна быть минимальной, т.е. выбирается Х0, при котором С достигает минимума.

Используя необходимое условие минимума функции, продифференцируем С по Х и приравняем производную нулю, положив Х = Х0.



Отсюда:

Полагая P(I)∙(C12 – C11)/P(II)∙(C21 – C22) = 0, получим уравнение для нахождения Х0:

f2(X0)/f1(X0) = 0,

где 0 - коэффициент правдоподобия.

**Пример 1**

При С11 = С22 = 0 и 1 = 2 = :

0 = P(I)∙C12/P(II)∙C21.

С другой стороны

0 = f2(X0)/f1(X0) = exp(((X0 – А1)2 – (X0 – А2)2)/22).

Следовательно:

.

В частности, при С12 = С21 и P(I) = P(II), получим Х0 = (А1 + А2)/2.

**2.2 Минимаксный критерий**

В ситуации, когда априорные вероятности P(I) и P(II) неизвестны, критерий Байеса применить нельзя. В этом случае рационально использовать критерий, который обеспечит минимум максимального среднего риска. Этот критерий получил название минимаксного.

Рассмотрим этот критерий в предположении, что имеется два класса и С11 = С22 = 0. Тогда выражение для среднего риска примет вид:

,

т.к. *P(II) = 1 – P(I).*

Значение С достигает максимума при некотором значении *P(I).* При этом

.

Отсюда получаем уравнение для определения Х0:

C12∙Q1(X0) = C21∙Q2(X0) (2.3).

**Пример 2**

Огибающая корреляционной функции шума работающего редуктора меняется по закону exp(-Аt). Состояние редуктора определяется значением параметра А. Будем считать, что параметр А подчиняется нормальному закону распределения. При этом для нормального редуктора

А1 = m(А) = 0,07(рад/с); 1 = (А) = 0,01(рад/с),

а для неисправного редуктора

А2 = m(А) = 0,12(рад/с); 2 = (А) = 0,015(рад/с).

Кроме того, стоимость правильных решений равна 0, а стоимость ошибки первого рода в пять раз меньше стоимости ошибки второго рода, т.е. С2 = 5С1. Требуется найти критическое значение А0, а также вероятности ошибок первого и второго рода.

Из уравнения (2.3) получим Q1 = 5Q2. Выразим входящие в равенство величины через функцию Лапласа:

F((0,07 – А0)/0,01) = 5F((А0 – 0,12)/0,015).

Отсюда А0 = 0,085, Q1 = 0,05, Q2 = 0,01.

**2.3 Критерий Неймана-Пирсона**

Иногда не известны априорные вероятности и цены ошибок. В этом случае может быть использован критерий Неймана-Пирсона. Его суть состоит в том, что заранее задается максимальное допустимое значение вероятности ошибки первого рода Q1, а затем находится решение, при котором вероятность ошибки второго рода Q2 минимальна. Ясно, что Х0 находится из соотношений:

Но эти соотношения выполняются при выполнении равенства

т.к. при выборе любого другого значения Х > Х0 значение Q2 возрастает, а при Х < Х0 значениеQ1>A.

Используя уравнение (2.1), получим для определения X0:

,

после чего с помощью (2.2) найдем Q2.

**Пример 3**

В условиях примера предыдущего пункта положим, что ошибка первого рода Q1 0,05. Тогда для нахождения А0 получим уравнение

1- F((А0-0,07)/0,01) = 0,05,

откуда из табл. 2.1 найдем: (А0-0,07)/0,01=1,7; А0 = 0,086;

Q2 = F((А0 – 0,12)/0,015) = 0,012.

**Пример 4**

Огибающая корреляционной функции шума работающего редуктора меняется по закону exp(-xt). Состояние редуктора определяется значением параметра х. Будем считать, что х подчиняется нормальному закону распределения. При этом для нормального редуктора

А1 = m(x) = 0,07(рад/с); 1 = (x) = 0,01(рад/с),

а для неисправного редуктора

А2 = m(x) = 0,12(рад/с); 2 = (x) = 0,015(рад/с).

Кроме того стоимость правильных решений равна 0, а стоимость ошибки первого рода в пять раз меньше стоимости ошибки второго рода, т.е. С2 = 5С1. Требуется найти критическое значение А0, а также вероятности ошибок первого и второго рода.

