



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ  
СОЮЗА ССР

---

НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ  
**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА  
НАГРУЖЕННОСТИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**  
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ О НАГРУЖЕННОСТИ  
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ГОСТ 23604—79

Издание официальное

Цена 15 коп.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ  
Москва

## **РАЗРАБОТАН**

**Государственным комитетом СССР по стандартам  
Министерством тракторного и сельскохозяйственного машиностроения  
Министерством автомобильной промышленности СССР  
Министерством тяжелого и транспортного машиностроения  
Министерством угольной промышленности СССР  
Министерством путей сообщения  
Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР**

## **ИСПОЛНИТЕЛИ**

**В. И. Перепонов**, канд. техн. наук; **Т. В. Горяистова**; **В. А. Трофимов**, канд. техн. наук; **Р. И. Бугло**, канд. техн. наук; **С. С. Дмитриченко**, д-р техн. наук; **М. Н. Седакин**, канд. техн. наук; **В. В. Никонов**, канд. техн. наук; **Н. Д. Чернова**; **В. Н. Захаров**; **Б. Г. Поликаренов**, канд. техн. наук; **А. Я. Найштут**, канд. техн. наук; **О. Ф. Трофимов**, канд. техн. наук; **Л. М. Аксенов**, канд. техн. наук; **Е. В. Спиридонов**, канд. техн. наук; **Е. И. Бурдасов**, канд. техн. наук; **В. И. Бочков**; **В. И. Суржик**; **Д. Т. Анкудинов**, канд. техн. наук; **Л. Г. Логвинский**; **А. И. Лепихов**, **С. В. Вершинский**, д-р техн. наук; **Ю. М. Черкашин**, канд. техн. наук; **Е. Б. Дидова**; **А. Н. Савоськин**, д-р техн. наук; **А. П. Матвеевичев**, канд. техн. наук; **А. Д. Пузанков**, канд. техн. наук; **О. Э. Шур**, канд. техн. наук; **М. В. Мурашов**, д-р техн. наук; **А. Г. Цуркан**, канд. техн. наук; **А. А. Головин**, канд. техн. наук; **О. А. Головина**

## **ВНЕСЕН Государственным комитетом СССР по стандартам**

Зам. председателя Госстандарта **В. В. Ткаченко**

**УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ** Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 апреля 1979 г. № 1574

Надежность в технике

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ МАШИН  
И МЕХАНИЗМОВ****Методы обработки данных о нагруженности.  
Общие положения**Reliability in technics. Statistical estimation of loading  
of machines and mechanisms. Methods for load date  
treatment. General principles**ГОСТ  
23604—79**

Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 апреля 1979 г. № 1571 срок введения установлен  
с 01.01.1980 г.

Настоящий стандарт устанавливает применяемые в науке, технике, производстве общие положения по обработке данных о нагруженности машин, механизмов и их элементов для получения оценок статистических характеристик нагруженности.

На основании настоящего стандарта допускается разрабатывать отраслевую нормативно-техническую документацию по методам обработки данных о нагруженности, отражающую специфические особенности обработки данных о нагруженности в отрасли.

Термины, применяемые в настоящем стандарте, и их определения приведены в рекомендуемом приложении 1.

**1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1.1. Обработка данных о нагруженности состоит из следующих основных этапов:  
определения структуры нагруженности;  
схематизации нагруженности;  
оценки статистических характеристик нагруженности.

1.2. Примеры обработки данных о нагруженности различными методами и средствами приведены в справочном приложении 2.

**2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТИ**

2.1. По характеру нагруженность подразделяют на:  
импульсную,  
непрерывную,  
ступенчатую,  
комбинированную.

2.2. По виду нагруженность подразделяют на:  
детерминированную,  
случайную,  
смешанную.

2.3. Случайную нагруженность подразделяют на:  
стационарную,  
эргодическую,  
широко- и узкополосную (см. ГОСТ 21878—76).

**3. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ**

3.1. Схематизацию нагруженности выполняют методами:  
непосредственной схематизации;  
с применением теории случайных процессов.

3.2. Применение метода схематизации нагруженности должно быть обосновано экспериментально или теоретически в зависимости от вида перехода в предельное состояние, структуры нагруженности и свойств машин и механизмов.

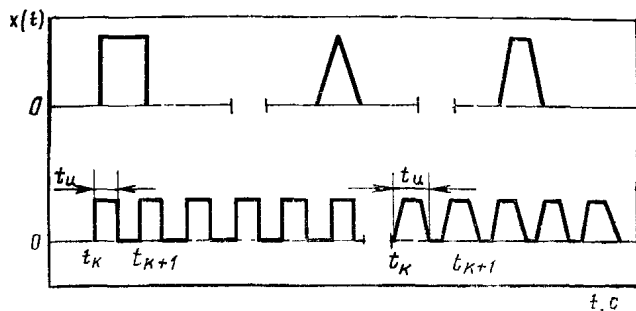
## 4. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ

4.1. Определение статистических характеристик нагруженности состоит из следующих этапов: вычисления оценок характеристик нагруженности с применением в зависимости от метода схематизации аппарата математической статистики или аппарата теории случайных процессов; оценки точности и достоверности полученных данных.

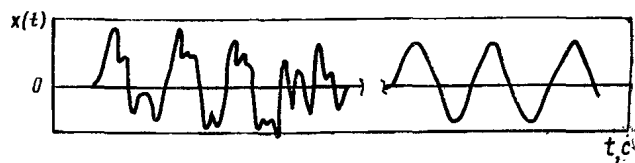
ПРИЛОЖЕНИЕ 1  
Рекомендуемое

Термины, применяемые в настоящем стандарте, и их определения

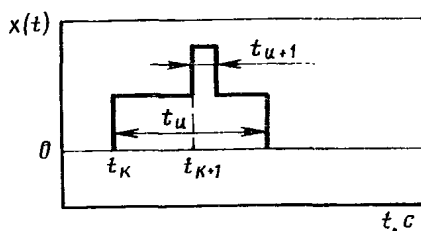
Термин	Определение	Примечание
1. Нагруженность	Состояние машин и механизмов, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования	
2. Схематизация нагруженности	Представление нагруженности в упрощенном виде для получения статистических характеристик нагруженности на основе определенных допущений, сделанных исходя из различных закономерностей перехода элементов машин и механизмов в какое-либо предельное состояние	
3. Непосредственная схематизация нагруженности	Представление нагруженности в виде упорядоченной последовательности значений нагруженности (мгновенных значений, размахов и др.)	
4. Метод непосредственной схематизации	Совокупность правил и допущений, позволяющих произвести непосредственную схематизацию	
5. Схематизация с применением теории случайных процессов	Представление нагруженности моделью случайного процесса	Выбор модели обуславливается видом перехода в какое-либо предельное состояние, структурой нагруженности и свойствами машин и механизмов
6. Импульсная нагруженность	Нагруженность, характеризуемая импульсной функцией времени, или последовательность импульсов, удовлетворяющая условию $t_{k+1} - t_k > t_u$ (черт. 1)	$t_u$ — продолжительность импульса, с; $t_k, t_{k+1}$ — моменты появления импульсов, с
7. Непрерывная нагруженность	Нагруженность, непрерывно изменяющаяся за бесконечный интервал времени (черт. 2)	
8. Ступенчатая нагруженность	Нагруженность, характеризуемая последовательностью ступенчатых функций времени или последовательностью импульсов, удовлетворяющей условию $t_{k+1} - t_k < t_u$ (черт. 3)	
9. Комбинированная нагруженность	Комбинация импульсной, непрерывной и ступенчатой нагруженности (черт. 4)	
10. Детерминированная нагруженность	Нагруженность, текущие значения которой известны с вероятностью, равной единице	
11. Случайная нагруженность	Нагруженность, текущие значения которой являются семейством скалярных или векторных случайных величин	
12. Дискретизация нагруженности по времени	Разбиение непрерывных значений нагруженности $x(t)$ на ряд дискретных значений $X(t_\lambda)$ , временное положение которых соответствует значениям $t_{\lambda+1} = t_\lambda + \Delta t, \lambda = 1, 2, \dots$	
13. Шаг дискретизации по времени	Интервал времени $\Delta t = t_{\lambda+1} - t_\lambda$ , разделяющий два соседних значения нагруженности $X(t_\lambda)$ и $X(t_{\lambda+1})$	
14. Структура нагруженности	Разделение нагруженности по виду и характеру	



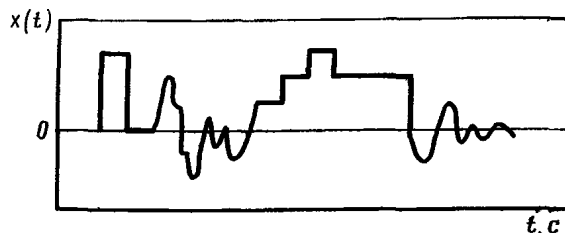
Черт. 1



Черт. 2



Черт. 3



Черт. 4

ПРИЛОЖЕНИЕ 2  
Справочное

## ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ О НАГРУЖЕННОСТИ

### Пример 1. Обработка данных о нагруженности методами непосредственной схематизации

Объект исследования — нагруженность в опасном сечении рамы овощной сеялки СО—4,2 (нормальные напряжения в вертикальной плоскости, возникающие при транспортном режиме, скорость 13,2 км/ч). Цель обработки данных — расчет характеристик усталостной долговечности и прочности рамы.

### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТИ

1.1. Характер нагруженности — непрерывный.

1.2. Вид нагруженности — случайный.

1.3. Нагруженность — стационарная. Стационарность нагруженности проверяли по методу серий. Число серий, равное 7, определено вычислением и находится в интервале (6,15), определенном на основании статистической гипотезы о независимости наблюдаемых значений при уровне значимости  $\alpha=0,05$ .

Нагруженность — узкополосная (отношение среднего числа экстремумов к среднему числу нулей  $MEN=1$ ).

На стадии предварительного анализа с применением аппарата теории случайных процессов вычисляют корреляционную функцию и спектральную плотность нагруженности. Эти характеристики вычисляют для определения эффективной частоты нагруженности и анализа процесса с точки зрения его широкополосности при выборе наиболее достоверного метода непосредственной схематизации.

### 2. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ

2.1. Предельное состояние рамы и структура ее нагруженности с учетом цели обработки данных позволяют применять непосредственную схематизацию.

Непосредственная схематизация нагруженности выполнена шестью методами максимумов, минимумов, амплитуд, приведенных к симметричному циклу амплитуд, полных циклов и приведенных к симметричному циклу амплитуд полных циклов.

Шесть методов непосредственной схематизации приведены для выявления наиболее достоверного метода с точки зрения наибольшего совпадения данных расчетов долговечности с результатами эксплуатационных испытаний.

2.2. Применение непосредственной схематизации обосновано удовлетворительным совпадением результатов расчета долговечности и данных об эксплуатационных испытаниях.

### 3. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ

3.1. Шаг дискретизации по времени (0,05 с) и длину реализации (50,35 с) выбирают в зависимости от максимальной частоты среза нагруженности ( $F_{\max} = 10$  Гц).

3.2. При помощи аппарата математической статистики вычисляют оценки характеристик нагруженности: математическое ожидание, дисперсию, среднеквадратическое отклонение, отношение среднего числа экстремумов к среднему числу нулей (MEN), гистограммы и статистические характеристики распределений, полученные методами непосредственной схематизации.

На основании оценок характеристик нагруженности вычисляют по известным зависимостям значения усталостной долговечности (ТМ), запаса усталостной долговечности (АКМ) и запаса усталостной прочности (АНМ).

Все вычислительные операции, приведенные в пп. 1.3; 2.1; 2.2; 3.1; 3.2, выполнены на ЭВМ «Минск-32» по программам «OSCIL» и «SPEC-1» (блок-схемы программ приведены соответственно на черт. 1 и 2). Корреляционная функция и спектральная плотность вычислены по программам CALL CT 200 и CALL BCN 1, входящим в математическое обеспечение ЭВМ. Результаты обработки приведены на черт. 3—7.

Исходная информация о нагруженности, записанная на магнитной ленте, для ввода в ЭВМ кодируется и перфорируется при помощи преобразователя аналог — код и перфоратора. Время обработки одной реализации с массивом 1007 ординат составляет 4 мин. Погрешность квантования по амплитуде не превышает 5%.

#### 3.3. Определение точности вычисления оценки спектральной плотности нагруженности

3.3.1. Из соображений допустимой для данного расчета точности вычисления оценки спектральной плотности нагруженности задана погрешность  $\varepsilon_r \leq 20\%$ .

Ошибка вычисления определяют по формуле

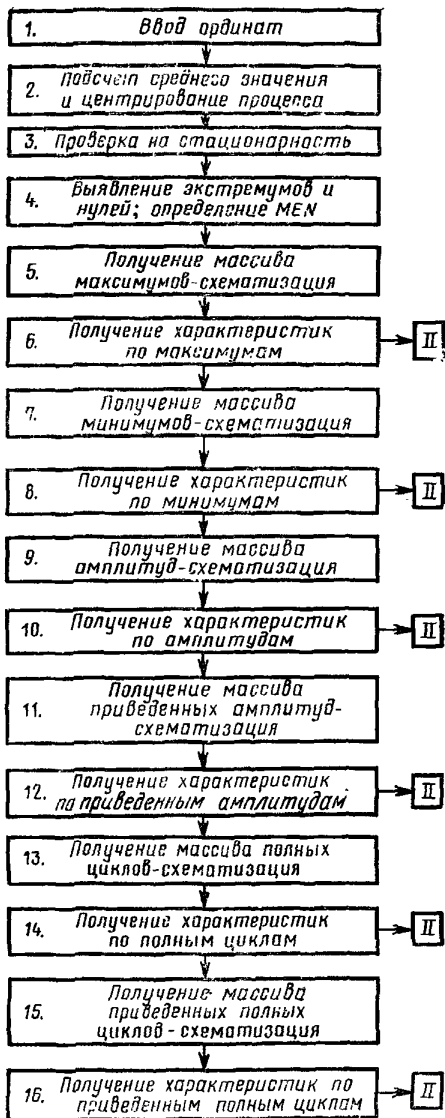
$$\varepsilon_r^2 = \frac{C_m}{N},$$

где  $C = 0,539$  — коэффициент, зависящий от способа сглаживания (по Парзену);

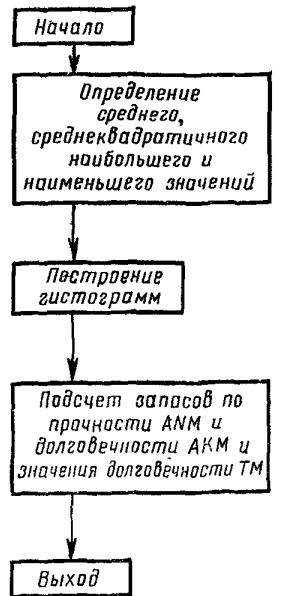
$m = 100$  — число шагов при вычислении корреляционной функции;

$N = 1007$  — количество точек в реализации.

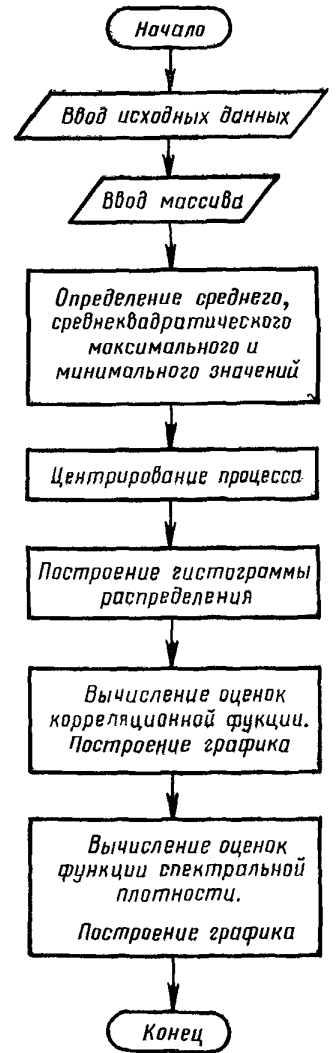
Погрешность  $\varepsilon_r = 0,2$ , что удовлетворяет заданному значению точности.



