

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА**

---

# **ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВИБРОГРАММ**

**Утверждено редакционным  
советом института  
в качестве методических указаний  
к лабораторной работе**

Изложены методы графоаналитической обработки записей колебаний различной сложности на фото- и кинолентке. Приведен оригинальный метод обработки вибрации двухроторных ГТД на основе разработанного альбома синтезированных кривых. Изложенные методы применимы к колебаниям любой физической природы.

Методические указания предназначены для студентов специальности 0537 при изучении курса «Динамика и прочность двигателей летательных аппаратов» и могут использоваться студентами специальности 0538 при изучении аналогичного курса.

Автор-составитель М. К. Сидоренко

Под редакцией проф. А. И. Белоусова

Рецензенты: Е. В. Сундуков, А. Г. Гимадиев

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Цель работы:** Освоение графоаналитических методов спектрального анализа виброграмм, т. е. методов определения амплитуд и частот гармоник сложной вибрации с помощью простейших приспособлений: измерителя, карандаша и логарифмической линейки (счетной машинки).

Виброграмма, т. е. запись какого-либо вибрационного (колебательного) процесса на фото- или киноплёнке, является носителем вибрационной информации об объекте — источнике данного вибрационного процесса.

Под обработкой виброграмм понимается определение различных параметров зарегистрированных колебаний. Целью обработки является извлечение полезной информации, заключенной в записях вибрационных процессов, например механической вибрации. Полезная информация содержится в значениях амплитуд, частот и фаз каждой гармонической составляющей (гармоник) сложной вибрации, в пиковых (максимальных), средних квадратических или средних значениях модуля вибрации, в отношении частот вибрации к частотам рабочих процессов в двигателе и т. п.

На виброграмме одновременно записываются несколько кривых вибраций (от 1 до 72, обычно 34) и несколько вспомогательных процессов, например, метки времени, метки частот вращения роторов двигателя и пр. Например, на рис. 1 показана запись вибрации двухроторного двигателя. Датчики вибрации устанавливались на корпусе двигателя в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

Графоаналитический метод спектрального анализа иногда называют ручной обработкой в отличие от машинной обработки, выполняемой с помощью специализированных устройств—анализаторов спектра частот, корреляторов и т. п. В зависимости от степени сложности обрабатываемой кривой применяются: метод непосредственного измерения параметров гармонических кривых; метод огибающих сложных кривых; метод сравнения двухкомпонентных кривых по альбому типовых виброграмм.

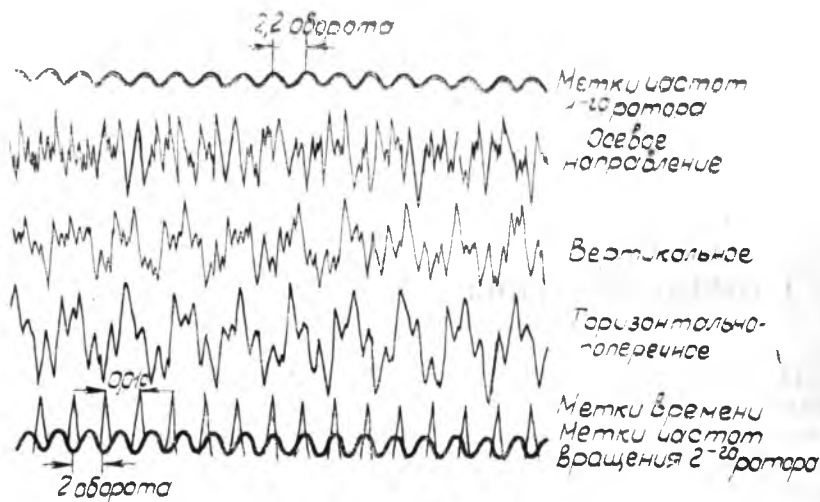


Рис. 1

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ

Простейшая форма вибрации — гармоническая:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(2\pi ft + \varphi). \quad (1)$$

Она определяется двумя параметрами: амплитудой  $A$  и частотой  $f$ , связанной с угловой частотой  $\omega$  и периодом колебаний  $T$  соотношениями

$$f = \omega / 2\pi = 1 / T.$$

Начальная фаза  $\varphi$  отдельной гармоники обычно не представляет интереса и в формуле (1) может быть опущена.

Амплитуда вибрации определяется практически как половина размаха кривой  $H = 2A$  (рис. 2), поскольку на виброграмме отсутствует запись средней линии. Проводится линия, касающаяся с на-

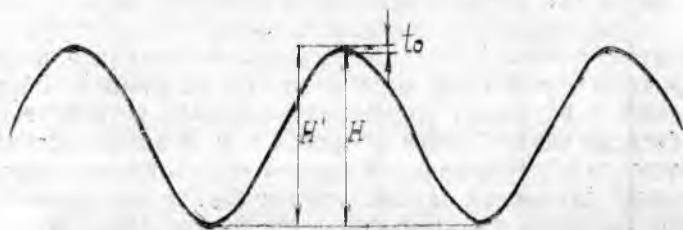


Рис. 2

ружной стороны вершин или впадин кривой, и измеряется отрезок  $H$  или  $H'$ .

Амплитуда вычисляется по формуле

$$A = \frac{H' - t_0}{2} = \frac{H}{2},$$

где  $t_0$  — толщина кривой в экстремальных точках.

Толщина кривой переменная, зависит от скорости движения светового луча по фотобумаге (от экспозиции). В экстремальных точках скорость движения луча минимальна, толщина кривой максимальна и равна толщине записи при отсутствии вибрации (толщине «нулевой» линии при отсутствии колебаний светового луча).

Истинное значение амплитуды вибрации определяется с учетом масштаба записи и вида записанной колебательной величины (виброперемещение  $s(t)$ , виброскорость  $v(t)$  или виброускорение  $w(t)$ ). Масштаб записи  $M$  определяется при тарировке виброизмерительной аппаратуры как отношение амплитуды записи на фотоленте  $A_{\text{зап}}$  в мм зап к амплитуде вибрации, выраженной в соответствующих физических единицах:

$$M_s = \frac{A_{\text{зап}}}{S}, \frac{\text{мм зап}}{\text{мм}}; \quad M_v = \frac{A_{\text{зап}}}{V}, \frac{\text{мм зап}}{\text{мм/с}}; \quad M_w = \frac{A_{\text{зап}}}{W}, \frac{\text{мм зап}}{\text{м/с}^2}.$$

Соответственно истинная амплитуда вибрации вычисляется по формулам

$$S = \frac{A_{\text{зап}}}{M_s}, \text{ мм}; \quad V = \frac{A_{\text{зап}}}{M_v}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}; \quad W = \frac{A_{\text{зап}}}{M_w}, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \quad (2)$$

Погрешность измерения амплитуды вибрации при обработке определяется, в основном, погрешностью измерения размаха кривой  $H$ . Экспериментально установлено, что распределение вероятностей этой погрешности подчиняется нормальному закону, абсолютная величина ее приблизительно постоянна и не зависит от частоты и масштаба записи вибрации. Погрешность определяется диаметром светового луча на фотобумаге и резкостью фотозаписи. Ее предельное значение, равное трем среднеквадратическим значениям  $\sigma_A$ , составляет  $\Delta H_{\text{пред}} = 0,6$  мм. Соответственно относительная предельная погрешность измерения амплитуды в процентах

$$\gamma_A = 100 \frac{\Delta H_{\text{пред}}}{H} = \frac{30}{A}.$$

Достаточно малая погрешность  $\gamma_A = 3\%$  обеспечивается при  $A_{\text{зап}} = 10$  мм. Среднеквадратическое значение погрешности в  $\%$

$$\sigma_A = \frac{\gamma_A}{3} = \frac{10}{A}.$$

Для уменьшения относительной погрешности необходимо увеличивать амплитуду записи (путем увеличения масштаба записи).

С этой целью при обработке записей на киноленте обычно применяют дешифраторы, обеспечивающие увеличение фотозаписи в  $D = 5 \dots 20$  раз. При обработке на дешифраторах масштабы записи, полученные при тарировке, необходимо увеличить в  $D$  раз:

$$M_{\text{деши}} = D M,$$

где  $D$  — степень увеличения дешифратора.