Из уравнения (2.3) получим Q1 = 5Q2. Выразим входящие в равенство величины через функцию Лапласа:

F ((0,07 – А0)/0,01) = F((А0 – 0,12)/0,015)

Отсюда А0 = 0,085, Q1 = 0,05, Q2 = 0,01

**Таблица 2.1**

Значения функции Лапласа F(x)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| X | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0  1  2 | 0,500  0,841  0,977 | 0,540  0,864  0,982 | 0,579  0,885  0,986 | 0,618  0,903  0,989 | 0,655  0,919  0,991 | 0,691  0,933  0,994 | 0,726  0,945  0,995 | 0,758  0,955  0,996 | 0,788  0,964  0,997 | 0,816  0,971  0,998 |

Для нахождения значений функции Лапласа при отрицательных значениях аргумента можно воспользоваться равенством F(-x) = 1 – F(x).

**3 Методические рекомендации по выполнению КУП**

**«Расчет амплитуд колебаний ротора и корпуса газотурбинного двигателя, обусловленных неуравновешенностью диска турбины ротора при обрыве лопатки и оценка технического состояния газотурбинного двигателя»**

Выполнение **КУП** предполагает выполнение **двух заданий** и, соответственно, **содержит два раздела**.

**Исходные данные для выполнения курсового проекта**

– выбираются из таблиц 3.1, 3.2 – для выполнения раздела 1, из таблиц 3.3 и 3.4 – для выполнения раздела 2.

Из таблицы 3.1 по предпоследней цифре учебного шифра выбирается вариант c рабочими оборотами ротора и размерами полого вала, из таблицы 3.2 выбираются остальные исходные данные по последней цифре учебного шифра.

**Таблица 3.1**

Варианты расчетных схем ротора.

| Предпоследняя цифра учебного шифра | Наружный диаметр вала ротора (м) | Внутренний диаметр вала ротора (м) | Рабочая частота вращения ротора fp, об/с (Гц) |
| --- | --- | --- | --- |
| 0, 1 | 0,1 | 0,06 | 50 |
| 2, 3 | 0,12 | 0,07 | 60 |
| 4, 5 | 0,08 | 0,04 | 40 |
| 6,7 | 0,11 | 0,07 | 40 |
| 8, 9 | 0,09 | 0,04 | 70 |

**Таблица 3.2**

Варианты исходных данных

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр и его размерность | Обозн. | Последняя цифра учебного шифра | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Масса ротора, кг | М | 300 | 200 | 400 | 210 | 150 | 150 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| Масса корпуса ГТД, кг | М∂ | 2000 | 1800 | 2500 | 1800 | 2000 | 2000 | 2100 | 2500 | 2400 | 3000 |
| Жесткость упругих опор ротора, Н/м | С1 | 5\*106 | 3\*106 | 4\*106 | 2\*106 | 1\*106 | 3\*106 | 4\*106 | 4,5\*106 | 5\*106 | 5,5\*106 |
| С2 | 5\*106 | 3\*106 | 4\*106 | 2\*106 | 1\*106 | 3\*106 | 4\*106 | 4,5\*106 | 5\*106 | 5,5\*106  19 |
| Расстояние от опор до ц.т. ротора, м | a | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,25 | 0,42 | 0,35 | 0,41 | 0,25 | 0,14 | 0,3 |
| b | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,25 | 0,42 | 0,35 | 0,41 | 0,25 | 0,14 | 0,3 |
| Эксцентриситет ротора, м | е1 | 5\*10-5 | 2\*10-5 | 4\*10-5 | 2\*10-5 | 1\*10-5 | 3\*10-5 | 2\*10-5 | 1\*10-5 | 2\*10-5 | 1\*10-5 |
| е2 | 5\*10-4 | 2\*10-4 | 4\*10-4 | 2\*10-4 | 1\*10-4 | 3\*10-4 | 2\*10-4 | 1\*10-4 | 2\*10-4 | 1\*10-4 |
| Безразмерный коэф. затухания  в опорах ротора |  | 2,7 | 2,3 | 2,6 | 3,0 | 2,5 | 2,1 | 3,0 | 3,5 | 2,9 | 2,4 |
| Безразмерный коэф. затухания в подвеске двигателя | ∂ | 2,5 | 2,8 | 2,0 | 1,8 | 0,9 | 1,8 | 2,5 | 2,2 | 1,5 | 0,9 |
| Суммарная жесткость упругой  подвески двигателя, Н/м | С∂ | 107 | 5\*106 | 107 | 4\*106 | 5\*106 | 1\*107 | 1\*107 | 1\*107 | 1,5\*107 | 2\*107 |