Черт. 1



II - подпрограмма подсчета статистических характеристик АНМ, АКМ и ТМ



Черт. 2

ОБРАБОТКА ОСЦИЛЛОГРАММ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ  
0.000000+000 0.194000+000 0.580000+001 0.100000+001 0.146000+005 0.000000+0  
0.700000+001 0.500000+002 0.466000+001 0.264000+001 0.500000-001 0.000000+0  
0.530000+002  
1007  
СРЕДНЕЕ ПРОЦЕССА  
0.400908+000  
ВЕЛИЧИНА MEN= 1  
231 224 455

ПРОВЕРКА СТАЦИОНАРНОСТИ

СРЕДНИЕ КВАДРАТЫ

8.2234-001 4.4814-001 1.2293+000 1.2796+000 5.5528-001 8.0172-001 7.0827-001 6.5100-001 4.3800-001 5.3395-00  
8.6629-001 5.6440-001 4.6705-001 8.3915-001 1.5510+000 1.5556+000 1.2730+000 4.9004-001 6.8800-001 1.2600+00

СРЕДНЕЕ СРЕДНИХ

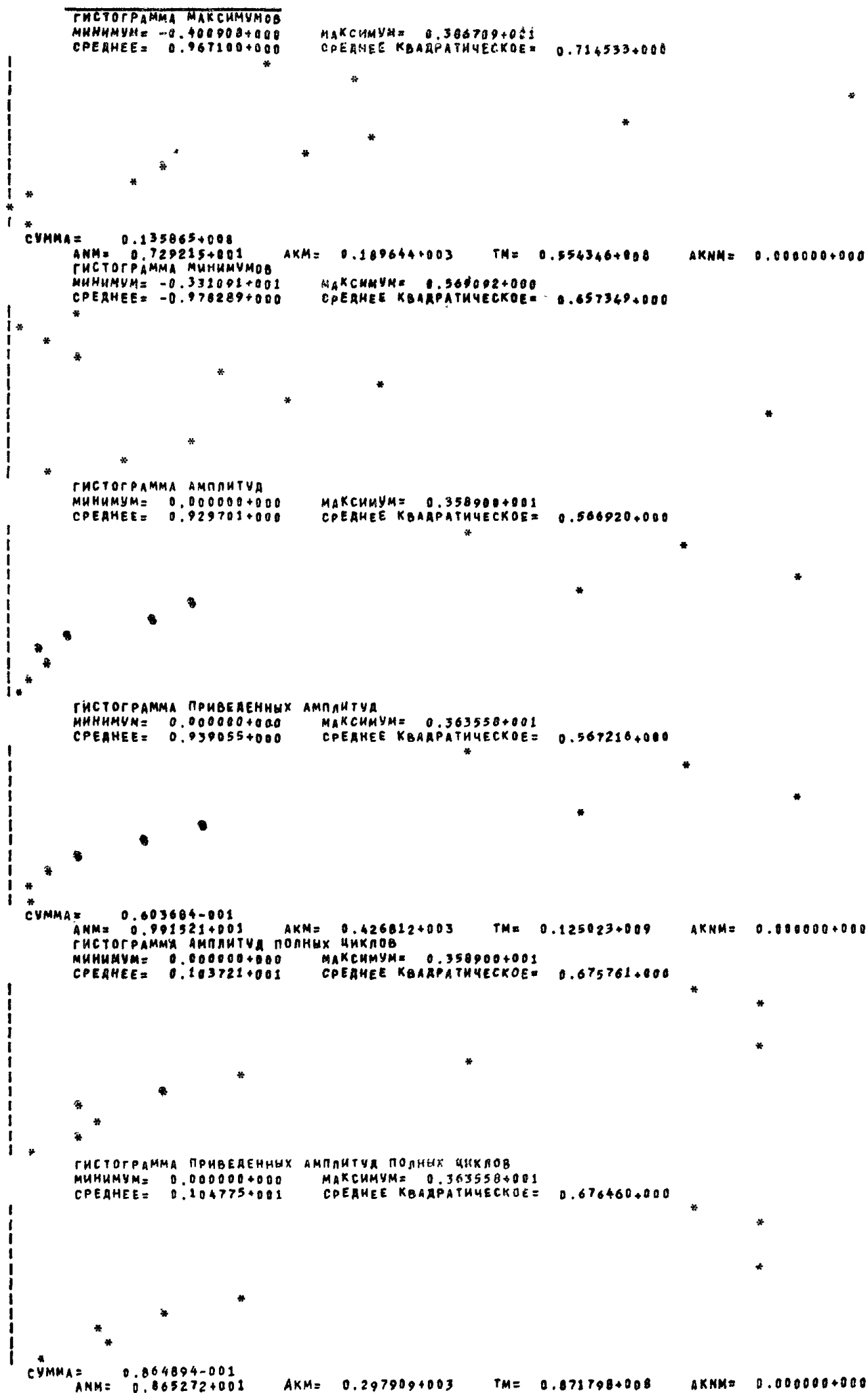
8.5119-001

ВЫДЕЛЕНИЕ СЕРИЙ

-4.0305-001 3.7812-001  
4.2845-001 -2.9591-001  
-3.1725-001 1.5099-002  
1.5099-002 -2.0679-001  
-1.2045-002 6.9983-001  
4.2258-001 -3.6116-001  
-1.6314-001 4.2877-001

КОЛИЧЕСТВО СЕРИЙ





СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

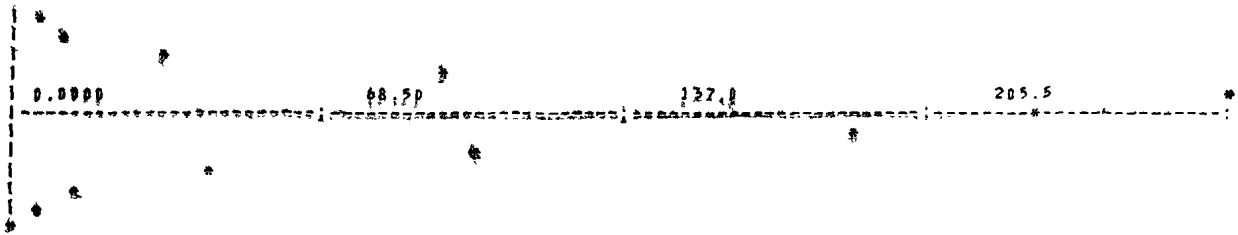
ДЛИНА МАССИВА 1007  
ШАГ КВАНТОВАНИЯ 0.500000-001 СЕК  
ЧАСТОТА НАЙКВИСТА 0.100000+002 ГЦ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА

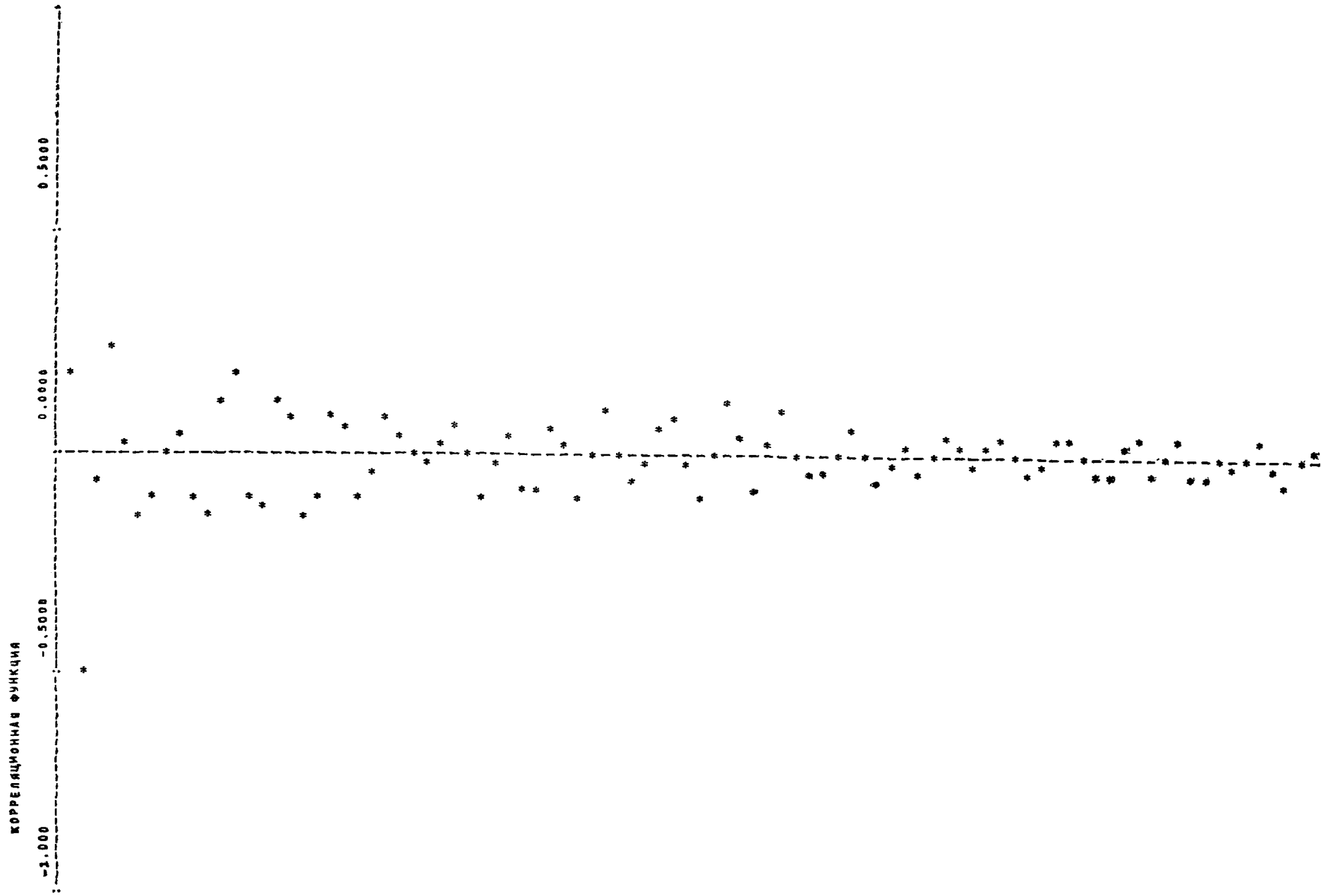
СРЕДНЕЕ 0.4023860+002 0.2926048+001  
ДИСПЕРСИЯ 0.8566438+004 СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЕ 0.9255506+002 0.2485320+001  
ВАРИАЦИЯ 0.2300327+001  
АСИММЕТРИЯ 0.1070183+000 0.7749996-001 ЭКСЦЕСС 0.8841941+000 0.1549199+000