Частота вибрации  $f_v$  в Гц определяется путем сравнения периода (на виброграмме) измеряемой вибрации  $T_v$  с периодом меток времени  $T_f$  (рис. 3):

$$f_v = \frac{T_f}{T_v} \cdot f_0,$$

где  $f_0$  — частота меток времени.

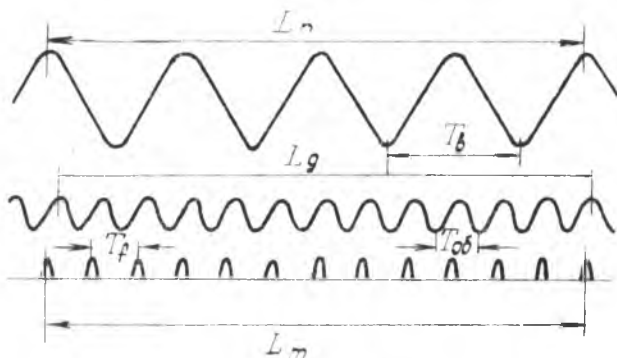


Рис. 3

Точность измерения частоты определяется точностью измерения отрезков  $T_v$  и  $T_f$ . Для повышения точности измеряют длину нескольких периодов. Тогда

$$f_v = \frac{L_m/m}{L_n/n} f_0,$$

где  $L_m$  — длина  $m$  периодов меток времени;  $L_n$  — длина  $n$  периодов вибрации.

Дополнительным существенным источником погрешностей является неравномерность протяжки фотоленты. Эта погрешность резко уменьшается, если принять  $L_n \approx L_m$ , измерения проводить в середине виброграммы, где неравномерность протяжки минимальна, и отрезки  $L_n$  и  $L_m$  выбирать друг под другом (по вертикали).

Предельное значение погрешности приближенно определяется формулой

$$\gamma_f = 100 \sqrt{\left[ \frac{(\Delta L_m)_{\text{пред}}}{L_m} \right]^2 + \left[ \frac{(\Delta L_n)_{\text{пред}}}{L_n} \right]^2}.$$

Полагая  $(\Delta L_n)_{\text{пред}} = (\Delta L_m)_{\text{пред}} = 1 \text{ мм}$ ,

$$L_n = L_f = L,$$

получаем в %

$$\gamma_f = \frac{140}{L}.$$

Погрешность  $\gamma_f = 1\%$  обеспечивается при  $L \geq 140 \text{ мм}$ .

Источник вибрации определяется по порядку измеряемой гармоники. Порядок гармоники есть отношение частоты вибрации  $f_n$  к частоте вращения узла — источника вибрации, например ротора ГТД,  $f_{\text{вр}} = n_c$ :

$$k = \frac{f}{f_{\text{вр}}} = \frac{f}{n_c},$$

где  $n_c$  — число оборотов ротора в секунду.

Метод измерения порядка гармоники такой же, как измерения частоты, только вместо меток времени берут метки оборотов:

$$k = \frac{T_{\text{вр}}}{T_n} = \frac{L_q/q}{p L_n/n},$$

где  $p$  — число оборотов ротора в секунду, укладываемое в один период меток оборотов  $T_{\text{об}}$ .

### **3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ВИБРАЦИИ. МЕТОД ОГИБАЮЩИХ**

Вибрация авиадвигателей обычно многокомпонентная, так как является результатом линейного наложения нескольких гармонических составляющих (компонент). Ниже изложен один из распространенных графоаналитических методов анализа вибрации — метод огибающих, применительно к двухкомпонентной вибрации вида

$$x(t) = A_1 \sin 2\pi f_1 t + A_2 \sin (2\pi f_2 t + \varphi),$$

представляющей собой сумму двух гармоник с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , амплитудами  $A_1$  и  $A_2$  соответственно и разностью начальных фаз колебаний  $\varphi$ .

Суть метода заключается в графическом построении огибающих вибрации, позволяющих расчлнить ее на составляющие. Способ построения огибающих и дальнейший анализ существенно зависят от отношения частот компонент.

### 3.1. БОЛЬШОЕ ОТНОШЕНИЕ ЧАСТОТ ( $f_2 \gg f_1$ )

Виброграмма имеет вид, показанный на рис. 4. Верхняя и нижняя огибающие, проведенные по вершинам и впадинам кривой, воспроизводят низкочастотную компоненту. Обе огибающие синфазны и представляют собой гармоническое колебание с амплитудой  $A_1$  и частотой  $f_1$ . Расстояние по вертикали между огибающими равно двойной амплитуде высокочастотной составляющей  $2A_2$ . Частоты колебаний определяются изложенным выше методом по указанному на рис. 4 периоду колебаний  $T_1$  и меткам времени на виброграмме, которые на рис. 4 не показаны.

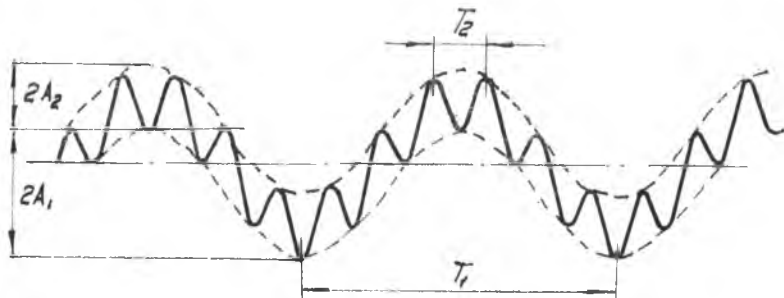


Рис. 4

дой  $A_1$  и частотой  $f_1$ . Расстояние по вертикали между огибающими равно двойной амплитуде высокочастотной составляющей  $2A_2$ . Частоты колебаний определяются изложенным выше методом по указанному на рис. 4 периоду колебаний  $T_1$  и меткам времени на виброграмме, которые на рис. 4 не показаны.

### 3.2. МАЛОЕ ОТНОШЕНИЕ ЧАСТОТ ( $f_2 \approx f_1$ )

При близких частотах компонента вибрация имеет вид биений, характеризующихся периодическим увеличением и уменьшением размаха колебаний с периодом биений  $T_6$  (рис. 5). Верхняя и нижняя огибающие несинусоидальны и являются зеркальным отображением друг друга. Максимальная ширина полосы между огибающими называется горбом, минимальная — талией.

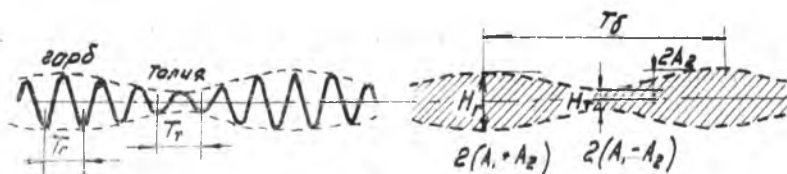


Рис. 5

Такой вид кривой обусловлен медленным изменением разности фаз двух синусоид с близкими частотами. В горбе синусоиды на-



ходятся (временно) в фазе, амплитуды их складываются. Ширина полосы в горбе (размах колебаний)

$$H_r = 2 (A_1 + A_2) .$$

В талии синусоиды находятся в противофазе, амплитуды их вычитаются. При  $A_1 > A_2$

$$H_r = 2 (A_1 - A_2) .$$

Используя эти соотношения, получим:

$$H_r + H_r = 4 A_1; \quad H_r - H_r = 4 A_2 .$$

Отсюда находим амплитуды обеих компонент вибрации:

$$A_1 = \frac{H_r + H_r}{4}; \quad A_2 = \frac{H_r - H_r}{4} .$$

Частота главной компоненты (компоненты с большей амплитудой, в нашем случае  $A_1$ ) равна средней частоте за период биений:

$$f_{гл} = f_1 .$$

Частота второстепенной компоненты (с меньшей амплитудой  $A_2$ ) отличается от частоты главной на величину, определяемую периодом биений:

$$f_{вт} = f_2 = f_{гл} \pm \Delta f_6 ,$$

где  $\Delta f_6 = \frac{1}{T_6} = |f_1 - f_2|$  — частота биений.