**Задание 1**

**«Расчет амплитуд колебаний ротора и корпуса газотурбинного двигателя (ГТД), обусловленных неуравновешенностью диска турбины ротора при обрыве лопатки».**

Цель выполнения задания 1 состоит в расчете амплитуд установившихся колебаний ротора ГТД на упругодемпферных опорах и корпуса двигателя на упругой подвеске при неуравновешенности, обусловленной обрывом лопатки ротора. Неуравновешенность возникает, если центр тяжести ротора не совпадает с осью его вращения.

Расчетная схема колебательной системы «ротор - корпус ГТД» приведена на рис.1.1. На схеме обозначены:

-масса ротора; - эксцентриситет массы ротора; - коэффициент затухания вибрации в упругих опорах ротора; - суммарная жесткость вала и упругих опор ротора; и – расстояние от центра тяжести ротора до передней и задней опор; расстояние между опорами, и -жесткость передней и задней упругих опор ротора; , , - соответственно масса корпуса двигателя, жесткость и коэффициент затухания вибрации упругой подвески двигателя; и - амплитуды колебаний ротора и корпуса двигателя соответственно

Данная схема описывается системой двух линейных дифференциальных уравнений.

Допустим, что ротор вращается с угловой скоростью , где -частота вращения ротора в Гц. Вертикальное перемещение Х массы ротора с начальным эксцентриситетом равно ∙. Суммируя вертикально действующие динамические силы можно записать дифференциальное уравнение колебаний центра масс ротора в следующем виде:

или иначе

. (3.1)

Здесь

В случае обрыва лопатки ротора .

В рассматриваемой двухмассовой системе колебания центра масс корпуса двигателя в вертикальном направлении также можно описать линейным дифференциальным уравнением:

. (3.2)

После преобразований этих уравнений с использованием метода механического импеданса (производится замена Fэкв sint на Fэкв exp(jt),

x(t) на , x∂(t) на , где и - комплексные амплитуды, соответствующие x(t) и x∂(t)) и сокращения на множитель exp(jt), получаем систему алгебраических уравнений:

;

Из этой системы определяются комплексные амплитуды колебаний ротора и корпуса двигателя и по правилу Крамера:

Здесь:

 = (-M2+C)(-M∂2+С+С∂)-R(R+R∂)2-C2+R22+

+j[R(-M∂2+С+С∂)+(R+R∂)(- M2+С)-2CR] = a0+b0j;

1 = Fэкв(-M∂2+C+C∂)+jFэкв(R+R∂) = a1+b1j;

2 = FэквC+ j FэквR = a2+b2j.

При этом, если x(t) = Xcos(t-); x∂(t)= X∂cos(t-∂), то амплитуды X и X∂ вынужденных колебаний при установившемся режиме можно вычислить по формулам: ; .

**Рекомендуемая последовательность выполнения задания 1.**

1. Рассчитать суммарную жесткость упругих опор с учетом изгибной

жесткости вала ротора.

Суммарная жесткость упругих опор с учетом изгибной жесткости

вала ротора определяется по формуле:

.

Здесь L=- расстояние между опорами;

EJ- изгибная жесткость вала ротора,

-модуль Юнга (для стали =Па.);

–, где и - наружный и внутренний диаметры вала ротора соответственно.

1. Определить приближенное значение частоты собственных колебаний ротора (критические обороты) как одномассовой системы.

Частота собственных колебаний ротора (без учета влияния корпуса двигателя), соответствующая критической скорости вращения вала, определяется по формуле:

.

Примечание: частота вращения f и круговая частота  связаны соотношением  = 2f.

1. Записать уравнения вынужденных колебаний ротора и корпуса двигателя.

Уравнения вынужденных колебаний ротора и корпуса двигателя имеют вид (3.1) и (3.2) с коэффициентами, взятыми в соответствие с вариантом.