ГИСТОГРАММА ПРОЦЕССА

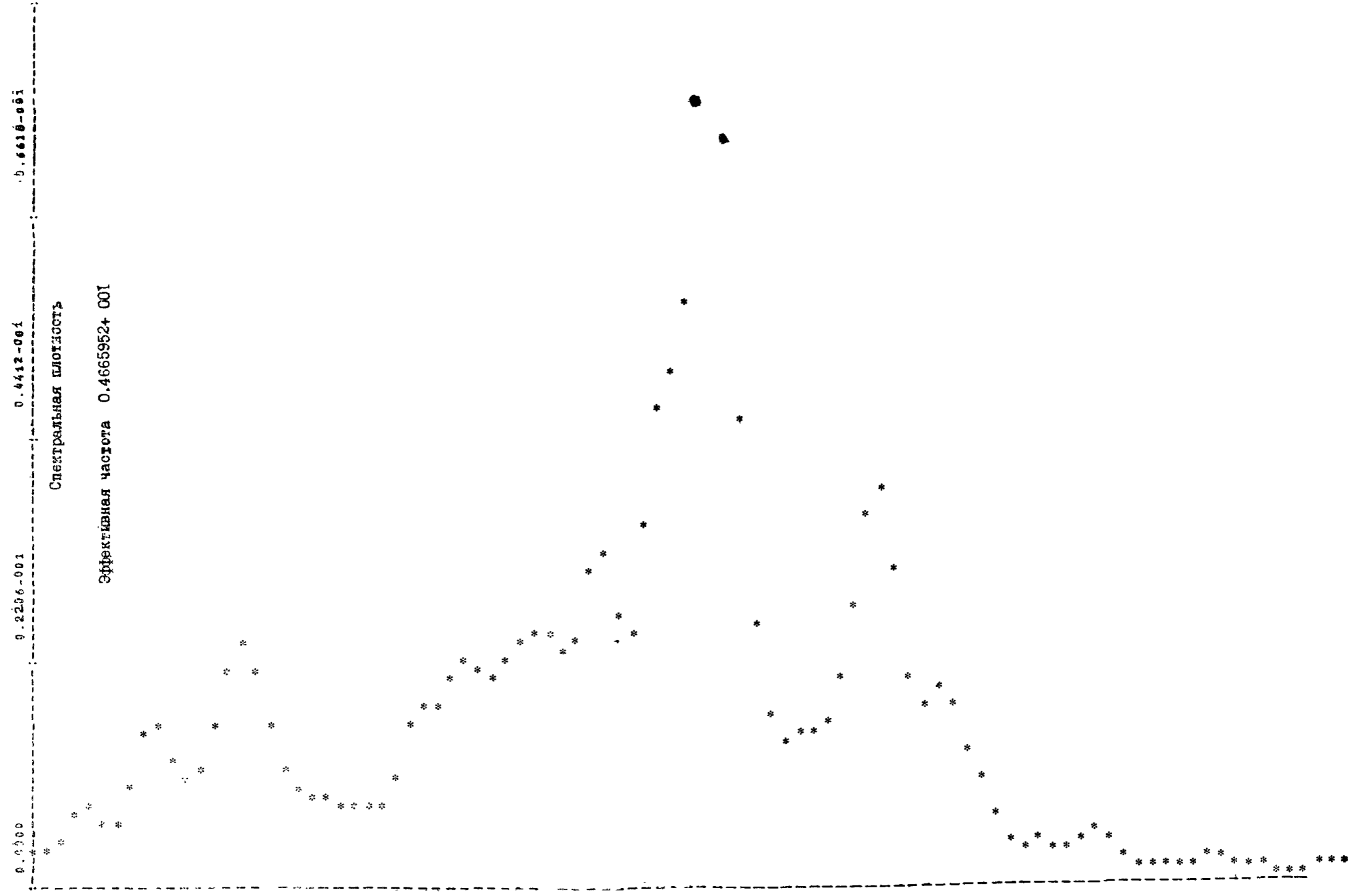
МИНИМУМ= -0.333091+003 МАКСИМУМ= 0.386709+003  
СРЕДНЕЕ= -0.287131+001 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.977260+002



Черт. 5



Черт. 6



Черт. 7

**Пример 2. Обработка данных о нагруженности с применением теории случайных процессов**

Объект исследования — нагруженность в сцепном устройстве тележки самосвала МТП-24.

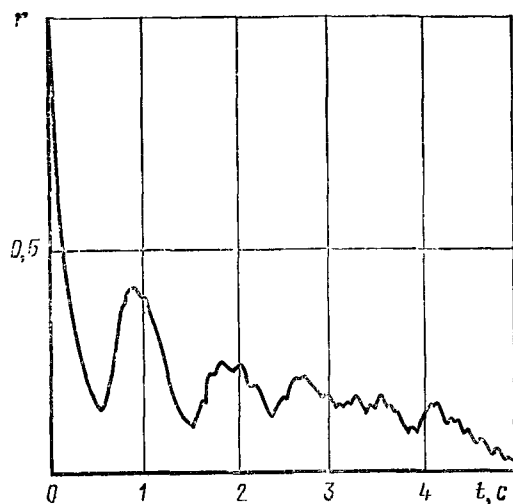
**1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТИ**

1.1. Характер нагруженности — непрерывный.

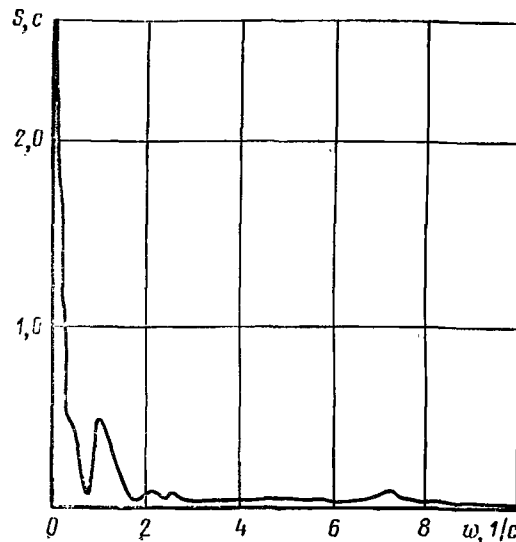
1.2. Вид нагруженности — случайный.

1.3. Визуальный просмотр реализации нагруженности показывает, что она нестационарна по математическому ожиданию.

Построенные по результатам предварительного анализа графики корреляционной функции (черт. 8) и спектральной плотности (черт. 9) нагруженности показали, что процесс широкополосный,  $\Delta F=2$  Гц,  $\omega_0=1$  Гц,  $\Delta F \approx \omega_0$ .



Черт. 8



Черт. 9

**2. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ**

2.1. Структура нагруженности требует использования схематизации с применением теории случайных процессов. Для получения информации о всей полосе частот, присутствующих в процессе, нагруженность представляют суммой стационарного узкополосного процесса и нестационарного случайного процесса изменения низкочастотной составляющей. Операция схематизации выполняется фильтрацией низкочастотной составляющей нагруженности.

**3. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ**

3.1. На основании максимального значения частоты (10 Гц), определяемого при анализе динамической системы, выбирают шаг дискретизации по времени (0,05 с).

По ширине  $a=0,3$  пика на кривой спектральной плотности (на уровне половинной энергии) определяют необходимый интервал корреляции ( $\tau$ ) при применении сглаживающего окна Бартлетта с шириной  $b_1=1,5$  по формуле

$$\tau = \frac{b_1}{a}; \quad \tau = \frac{1,5}{0,3} = 5 \text{ с.}$$

Исходя из доверительной вероятности 80% не превысить ошибки в оценке спектральной плотности более чем на 30%, определяют длину реализации (25 с).

3.2. Статистические характеристики нагруженности вычисляют на ЭЦВМ М-222 по известным формулам с применением аппарата теории случайных процессов.