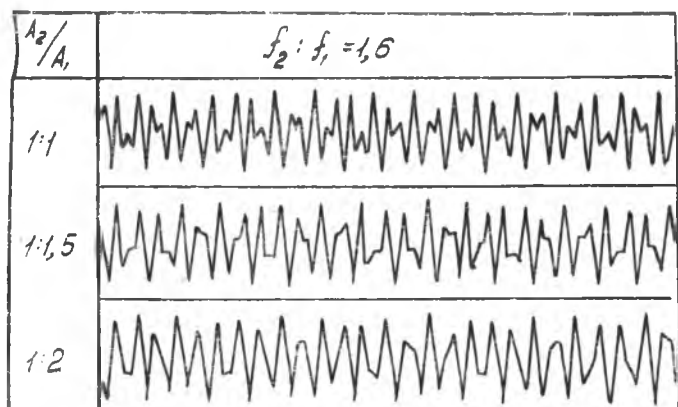
Знак «+» берется в случае, когда период кривой в горбе меньше, чем в талии ( $T_r < T_r$ ), знак «-» берется при обратном соотношении ( $T_r > T_r$ ).

#### 4. МЕТОД ВИЗУАЛЬНОГО СРАВНЕНИЯ ВИБРОГРАММ

При промежуточном отношении частот двухкомпонентных кривых  $f_2/f_1 = 1,25...2,5$  их форма становится сложной (рис. 6), а метод отгибающих — практически неприменим. Между тем именно такие виброграммы характерны для современных двухроторных ГТД.

Для обработки виброграмм с промежуточным отношением частот компонент применяется специальный метод с использованием альбома типовых двухкомпонентных кривых (см. приложение). Альбом включает 14 листов синтезированных кривых. Каждый лист содержит 9 кривых с одинаковым отношением частот и различным отношением амплитуд компонент  $A_2/A_1$  — от 4:1 до 1:4.

Сущность метода сравнения заключается в определении отношения амплитуд компонент путем визуального сравнения формы записанной виброграммы с синтезированными кривыми и в вычислении амплитуд путем измерения одной характерной ординаты анализируемой кривой.



Р и с. 6

Анализ проводится следующим способом:

1. Определяют обычным способом частоты компонент и находят их отношение.

Если вибрация возбуждена роторами, то отношение частот вибрации равно отношению частот вращения роторов:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

2. В альбоме находят лист с равным или близким отношением частот. Путем сравнения записанной виброграммы с кривыми этого листа находят кривую с такой же или близкой формой. Отношение амплитуд этой кривой принимается за отношение амплитуд анализируемой виброграммы.

При сравнении форм кривых необходимо учитывать различие масштабов записи синтезированной и анализируемой кривой. Масштабы записи следует выбирать так, чтобы записанные виброграммы были близки по форме к соответствующим кривым альбома. При сравнении особое внимание надо обращать на характерные детали кривых.

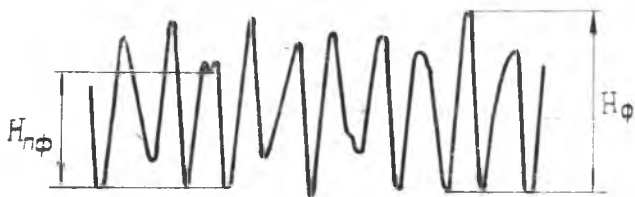
3. Амплитуда одной из компонент определяется путем измерения характерной ординаты анализируемой виброграммы. Измерение производится либо в «момент фазы», когда мгновенное значение кривой равно сумме амплитуд компонент

$$x(t_\phi) = A_1 + A_2,$$

либо в момент «противофазы», когда мгновенное значение кривой равно разности амплитуд компонент

$$x(t_{\text{пф}}) = |A_1 - A_2|,$$

В один из этих характерных моментов измеряется размах кривой  $H_{\Phi}$  или  $H_{\text{пф}}$  (рис. 7).



Р и с. 7

Если отношение амплитуд больше или равно единице, то измеряется размах в фазе  $H_{\Phi}$ , который несколько больше размаха (удвоенной амплитуды) высокочастотной компоненты. Если отношение амплитуд меньше или равно единице, то измеряется размах в противофазе  $H_{\text{пф}}$ , который несколько меньше размаха низкочастотной компоненты.

Действительные значения амплитуд соответствующей компоненты на виброграмме определяют по формулам

$$A_1 = \frac{H_{\text{пф}}}{2} \eta_{\text{пф}}; \quad A_2 = \frac{H_{\Phi}}{2} \eta_{\Phi}. \quad (3)$$

Поправочные коэффициенты проставлены в альбоме справа от соответствующих кривых: коэффициент  $\eta_{\Phi}$  при  $A_2/A_1 > 1$  и коэффициент  $\eta_{\text{пф}}$  при  $A_2/A_1 < 1$ . Для отношения амплитуд  $A_2/A_1 = 1$  проставлены два коэффициента — в числителе  $\eta_{\Phi}$ , в знаменателе  $\eta_{\text{пф}}$ .

По известному отношению амплитуд данной кривой альбома и действительному значению одной из них вычисляют значение другой амплитуды по виброграмме:

$$A_1 = \frac{A_2}{(A_2/A_1)_{\text{альб}}} \quad \text{или} \quad A_2 = A_1 (A_2/A_1)_{\text{альб}}. \quad (4)$$

Физическое значение амплитуд вибрации определяют с учетом масштаба записи виброграммы по формуле (2).

Отыскание характерных моментов фазы и противофазы облегчается тем, что кривые симметричны относительно этих моментов времени. Формы кривых в эти моменты видны из соответствующих кривых альбома.

Реальные кривые вибрации сложнее приведенных в альбоме вследствие некоторой нестабильности вибрации и наличия слабых дополнительных компонент. Иногда на записанном отрезке кривой нет характерных моментов фаз или противофаз. В этих случаях с некоторой погрешностью проводят измерение в близкие к ним моменты времени.

Во всех случаях рекомендуется производить не менее трех измерений на записанном отрезке виброграммы и результаты арифметически осреднять.

Пример. Пусть анализируемая виброграмма соответствует кривой с отношением частот 1,6 : 1 и отношением амплитуд 1 : 2. Измеряем характерную ординату  $H_{пф} = 10,6$  мм. По альбому находим поправочный коэффициент  $\eta_{пф} = 1,08$ . Вычисляем по формулам (3) и (4) амплитуды:

$$A_1 = \frac{10,6}{2} \cdot 1,08 = 5,73 \text{ мм};$$

$$A_2 = 5,73 \cdot \frac{1}{2} = 2,865 \text{ мм}.$$

Погрешность вычисления амплитуд определяется в основном ошибочным выбором соответствующей кривой в альбоме и дискретностью отношений амплитуд представленных в альбоме кривых.

Если ошибочно выбрана смежная кривая (с отношением амплитуд 1 : 1,5 или 1 : 3), то при вычислении будут использованы ошибочные поправочные коэффициенты  $\eta_{пф} = 1,11$  или 1,08 и ошибочное отношение амплитуд 1 : 1,5 или 1 : 3 соответственно. При этом погрешность вычисления амплитуды главной компоненты составит +3 или 0 %, а второстепенной +36 или —33 %.

При необходимости с помощью альбома можно контролировать правильность выбора кривой, если вычисления амплитуд обеих компонент проводить по формуле (3), используя оба поправочных коэффициента  $\eta_{пф}$  и  $\eta_{ф}$  для выбранной кривой (в прилагаемом альбоме второй коэффициент не указан). Сравнивая отношение вычисленных амплитуд с указанным в альбоме возле выбранной кривой, можно путем последовательных приближений минимизировать погрешность вычисления амплитуд.

Остаточная погрешность будет определяться лишь дискретностью отношений амплитуд синтезированных кривых. Так, при истинном отношении амплитуд 1 : 2,5 будет выбрана кривая с отношением 1 : 2 или 1 : 3. Погрешность вычисления амплитуд главной и второстепенной компонент составит 0 и —16,5% соответственно, что практически приемлемо. Методом огибающих не удастся столь просто и с достаточной точностью определить амплитуды двухкомпонентных кривых с промежуточным отношением частот.