Примечание: модуль эквивалентной вынуждающей силы вычисляется по формуле: Fэкв = Me2, где e – эксцентриситет ротора.

**4**. Нарисовать эскиз ротора на упругих опорах.

Эскиз для конкретного варианта выполняется по аналогии с рис. 1.1 на отдельном листе миллиметровки или ватмана размером не менее чем формата А3, в масштабе пропорций расчетной схемы в соответствии с исходными данными, с указанием всех значимых размеров и необходимых для проведения расчетов данных.

**5.** Рассчитать амплитуды вынужденных колебаний ротора и корпуса двигателя на рабочих оборотах с начальным эксцентриситетом (для нормального ротора) и эксцентриситетом (для ротора с дефектной лопаткой).

Расчет амплитуд установившихся колебаний ротора (X) и корпуса двигателя (X∂) выполняется по формулам:

где:

а0 = (-M2+C)(-M∂2+С+С∂)-R(R+R∂)2-C2+R22,

b0 = [R(-M∂2+С+С∂)+(R+R∂)(- M2+С)-2CR],

a1 = Fэкв(-M∂2+C+C∂), b1 = Fэкв(R+R∂),

a2 = FэквC, b2 = FэквR,

R = 2M, R∂ = 2M∂∂.

**6.** Рассчитать амплитуду виброскорости корпуса двигателя.

Расчёт амплитуды виброскорости корпуса двигателя производится по формуле:

V=1032fX∂, [мм/c.]

**7.** Выполнить анализ результатов расчетов и сделать выводы по разделу.

**Задание 2**

**«****Оценка технического состояния газотурбинного двигателя»**

Задача считается выполненным, если в итоге получено правильное числовое значение ответа и дано правильное заключение об исправности двигателя.

**Исходные данные:**

- нормальное распределение уровня вибрации исправного и дефектного двигателей;

- для исправного двигателя математическое ожидание уровня вибрации m1, а среднеквадратическое отклонение - 1;

- для неисправного двигателя математическое ожидание уровня вибрации m2, а среднеквадратическое отклонение - 2;

- максимально допустимое значение ошибки первого рода A.

- замеренное значение уровня вибрации Vп.

Требуется сформулировать заключение об исправности двигателя и определить вероятность ошибки второго рода используя критерий Неймана – Пирсона.

Исходные данные для решения задачи выбираются из табл.3.3 и 3.4.

Из табл. 3.3 по последней цифре учебного шифра студента выбирается максимально допустимое значение ошибки первого рода A, а по предпоследней цифре - исходные данные из таблицы 3.4. Если соответствующая цифра учебного шифра 0, то в таблице выбирается 10-й вариант.

**Таблица 3.3**

Вероятность ошибки первого рода (последняя цифра учебного шифра)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| A | 0,035 | 0,045 | 0,06 | 0,075 | 0,05 | 0,03 | 0,065 | 0,04 | 0,055 | 0,07 |

**Таблица 3.4**

Исходные данные (предпоследняя цифра учебного шифра)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| m1 | 15,6 | 14,9 | 15,8 | 15,4 | 15,2 | 15,7 | 14,8 | 15,1 | 15,5 | 15,3 |
| 1 | 2,8 | 2,7 | 2,9 | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 2,8 |
| m2 | 29,7 | 29,3 | 30,4 | 29,6 | 29,5 | 30,1 | 29,3 | 29,8 | 30,2 | 29,9 |
| 2 | 6,4 | 6,3 | 6,7 | 6,4 | 6,4 | 6,6 | 6,3 | 6,3 | 6,5 | 6,4 |
| Vn | 20,2 | 19,3 | 20,6 | 22,3 | 21,0 | 18,8 | 19,7 | 16,4 | 23,1 | 17,9 |

**Рекомендации по выполнению задания 2**

1. Определить аргумент функции Лапласа по ее значению Q1 = А (из табл.2.1).
2. Вычислить критическое значение вибрации V0 по определенному в п.1 значению аргумента функции Лапласа, используя выражение (2.1).
3. Вычислить аргумент функции Лапласа для определения Q2 по(2.2).
4. Определить значение Q2 из таблицы 2.1.
5. Принять решение об исправности двигателя.
6. Выполнить анализ результатов расчетов и сделать выводы по разделу.