Оценки статистических характеристик стационарной узкополосной составляющей нагруженности следующие:

математическое ожидание  $m=0,13$  кН;

дисперсия  $D=2,34$  кН<sup>2</sup>;

вид нормированных корреляционной функции и спектральной плотности стационарной случайной нагруженности показан на черт. 10 и 11 соответственно.

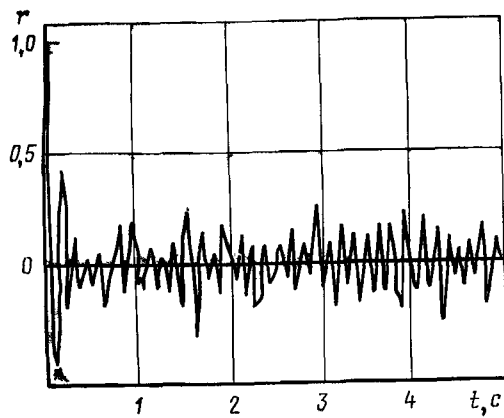
Вид корреляционной функции обусловлен наличием в исследуемой нагруженности периодических колебаний с частотой 7 Гц.

Оценки статистических характеристик исходной нагруженности (до схематизации) следующие:

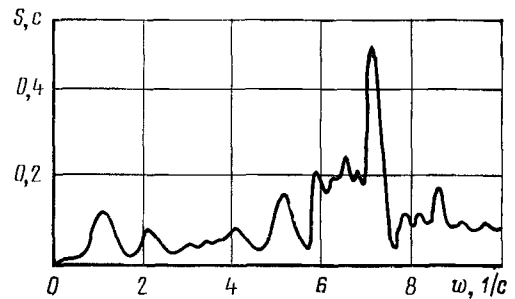
математическое ожидание  $m=11,26$  кН;

дисперсия  $D=3,29$  кН<sup>2</sup>;

вид нормированных корреляционной функции и спектральной плотности исходной нагруженности показан на черт. 8 и 9 соответственно.



Черт. 10



Черт. 11

### 3.3. Оценка точности и достоверности характеристик нагруженности

3.3.1. Чтобы получить достоверную оценку характеристик нагруженности, необходимо оценить точность вычисления спектральной плотности. Значения точности вычисления спектральной плотности и доверительной вероятности заданы из соображений допустимой для прочностных расчетов погрешности (см. п. 3.1). Значения точности при заданном уровне значимости  $\alpha=0,2$  и числе степеней свободы находятся в интервале  $\left( \frac{\nu}{\chi^2_{\nu, (1-\alpha)}}, \frac{\nu}{\chi^2_{\nu, (\alpha)}} \right)$  и погрешность  $\epsilon_r < 30\%$ .

Полученными оценками статистических характеристик нагруженности пользуются для прочностных расчетов.

#### Пример 3. Обработка данных о нагруженности с применением теории случайных процессов

Объект исследования — нагруженность рабочего органа активного роторного корчевателя МТП-26.

#### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТИ

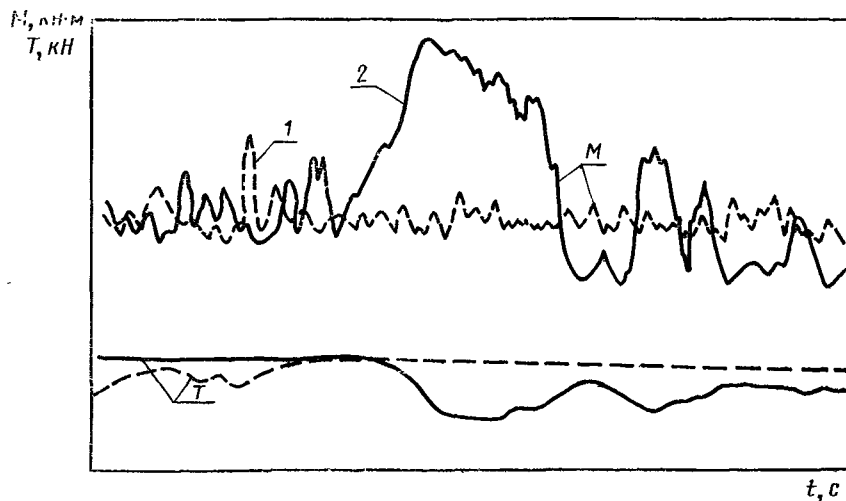
1.1. Нагруженность характеризуется двумя процессами: изменением крутящего момента  $M$  на корчующем роторе; изменением тягового усилия  $T$  на сцепном устройстве (черт. 12).

1.2. Характер нагруженностей — непрерывные.

1.3. Вид нагруженностей — случайные.

1.4. Визуальный просмотр реализаций нагруженности показывает, что они нестационарны по математическому ожиданию и дисперсии.

На основании предварительного анализа установлено, что процесс широкополосный,  $\Delta F \approx \omega_0$ .



1—первый режим при эксплуатации машины на беспыльной задежи; 2—второй режим при корчевании пней

Черт. 12

## 2. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ

2.1. Структура нагруженности требует использования схематизации с применением теории случайных процессов. Для этого анализируемые нагруженности представляют моделями случайных процессов, составленными из двух режимов (черт. 12):

- 1 — режим при эксплуатации машины на беспнистой залежи;
- 2 — режим при корчевании пней.

Нагруженности в одном режиме проявляют свойство стационарности. Последовательным соединением участков локальной стационарности, относящихся к одному режиму, формируют стационарные случайные процессы.

## 3. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ

3.1. На основании максимального значения частоты (10 Гц), определяемого при анализе динамической системы, выбирают шаг квантования по времени (0,05 с).

По ширине  $a=0,4$  пика на кривой спектральной плотности (на уровне половинной энергии) определяют необходимый интервал корреляции ( $\tau$ ) при применении сглаживающего окна Бартлетта с шириной  $b_1=1,5$  по формуле

$$\tau = \frac{b_1}{a}; \quad \tau = \frac{1,5}{0,4} = 3,75 \text{ с.}$$

Исходя из доверительной вероятности 80% не превысить ошибки в оценке спектральной плотности более чем на 30%, определяют длину реализации (18,75 с) и число точек реализации (375).

3.2. Статистические характеристики нагруженности для первого и второго режимов вычисляют на ЭЦВМ М-222 по известным формулам с применением аппарата теории случайных процессов.

Оценки статистических характеристик нагруженности следующие:

для первого режима

математическое ожидание  $m_M = 15,488$  кН·м,  $m_T = 23,296$  кН;

дисперсия  $D_M = 15,867$  кН<sup>2</sup>,  $D_T = 52,491$  кН<sup>2</sup>;

на черт. 13 и 14 пунктиром показаны одномерные функции распределения вероятностей процессов  $M$  и  $T$  соответственно;

вид нормированных корреляционных функций и спектральных плотностей стационарных случайных процессов соответственно показан пунктиром:

для процесса  $M$  — на черт. 15 и 16,

для процесса  $T$  — на черт. 17 и 18;

графики нормированных взаимной корреляционной функции амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик процессов  $M$  и  $T$  соответственно показаны пунктиром на черт. 19—21;

для второго режима

математическое ожидание  $m_M = 18,844$  кН·м,  $m_T = 39,383$  кН;

дисперсия  $D_M = 135,743$  кН·м<sup>2</sup>,  $D_T = 582,672$  кН<sup>2</sup>;

на черт. 13 и 14 сплошной линией показаны одномерные функции распределения вероятностей процессов  $M$  и  $T$  соответственно;

вид нормированных корреляционных функций и спектральных плотностей случайных процессов соответственно показан сплошной линией:

для процесса  $M$  — на черт. 15 и 16,

для процесса  $T$  — на черт. 17 и 18;

графики нормированных взаимной корреляционной функции, квадрата амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик процессов  $M$  и  $T$  соответственно показаны сплошной линией на черт. 19—21.

### 3.3. Оценка точности и достоверности полученных данных

3.3.1. Чтобы получить достоверную оценку характеристик нагруженности необходимо оценить точность вычисления спектральной плотности. Значения точности и доверительной вероятности заданы из соображений допустимой для решения задачи погрешности (см. п. 3.1). Значения точности при заданном уровне значимости  $\alpha = 0,2$  и числе степеней свободы  $\nu = 15$  находятся в интервале  $\left( \frac{\nu}{\chi_{\nu, (1-\alpha)}^2}, \frac{\nu}{\chi_{\nu, (\alpha)}^2} \right)$  и погрешность  $\epsilon_r \leq 30\%$ .

Полученными оценками статистических характеристик нагруженности пользуются для прочностных расчетов элементов трансмиссии машины МТП-26 и при обосновании выбора мощности двигателя.