Следует отметить, что анализ с помощью альбома синтезированных кривых одновременно является эффективным способом обучения. С помощью альбома преодолевается тенденция к занижению амплитуды высокочастотной составляющей при  $A_2/A_1 \ll 1$ . Эту тенденцию легко обнаружить у каждого исполнителя при попытке оценить «на глаз» отношение амплитуд кривых на нижней половине листов альбома, например, при отношении частот 1,6 : 1. Альбом позволяет также исключить ошибки, связанные с кажущейся

щейся низкочастотной волной (см. лист альбома с отношением частот 1,8 : 1, кривая с отношением амплитуд 1 : 3). Видимая низкочастотная компонента в действительности отсутствует, кривая содержит лишь две гармоники с отношением частот 1,8:1. Кажущаяся волна есть результат плавного изменения фаз (см. отношение амплитуд 1 : 2 на том же листе альбома).

## **5. ЗАМЕЧАНИЯ ОБ АНАЛИЗЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВИБРОГРАММ**

Рассмотренные методы обработки виброграмм успешно применяются при числе компонент не более 2—3. При более сложной вибрации необходимо сочетание рассмотренных методов с методом электрической фильтрации сигналов. Сложная вибрация разделяется с помощью электрических частотных фильтров на несколько более простых кривых, содержащих 2—3 компоненты. Эти кривые последовательно анализируются рассмотренными методами. Однако более эффективным при анализе многокомпонентной вибрации является аппаратный спектральный анализ.

## **6. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с содержанием работы.
2. Получить разрешение лаборанта на включение дешифратора.
3. Скопировать на дешифраторе заданную виброграмму.
4. Провести обработку виброграммы (определить частоты и амплитуды компонент, а также порядок гармоник) и ее анализ (определить роторы — источники соответствующих гармоник вибрации).

## **7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие данные.

1. Копию виброграммы с нанесенными огибающими.
2. Краткое описание примененного метода обработки и расчетные формулы.
3. Результаты обработки и анализ в виде табл. 1 (заполнено примерными данными).

Т а б л и ц а 1

Компоненты	Параметры					Источник
	$f$ , Гц	$A_{\text{зап}}$ , мм зап	$A_v$ , мм/с	$n_c$ , об/с	$k$	
Первая	90	12	31	88	1,02	Ротор НД
Вторая	125	7	18	190	0,96	Ротор ВД

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков порядок погрешностей измерения амплитуд и частот гармонических колебаний?

2. Как определяется масштаб записи виброграммы?

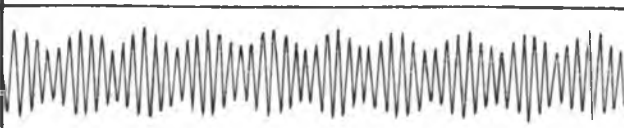



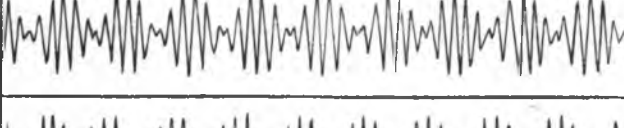
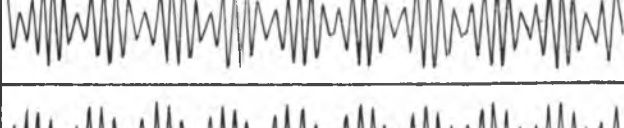
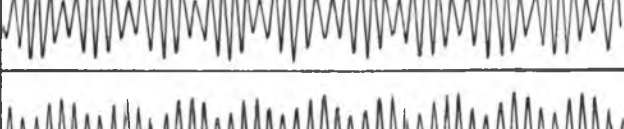
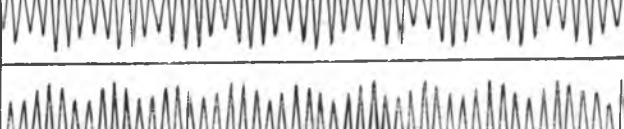

3. Какими параметрами характеризуются биения? Как определяется частота главной компоненты?





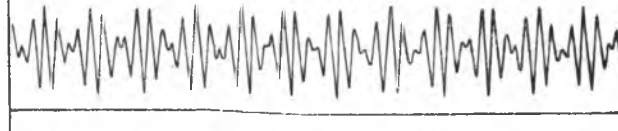
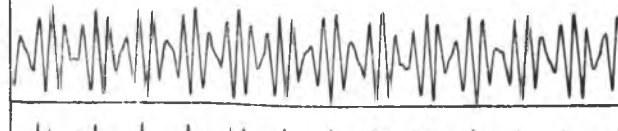
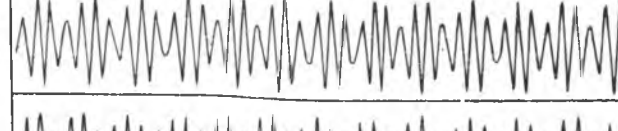
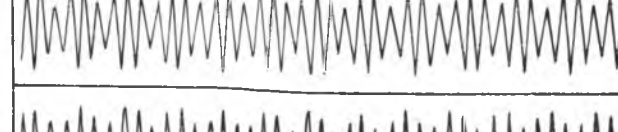

4. Чем отличаются огибающие двухкомпонентных кривых с большим отношением частот и биений?

5. В чем сущность метода визуального сравнения виброграмм с промежуточным отношением частот?

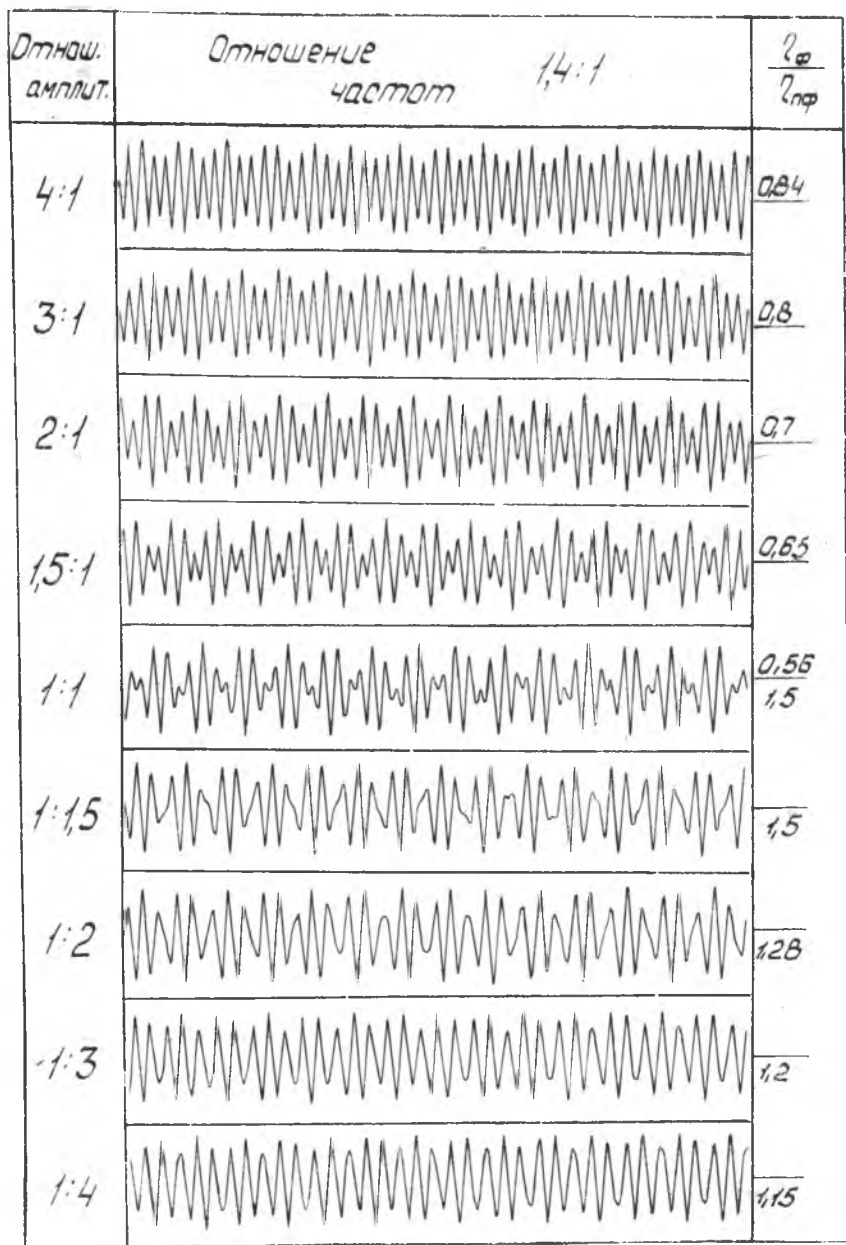
6. Почему непрерывно изменяется форма двухкомпонентных кривых с некратными частотами?