В качестве примера решения подобной задачи рассмотрим выполнение задания “Оценка технического состояния ГТД по уровню шума”

Исходные данные:

- огибающая корреляционной функции уровня шума работающего ГТД меняется по закону exp(-хt), техническое состояние определяется значением параметра х = V;

- нормальное распределение параметра V исправного и дефектного ГТД;

- для исправного ГТД математическое ожидание параметра МV = m1, среднеквадратическое отклонение σV = 1;

- для неисправного ГТД математическое ожидание параметра МV = m2, среднеквадратическое отклонение σV= 2;

- максимально допустимое значение ошибки первого рода Q1 = A.

- замеренное значение параметра Vn.

Требуется сформулировать заключение об исправности ГТД и определить вероятность ошибки второго рода.

Решение.

В соответствии с заданием, будем считать, что параметр V подчиняется нормальному закону распределения. При этом для исправного ГТД

m1 = 0,07(рад/с); 1 = 0,01(рад/с),

а для неисправного ГТД

m2= 0,12(рад/с); 2 = 0,015(рад/с).

Примем допущение, что максимально допустимое значение ошибки первого рода A 0,05, а замеренное значение Vn = 0,1.

Для решения задачи используем критерий Неймана – Пирсона.

Определяем критическое значение параметра V0 и вероятность ошибки второго рода Q2. Используя для нахождения критического значения V0 данные по исправному ГТД, получим уравнение

Q1 = 1 - F((V0-m1)/1) = 1 - F((V0-0.07)/0.01) = 0,05 или

F((V0-0,07)/0.01) = 0,95.

Из табл. 2.1 по значению функции Лапласа 0,95 найдем значение аргумента 1,65, откуда (V0-0,07)/0,01=1,65, то есть V0 = 0,0865.

Для определения вероятности ошибки второго рода воспользуемся формулой

Q2 = F((V0 – m2)/2) и табл. 2.1.

Так как (V0 – m2)/2 = (0,0865 – 0,12)/0,015 = -2,2, то

Q2 = F(-2,2) = 1 – F(2,2) = 1 – 0,0986 = 0,014.

Так как фактическое значение параметра Vn превышает критическое V0, то делается вывод, что ГТД неисправен, а оценка вероятности ошибки второго рода составляет Q2  = 0,014.

Пример кривых функций плотности распределения параметров a для исправного и неисправного механизмов, а также критическое значение параметра (V0) приведены на рис. 2.1.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ушаков, А.П. Методы и средства диагностирования авиационной техники. Часть 1: Учебное пособие / А.П. Ушаков. – СПб.: Университет ГА., 2011. – 120 с.

2. Руководство по организации сбора, обработки и использования полетной информации в авиапредприятиях гражданской авиации Российской Федерации / – М.: Изд-во «Воздушный транспорт», 2002.

3. Ушаков, А.П. Основы теории технической диагностики. Методические указания под ред. д.т.н. А.П.Ушакова пособие / А.П. Ушаков., С.В. Пушкин, С.В. Тварaдзе. – СПб.: Университет ГА., 2003. – 134 с.

4. Руководство по применению ультразвукового метода неразрушающего контроля изделий авиационной техники гражданской авиации / М.: МГА, 1982.

5. Ермолов, И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов, Ю.А.Останин. – М.: «Высшая школа», 1988.

6. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.

7. ГОСТ 21105-79. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.

8. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация методов.

**Приложение**

*Пример выполнения курсового проекта*

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Цель работы в соответствии с заданием 1 состоит в расчете амплитуд установившихся колебаний ротора ГТД на упругодемпферных опорах и корпуса двигателя на упругой подвеске при неуравновешенности, обусловленной обрывом лопатки ротора. Неуравновешенность возникает, если центр тяжести ротора не совпадает с осью его вращения. В соответствии с заданием 2 проведена оценка технического состояния исследуемого газотурбинного двигателя.