## Пример 4. Обработка данных о нагруженности методами непосредственной схематизации и с применением теории случайных процессов

Объект исследования — динамические составляющие нагруженностей балок переднего и заднего мостов самоходного вагона 4ВС-10 при движении его по шахтной дороге транспортного штрека. Длина прямолинейного участка шахтной дороги 140 м, уклон 6°, скорость движения 5,2 км/ч. Цель обработки данных — получение исходных данных для обоснования режимов стендовых (полигонных) испытаний.

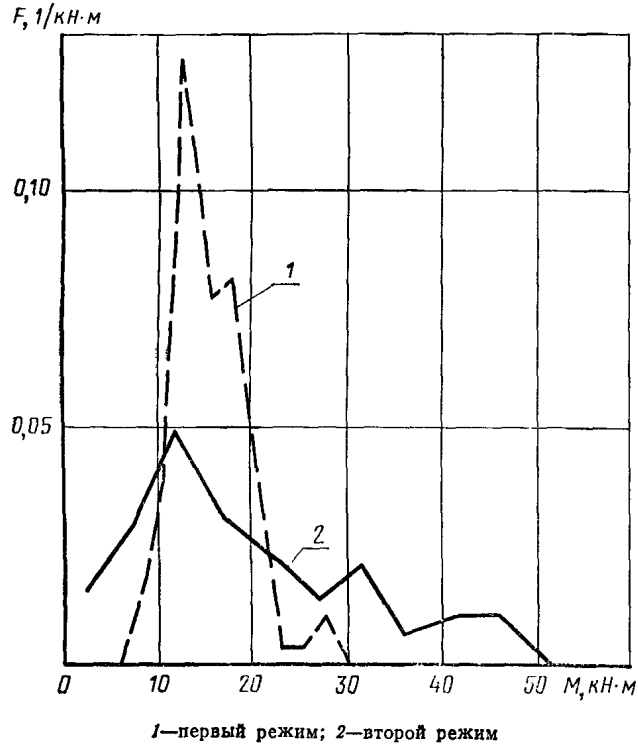
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТЕЙ

1.1. Характер нагруженностей — непрерывные.

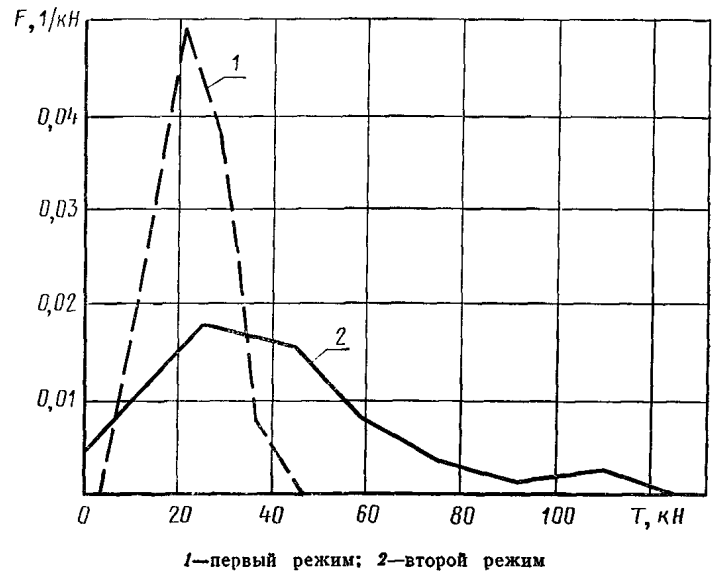
1.2. Вид нагруженностей — случайные.

1.3. Визуальный просмотр реализаций нагруженностей показал, что они нестационарны по математическому ожиданию и обусловлено это уклоном шахтной дороги.

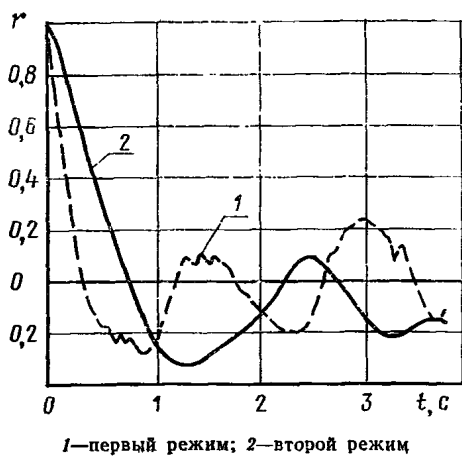
Предварительный анализ динамической системы показал, что нагруженности широкополосные и содержат несколько периодических составляющих в диапазоне 1,5—2 Гц (собственные частоты системы).



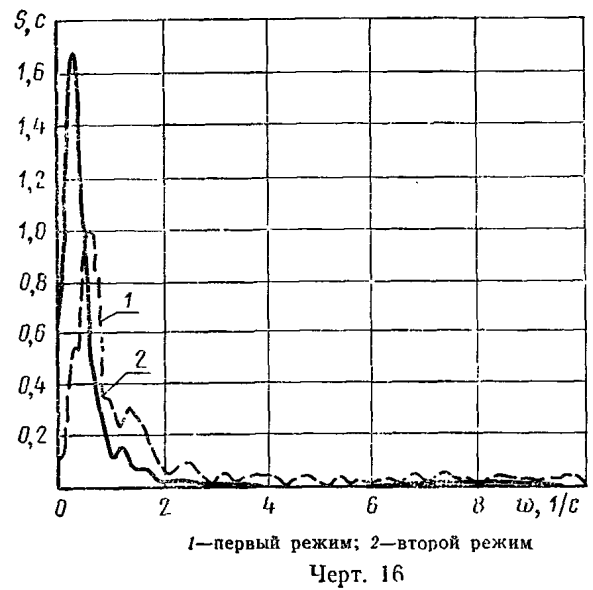
Черт. 13



Черт. 14

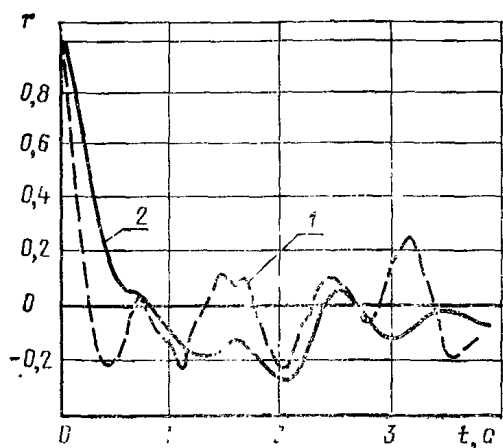


Черт. 15

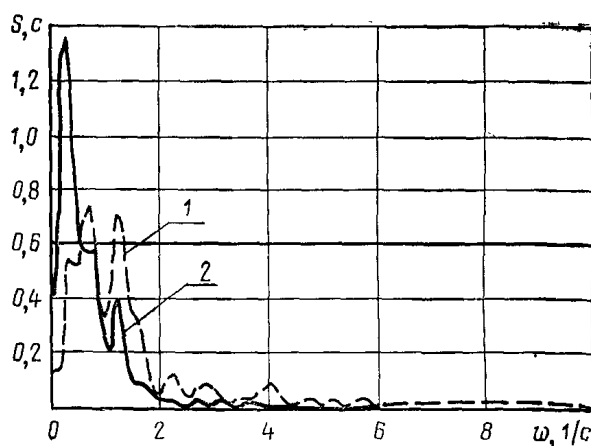


Черт. 16

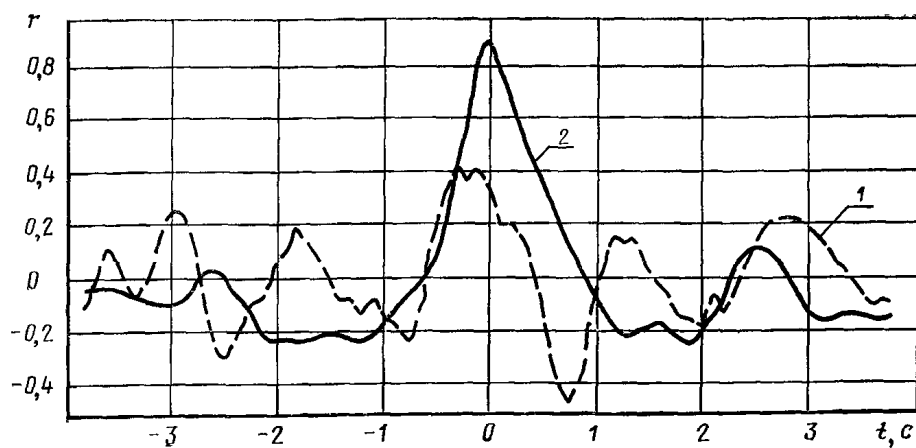




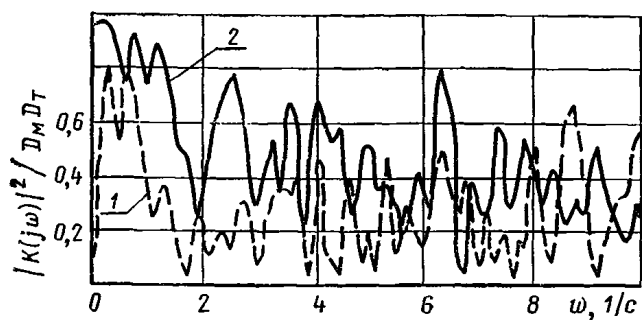
1—первый режим; 2—второй режим  
Черт. 17