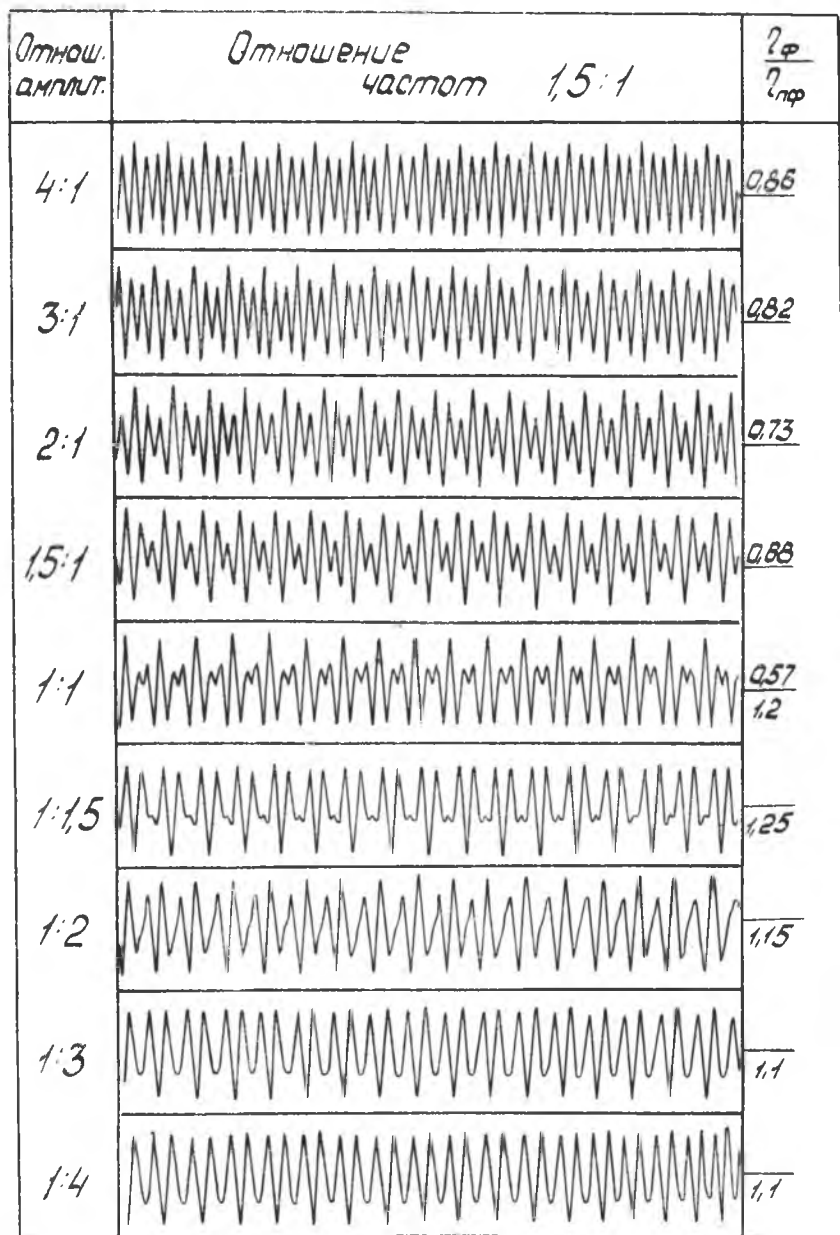
7. Как определить «момент фазы» и «момент противофазы» двухкомпонентной кривой с некратным отношением частот?

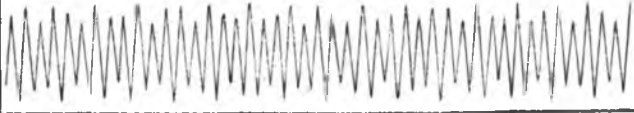
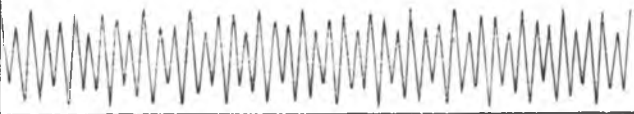


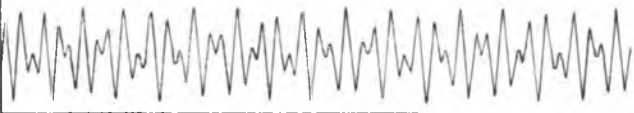

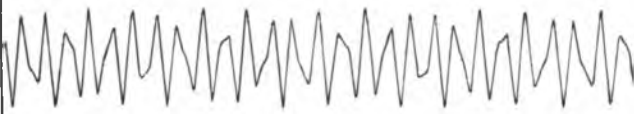
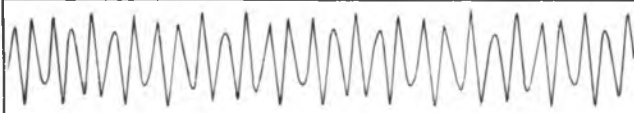
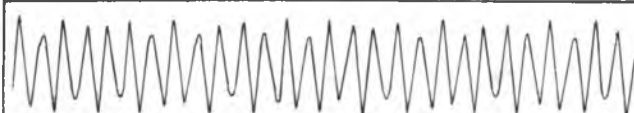
Отнош. амплит.	Отношение частот $1,2:1$	$\frac{f_{\phi}}{f_{\text{пр}}}$
4:1		<u>0,83</u>
3:1		<u>0,79</u>
2:1		<u>0,7</u>
1,5:1		<u>0,66</u>
1:1		<u><math>\frac{0,55}{2}</math></u>
1:1,5		<u>2</u>
1:2		<u>1,5</u>
1:3		<u>1,34</u>
1:4		<u>1,25</u>

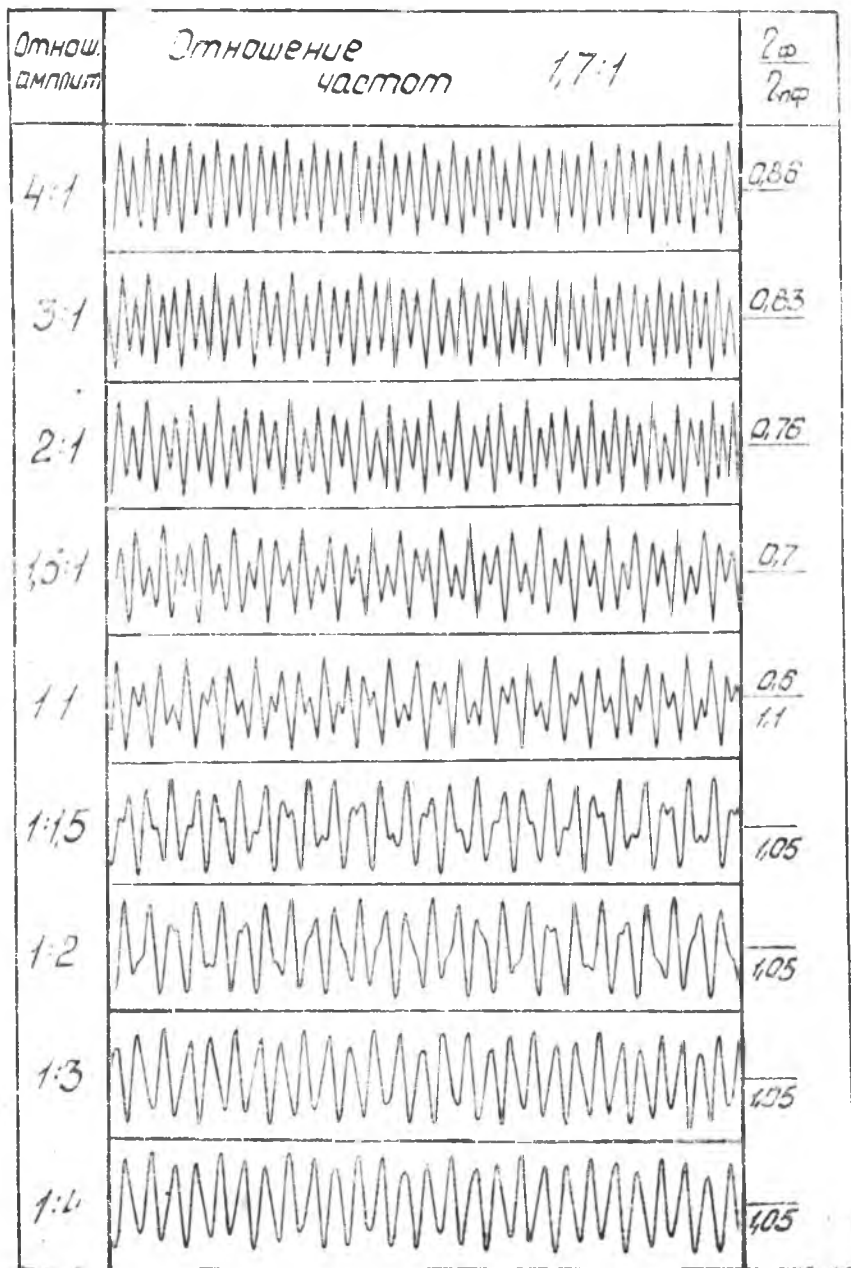
Отнош. амплит.	Отношение частот 1,3:1	$\frac{f_{\phi}}{f_{\text{пр}}}$
4:1		0,84
3:1		0,8
2:1		0,7
15:1		0,54
1:1		0,55 1,60
1:1,5		1,60
1:2		1,33
1:3		1,27
1:4		1,21