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Наружный диаметр вала ротора, м ………………………………. *D* = 0.08

Внутренний диаметр вала ротора, м ……………………………… *d* = 0.04

Рабочая частота вращения ротора, Гц ……………………………. *f*р = 40

Масса ротора, кг ………………………...…………………….…… *M* = 400

Масса корпуса ГТД, кг …………….…………….……….……….. *Mд* =2500

Жесткость упругих опор ротора, Н/м ………..………............ *C*1 = 2.8 · 106

*C*2 = 2.8 · 106 Расстояние от опор до центра тяжести ротора, м ….…..……… *a* = 0,3

*b* = 0,3

Эксцентриситет ротора, м ……………….....….………….….. *е*1 = 4 · 10-5

*е*2 = 4 · 10-4 Безразмерный коэффициент затухания в опорах ротора, …….…… = 2,6

Безразмерный коэффициент затухания в подвеске двигателя, ……. = 2,0 Суммарная жесткость упругой подвески двигателя; Н/м ………. = 1 · 107

Модуль Юнга для стали; Па ……………………….....….…..…. *Е* = 2 · 1011

**1 Расчет амплитуд колебаний ротора и корпуса газотурбинного двигателя (ГТД), обусловленных неуравновешенностью диска турбины ротора при обрыве лопатки**

1.1 Расчет суммарной жесткости упругих опор с учетом изгибной жесткости вала ротора.

Суммарная жесткость упругих опор с учетом изгибной жесткости вала ротора определяется по формуле:

где - расстояние между опорами;

*L=* 0,3 + 0,3 = 0,6 м.;

*EJ* – изгибная жесткость вала ротора;

*Е* – модуль Юнга;

где *D* и *d* – соответственно наружный и внутренний диаметры вала ротора.

=

1.2 Расчет частоты колебаний ротора, соответствующей критической скорости вращения вала.

Частота собственных колебаний ротора (без учета влияния корпуса двигателя), соответствующая критической скорости вращения вала, определяется по формуле:

;

Частота вращения *f* и круговая частота ω связаны соотношением;

,

1.3 Расчет вынужденных колебаний ротора и корпуса двигателя

Модуль эквивалентной вынуждающей силы вычисляется по формуле:

;

где *е*1‑ эксцентриситет нормального ротора;

*е2* – эксцентриситет ротора в случае обрыва лопатки

**Эскиз ротора на упругих опорах**

**М**

**Мд**

Примечание: Эскиз для конкретного варианта выполняется по аналогии с рис. 1.1 на отдельном листе миллиметровки или ватмана размером не менее, чем формата А3, в масштабе пропорций расчетной схемы в соответствии с исходными данными, с указанием всех значимых размеров и необходимых для проведения расчетов данных

1.4 Расчет амплитуд установившихся колебаний ротора и корпуса двигателя

Расчет амплитуд установившихся колебаний ротора и корпуса двигателя выполняется по формулам:

;

;

Знаменатели в формулах X и Xд - одинаковые, требуется определить только значения a0 и b0 по следующим выражениям:

;

;

;

;

;

;

;

;

=

=

=

Неизвестные: а1; а2; b1 и b2 в формулах для их нахождения имеют модуль эквивалентной вынуждающей силы, который вычисляется по формуле

где е – эксцентриситет.

Значения а1; а2; b1 и b2 - находим для е1 и е2:

1.5 Расчет амплитуд установившихся колебаний ротора и корпуса  
двигателя .

1.6 Расчет амплитуды виброскорости корпуса двигателя

Расчёт амплитуды виброскорости корпуса двигателя производится по формуле:

Подставив в данную формулу имеющиеся значения параметров, и произведя расчет, получим:

а) для двигателя с исправным ротором*:*

б) для двигателя, ротор которого имеет оборванную лопатку*:*

Виброскорость показывает максимальную скорость перемещения контролируемой точки в процессе ее прецессии. Виброскорость есть мера кинетической энергии колебательного процесса, так как энергия пропорциональна квадрату скорости.

В качестве меры виброскорости используется не максимальное значение, а среднеквадратическое (СКЗ) от всех мгновенных значений за определенный интервал времени. Это равноценное по энергии величина постоянного во времени параметра. Эффективное значение виброскорости позволяет привести к единому эквиваленту как детерминированные, так и случайные колебания, допуская их сравнение. Параметр виброскорости позволяет одновременно учитывать и перемещение контролируемой точки, и энергетическое воздействие на опоры от динамических сил, вызывающих вибрацию.

Для исправного двигателя показания

Для неисправного двигателя показания

**ВЫВОДЫ по разделу 1**

Из анализа полученных расчётным путем результатов можно сделать следующие выводы:

С увеличением эксцентриситета е в 10 раз все последующие расчётные данные тоже увеличились в 10 раз.