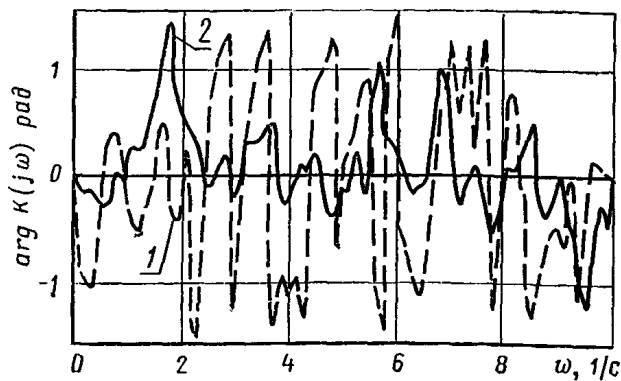
1—первый режим; 2—второй режим  
Черт. 18



1—первый режим; 2—второй режим  
Черт. 19



1—первый режим; 2—второй режим  
Черт. 20



1—первый режим; 2—второй режим  
Черт. 21

## 2. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ

2.1. Структура нагрузок позволяет применять методы непосредственной схематизации (мгновенных значений) и теории случайных процессов.

Реализации нагрузок осредняются методом скользящего среднего. Это равнозначно исключению очень низких частот, влиянием которых можно пренебречь.

### 3. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ

3.1. Шаг дискретизации процессов по времени (0,032 с) выбирают в зависимости от значений собственных частот. Длина реализаций — 40 с, число точек — 1200.

3.2. При помощи аппарата математической статистики вычисляют оценки характеристик нагруженностей: математические ожидания, дисперсии, гистограммы распределений мгновенных значений.

Анализ гистограмм мгновенных значений нагруженностей показал, что они с доверительной вероятностью 0,8 могут быть описаны нормальными законами распределения со следующими параметрами:

для переднего моста

математическое ожидание  $m=0$ ,  
среднее квадратическое отклонение  $\sigma=12$  кН;

для заднего моста

математическое ожидание  $m=0$ ,  
среднее квадратическое отклонение  $\sigma=14$  кН.

При помощи аппарата теории случайных процессов вычисляют спектральные плотности и корреляционные функции нагруженностей, а также эффективные частоты нагруженностей  $\omega_{эф}$ , средние числа пересечений нулевого уровня  $n_1$  и средние числа максимумов (минимумов)  $n_2$  в единицу времени (или количества нулей  $\vartheta_1$  и максимумов  $\vartheta_2$  на 1 км пройденного пути):

для переднего моста

число нулей  $n_1=1,34$  1/с,  $\vartheta_1=893$  1/км,  
число максимумов  $n_2=1,7$  1/с,  $\vartheta_2=1133$  1/км,  
эффективная частота  $\omega_{эф}=1,33$  Гц;

для заднего моста

число нулей  $n_1=1,32$  1/с,  $\vartheta_1=830$  1/км,  
число максимумов  $n_2=1,83$  1/с,  $\vartheta_2=1220$  1/км,  
эффективная частота  $\omega_{эф}=1,31$  Гц.

Вид корреляционных функций нагруженностей балок мостов самоходного вагона 4ВС-10 приведен на черт. 22, а спектральных плотностей — на черт. 23. Вид спектральных плотностей обусловлен динамикой системы и спецификой условий функционирования.

Вычисленную на ЭЦВМ по входным данным корреляционную функцию рассматривают как первое приближение  $R'$ , по ней в первом приближении вычисляют спектральную плотность  $S'$ . По спектральной плотности  $S'$  с учетом возможных погрешностей (выброс  $S'$  в область отрицательных значений) вычисляют  $R$ . Затем по  $R$  находят  $S$  — окончательное значение спектральной плотности нагруженности.

Вид взаимной корреляционной функции между нагруженностями балок переднего и заднего моста одного борта вагона (черт. 24) показывает, что основная причина возникновения нагрузок на мостах связана с галопированием вагона.

Все вычислительные операции, указанные в п. 3.2, выполнены на малой ЭЦВМ «Проминь-2».

#### 3.3. Оценка точности и достоверности характеристик нагруженности

3.3.1. Для получения достоверных оценок характеристик нагруженности оценивают точность вычисления спектральной плотности. Значения погрешности  $\varepsilon_r \leq 30\%$  и доверительной вероятности  $p=0,8$  заданы в зависимости от допустимой для решения поставленной задачи точности. Значения точности при заданном уровне значимости  $\alpha=0,2$  и числе степеней свободы  $\nu=15$  находятся в интервале  $\left( \frac{\nu}{\chi_{\nu, (1-\alpha)}^2}, \frac{\nu}{\chi_{\nu, (\alpha)}^2} \right)$  и погрешность  $\varepsilon_r \leq 30\%$ .

#### Пример 5. Обработка данных о нагруженности методами непосредственной схематизации и с применением теории случайных процессов

Объект исследования — нагруженность в сечении рамы тележки ЦНИИ-ХЗ (напряжения в углу буксового и рессорного проема при скоростях движения 70—79, 80—89, 90—99 км/ч). Цель обработки — расчеты на прочность.

### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТИ

1.1. Характер нагруженностей — непрерывные.

1.2. Вид нагруженностей — случайные.

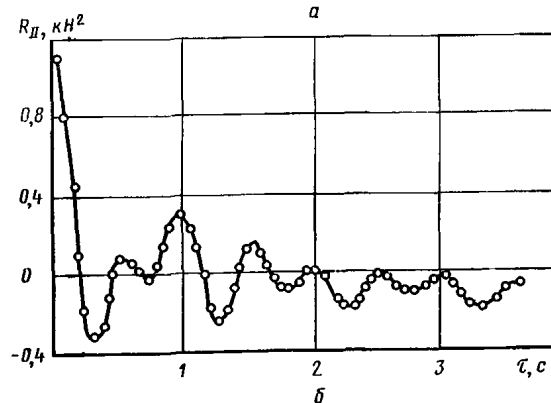
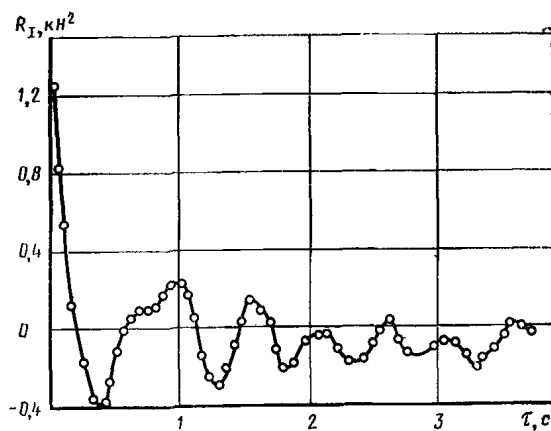
1.3. Процессы — стационарные, широкополосные.

Стационарность процессов установлена в результате предварительного анализа. На широкополосность процессов указывает значение коэффициента широкополосности, равное 0,9 (отношение среднего числа нулей к среднему числу экстремумов).

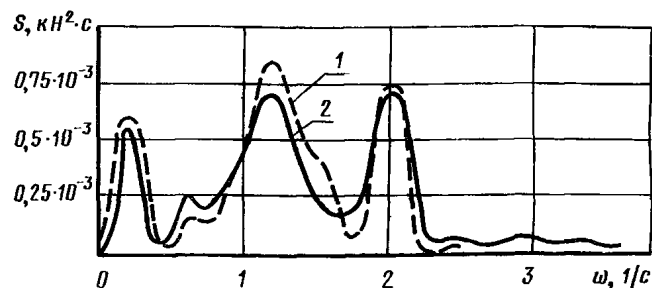
### 2. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ

2.1. Непосредственная схематизация нагруженности выполнена методом амплитуд.