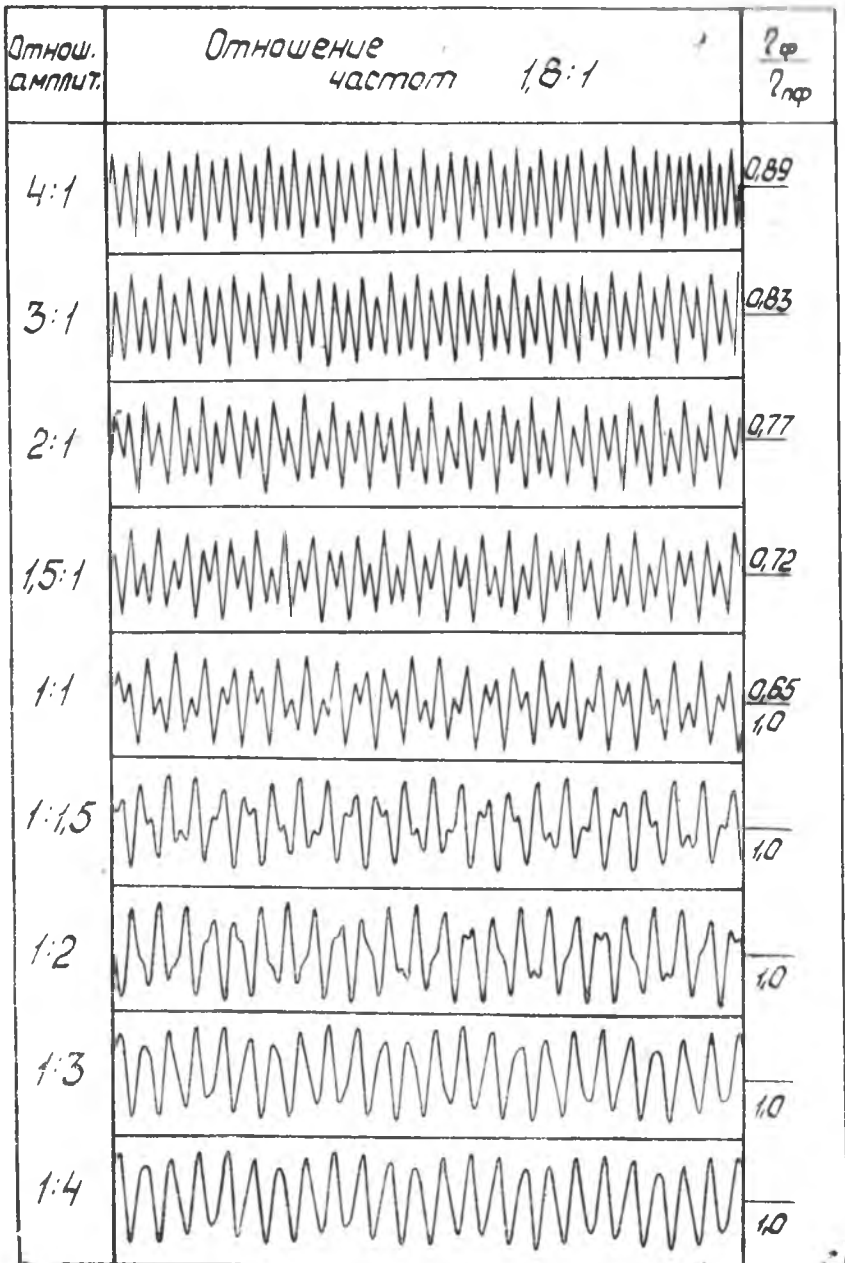


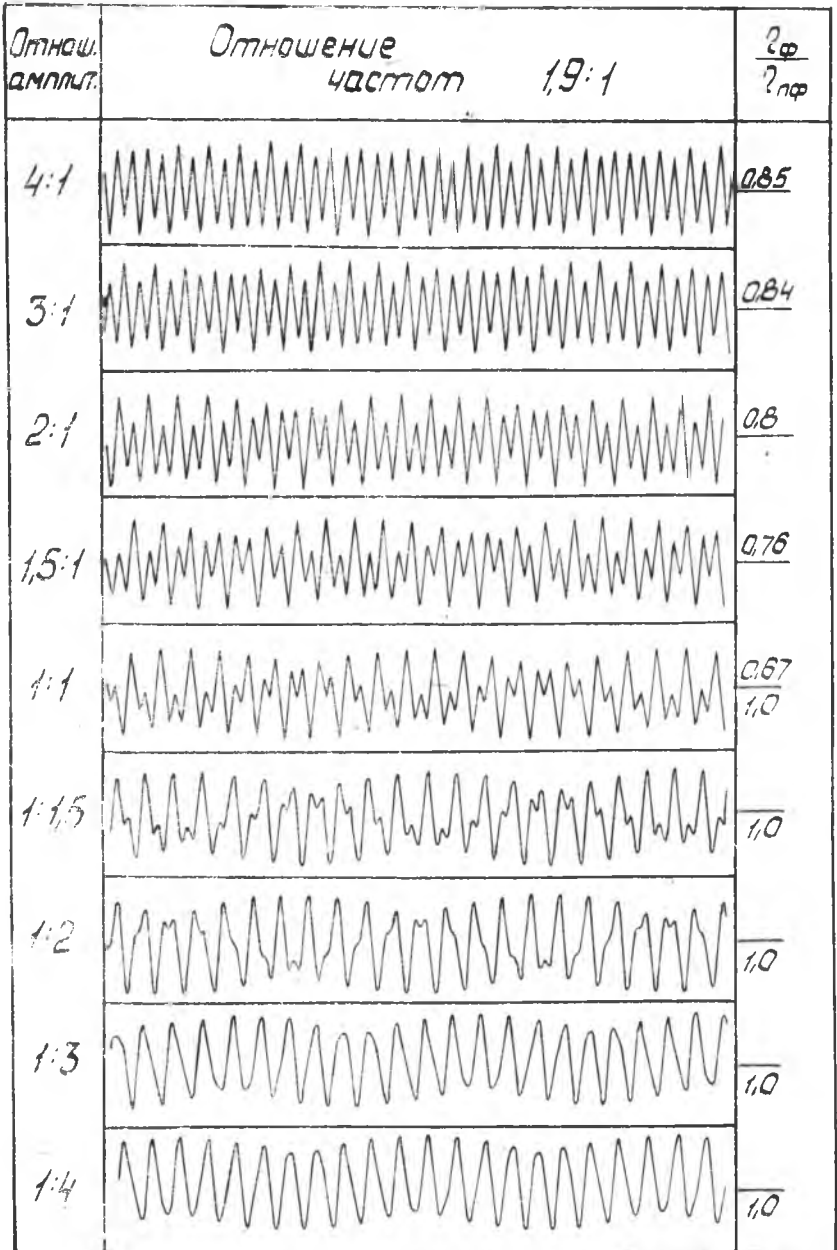


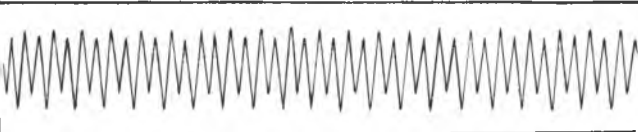
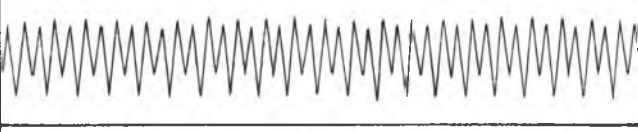
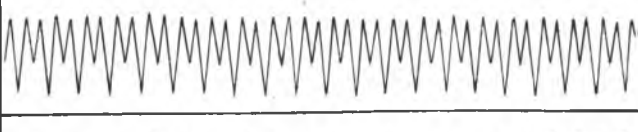
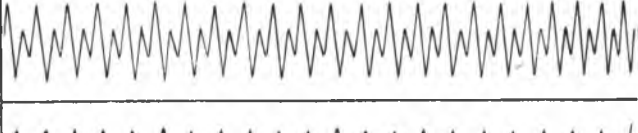
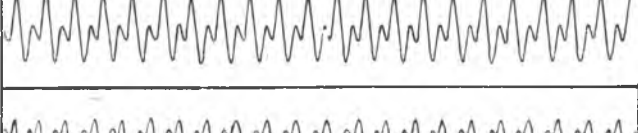

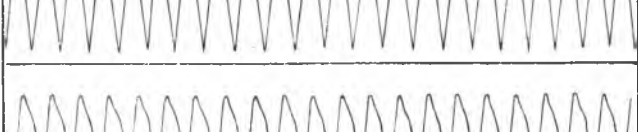

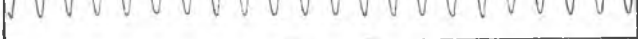


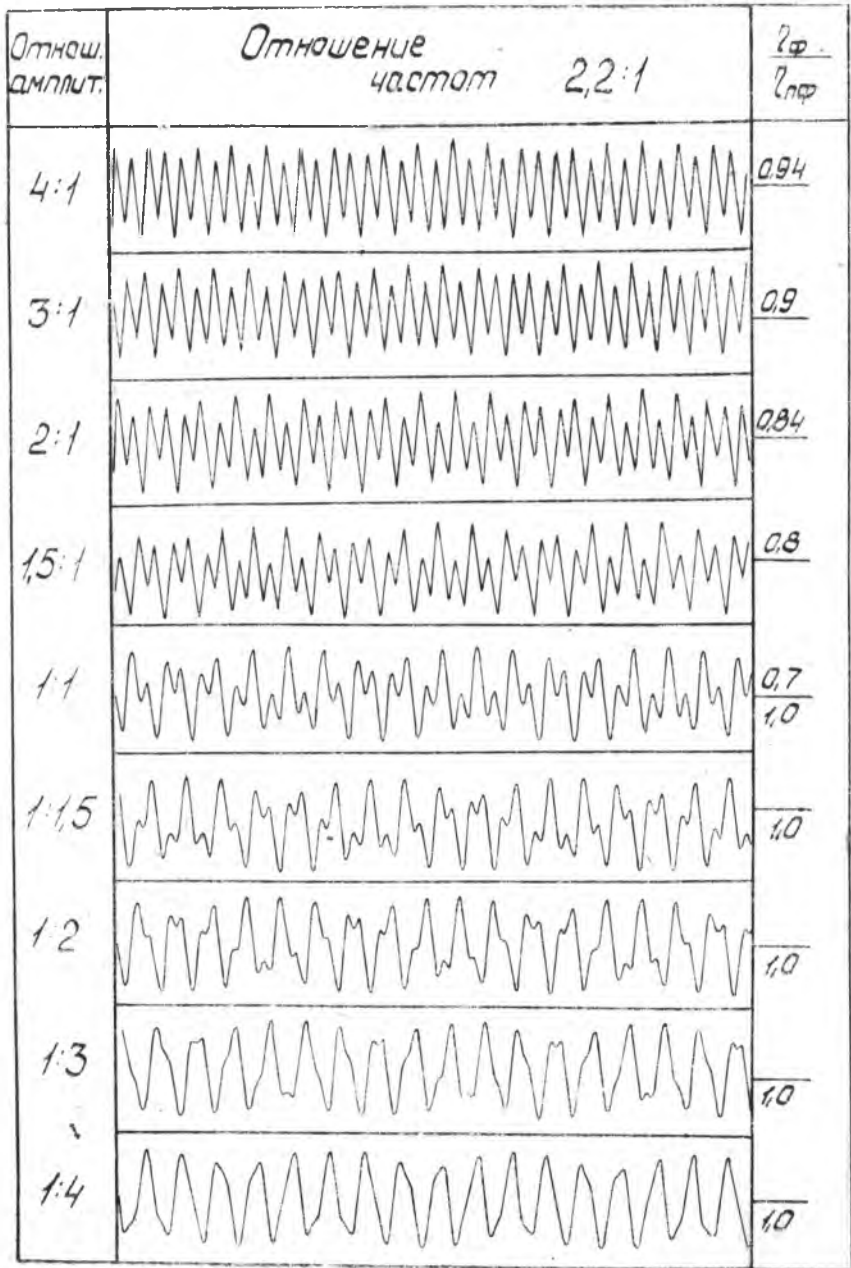
Отнош. амплит.	Отношение частот $1,6:1$	$\frac{2\varphi}{2\varphi}$
4:1		<u>0,85</u>