где *М* - постоянная величина, е - переменная, ω2 постоянная величина.

где - для отрыва лопатки.

Соответственно увеличивается и величина амплитуды колебаний ротора и корпуса двигателя (см. итоговую таблицу результатов – Приложение к КУП) и то же самое происходит и со значением виброскорости двигателя.

Для расчёта в расчёт а2 и b2 входит Fэкв, т.е величина *Vд* зависит от значений е1 и е2.

**2 Оценка технического состояния газотурбинного двигателя**

Исходные данные:

- нормальное распределение уровня вибрации исправного и дефектного двигателей;

- для исправного двигателя математическое ожидание уровня вибрации m1, среднеквадратическое отклонение - 1;

- для неисправного двигателя математическое ожидание уровня вибрации m2, среднеквадратическое отклонение - 2;

- максимально допустимое значение ошибки первого рода A.

- замеренное значение уровня вибрации Vп.

Требуется сформулировать заключение об исправности двигателя и определить вероятность ошибки второго рода используя критерий Неймана– Пирсона.

Исходные данные выбираем по шифру (две последние цифры) - ХХ.

В расчётах, обозначения m1 и m2 обозначены как V1 и V2 соответственно.

2.1 Определим аргумент функции Лапласа по её значению (соответствует значению А = 0,05):

Используя критерий Неймана-Пирсона, определим критическое значение параметра V0 и вероятность ошибки второго рода (Q2).

Используем для нахождения критического значения V0 данные по исправному двигателю: определяем Q1.

2.2 Из таблицы 2.1 значений функции Лапласа, для определенной величины значения функции F(x) = 0,955 найдём соответствующее значение аргумента, он равен 1,7.

Тогда (V0 - 15,2) / 2,8 = 1,7 и V0 = 1,7 · 2,8 + 15,2 = 19,96.

Получен критический уровень параметра вибрации (V0 = 19,96).

2.3. Вычисляем аргумент функции Лапласа для определения Q2, для этого воспользуемся формулой оценки Q2 – вероятности ошибки второго рода:

- определили из таблицы 2.1.

**ВЫВОД по разделу 2**

Таким образом, фактическое значение контролируемого диагностического параметра (Vn = 21) превышает расчетное значение критического (V0 = 19,96), поэтому делается вывод, что ГТД неисправен, а оценка вероятности ошибки второго рода равна Q2 = 0,069.

Приложение к КУП

Исходные данные и полученные результаты

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Исходные данные | | | | | | | | | | | | | |
| D | d | fp | M | M*д* | С1 | С2 | а | b | β | β*д* | С*д* | е1 | е2 |
| м | м |  | кг | кг |  |  | м | м |  |  |  | м | м |
| 0,08 | 0,04 | 40 | 400 | 2500 |  |  | 0,3 | 0,3 | 2,6 | 2,0 |  |  |  |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Расчётные данные | | | | | | | | | |
| С | *f0* | ω | ω2 | R | R*д* | R+ R*д* | C2 | R2ω2 | R2 |
| 5,434·106 | 18,5 | 251,2 | 63,1·103 | 2080 | 10000 | 12080 | 29,5·1012 | 0,273·1012 | 4,33·106 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| а0 | b0 | a1(e1) | a2(e1) | Fэкв(е1) | Fэкв(е2) |
| 35043·106 | -555,7·1012 | -143,7·109 | 5,49·109 | 1009,6 | 10096 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| b1(e1) | b2(e1) | a1(e2) | a2(e2) | b1(e2) | b2(e2) |
| 3064·109 | 0,528·109 | 1437·109 | 54,9·109 | 30640·109 | 5,28·109 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| X (e1) | X (e2) | X*д* (e1) | X*д* (e2) | V (e1) | V (e2) |
| 0,0884·10-3 | 0,884·10-3 | 0,158·10-3 | 1,58·10-3 |  |  |

Печатается в авторской редакции

Подписано к печати 12. 04. 2019. Формат бумаги 60х90 .

Тираж 200. Уч.-изд.л.2,6. Усл.печ.л.2,75. Заказ 374 С 36

Тип. Университета ГА. 196210. С.-Петербург, ул. Пилотов, дом 38.