3:1		<u>0,85</u>
2:1		<u>0,75</u>
15:1		<u>0,7</u>
1:1		<u>0,6</u> <u>1,15</u>
1:1,5		<u>1,15</u>
1:2		<u>1,08</u>
1:3		<u>1,08</u>
1:1		<u>1,08</u>





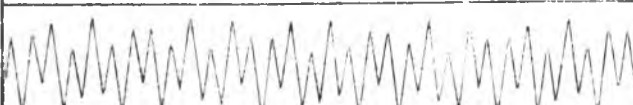

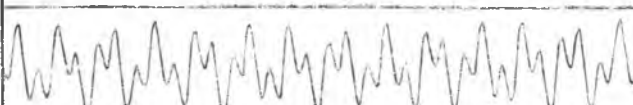

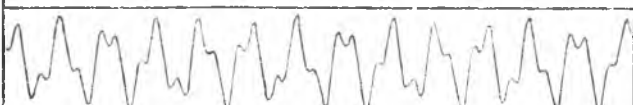

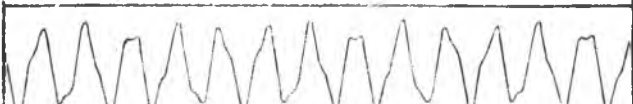


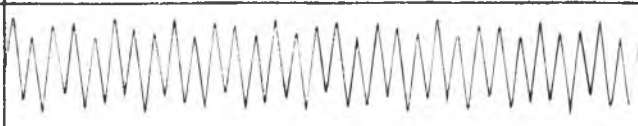
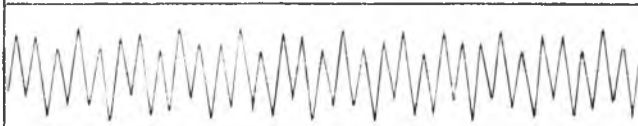
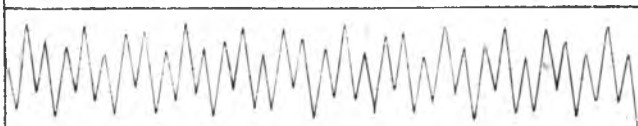
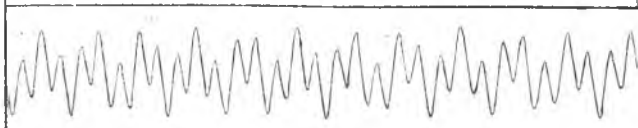

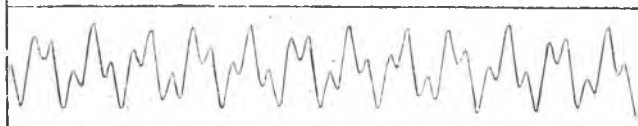
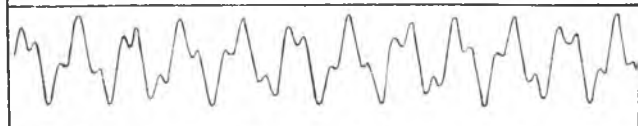
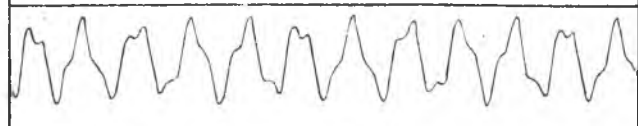



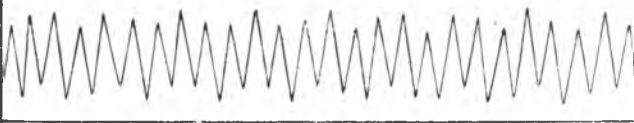
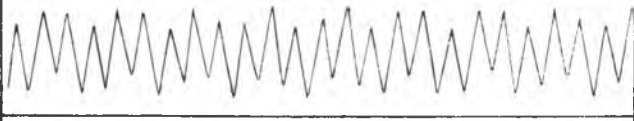
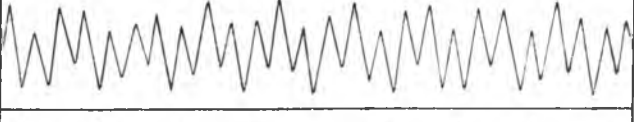
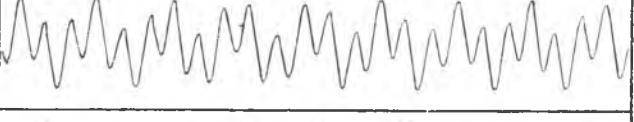



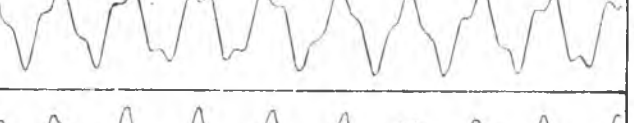

Отнош. амплит.	Отношение частот 2:1	$\frac{z_{\phi}}{z_{\text{лф}}}$
4:1		0,85
3:1		0,84
2:1		0,8
1,5:1		0,74
1:1		$\frac{0,85}{1,0}$
1:1,5		1,0
1:2		1,0
1:3		1,0
1:4		1,0

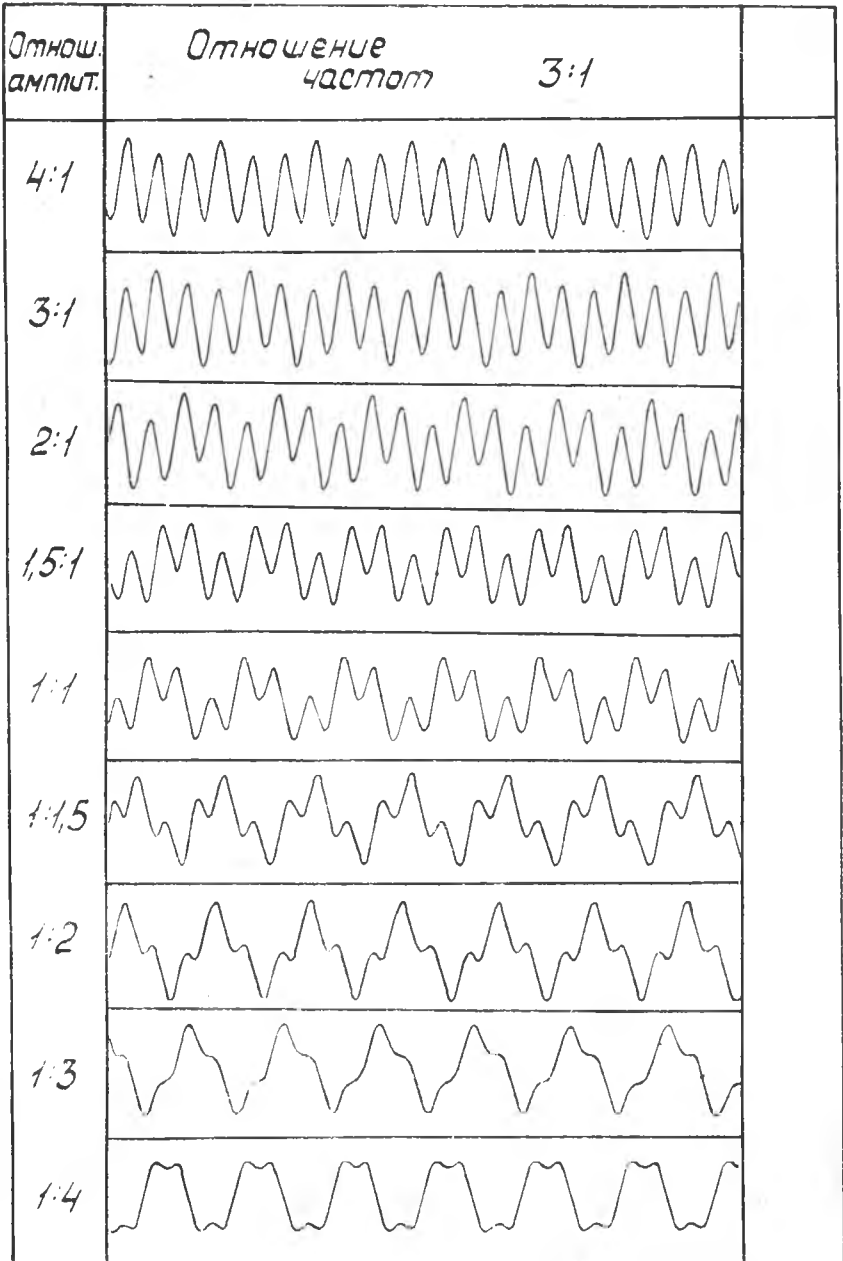




Отнош. амплит	Отношение частот $2,4:1$	$\frac{2\varphi}{2\pi}$
4:1		$0,91$
3:1		$0,9$
2:1		$0,87$
1,5:1		$0,82$
1:1		$\frac{0,72}{1,25}$
1:1,5		$1,1$
1:2		$1,0$
1:3		$1,05$
1:4		$1,95$

Отнош. амплит.	Отношение частот <i>2,6:1</i>	$\frac{2\varphi}{2\pi p}$
4:1		<u>0,94</u>
3:1		<u>0,88</u>
2:1		<u>0,85</u>
1,5:1		<u>0,82</u>
1:1		<u>0,74</u> 1,2
1:1,5		<u>1,15</u>
1:2		<u>1,1</u>
1:3		<u>1,1</u>
1:4		<u>1,1</u>

Отнош. амплит.	Отношение частот $2,8:1$	$\frac{2\varphi}{2\pi\varphi}$
4:1		0,94
3:1		0,91
2:1		0,86
1,5:1		0,84
1:1		0,77 1,2
1:1,5		1,2
1:2		1,15
1:3		1,15
1:4		1,15



Автор-составитель *Михаил Кириллович Сидоренко*

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВИБРОГРАММ

Редактор Т. К. Кретьникова  
Техн. редактор Н. М. Кащенко  
Корректор В. П. Петрова

Сдано в набор 23.06.84 г. Подписано в печать 21.09.84 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая  
Высокая печать. Литературная гарнитура.  
Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,65. Т. 500 экз.  
Заказ 611. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151

---

Типография УЭЗ Куйбышев, ул. Мьяновская, 18