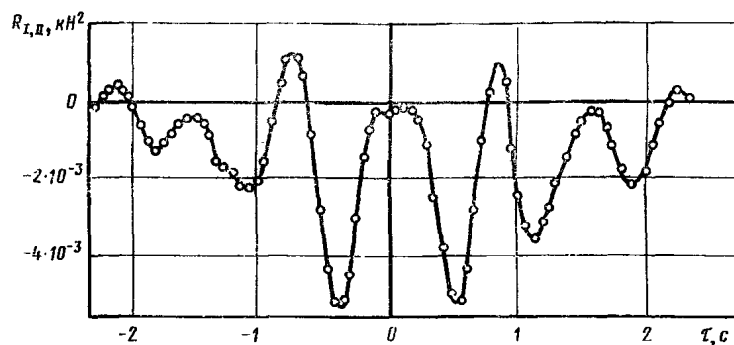
2.2. Для расчета показателей прочности и надежности необходимы характеристики спектральной плотности и 0,24-е спектральные моменты. Для получения этих характеристик выполнена схематизация с применением теории случайных процессов.



а—передний мост; б—задний мост  
Черт. 22



1—передний мост; 2—задний мост  
Черт. 23



Черт. 24

### 3. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ

3.1. Шаг дискретизации по времени (0,015 с) и длину реализации (15,36 с) выбирают в зависимости от максимальной частоты среза нагруженности  $F_{\max}=35$  Гц. Заданная нормированная ошибка вычисления оценки спектральной плотности  $\varepsilon_r=20\%$ .

3.2. При помощи аппарата математической статистики вычисляют оценки характеристик нагруженности: математические ожидания, средние квадратические отклонения, показатели асимметрии и эксцесса, медианы, моды, коэффициенты вариации, гистограммы амплитуд.

При помощи аппарата теории случайных процессов вычисляют спектральные плотности нагруженностей, спектральные моменты, определяют эффективную частоту нагруженностей, коэффициент широкополосности процессов. Спектральные плотности определяют с применением метода быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Все вычислительные операции выполнены по программам автоматизированной системы ускоренной обработки опытных данных динамико-прочностных испытаний вагонов на базе ЭВМ третьего поколения М-6000. Блок-схемы алгоритмов вычислений и результаты обработки приведены на черт. 25—29.

Исходная информация о нагруженности, записанная на магнитной ленте, вводится в машину для обработки через стандартный аналого-цифровой преобразователь АЦП-611—8 и модуль управления коммутаторами МУК-612—1, который позволяет подключать для одновременной обработки до 128 процессов. Время обработки одной реализации с массивом 1024 ординаты составляет 70 с.

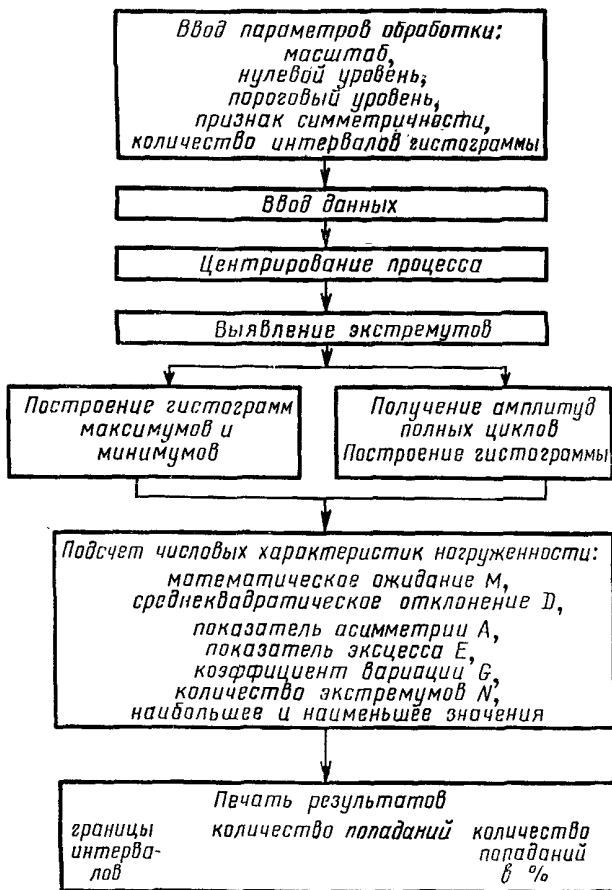
#### 3.3. Оценка точности и достоверности полученных данных

Нормированную стандартную ошибку вычисления оценки спектральной плотности определяют по формуле

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{1}{LQ}},$$

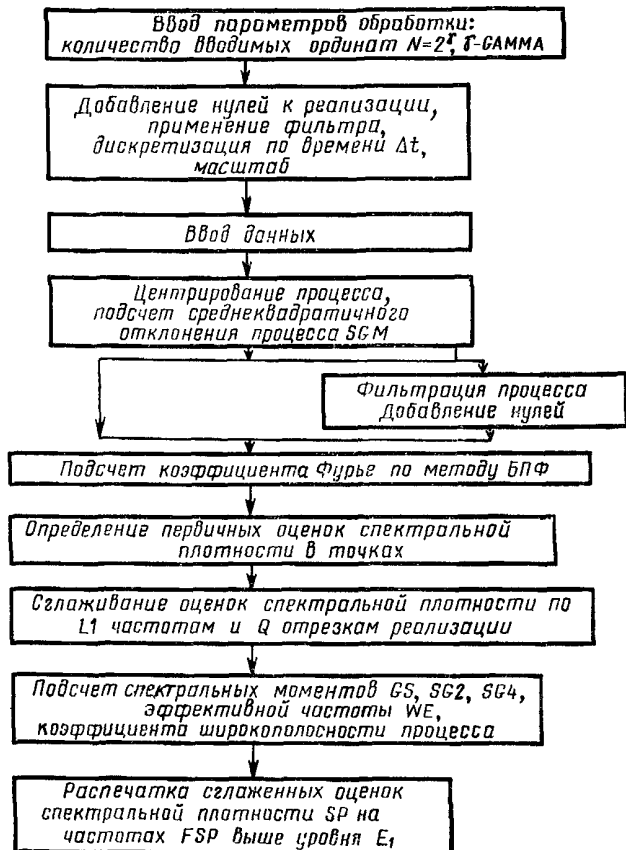
где  $L=5$ ,  $Q=6$  — параметры при сглаживании первичных оценок спектральной плотности комбинированным способом (осреднение по  $L$  смежным частотам и по  $Q$  отрезкам реализации). Погрешность  $\varepsilon_r < 20\%$  удовлетворяет заданному значению.

Блок-схема алгоритма статистической обработки

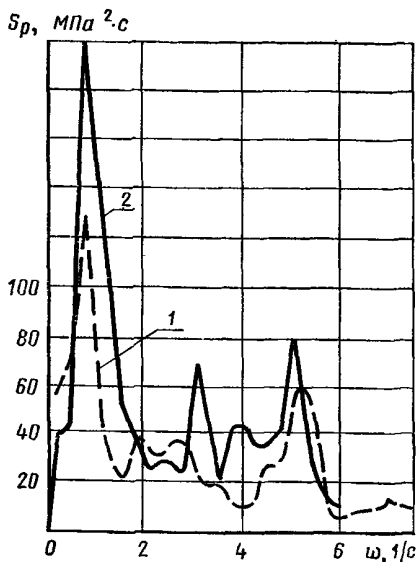


Черт. 25

Блок-схема алгоритма вычисления спектральной плотности и спектральных моментов



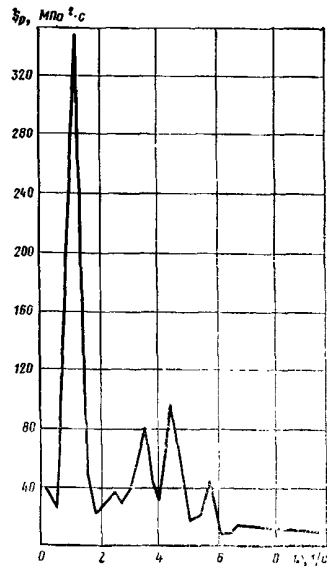
Черт. 26



Спектральные плотности нагруженности в сечении рамы тележки ЦНИИ-ХЗ:

1—при скорости движения 70—79 км/ч;  
2—при скорости движения 80—89 км/ч.

Черт. 27



Спектральная плотность нагруженности в сечении рамы тележки ЦНИИ-ХЗ при скорости движения 90—99 км/ч.

Черт. 28

70-79 км/ч	80-89 км/ч	90-99 км/ч
ГАММА		
10	SGM=6250.972	
ДОБ.О	L1	SGM=2578.753
0	5	L1
ФИЛЬТР	BEGIN	5
1	0	BEGIN
ДИСКРЕТИЗАЦИЯ DT	OUT	0
15	1	OUT
КОЭФ	Q	1
6.44	4	Q
MU	E1	5
0	150	E1
SGM=2868.087	FSP	200
L1	SP	FSP
5	.000 .14343E+01	.000 .16769E+02
BEGIN	.195 .56874E+03	.195 .18436E+03
0	.521 .44393E+03	.521 .19510E+03
OUT	.846 .20273E+04	.846 .39672E+03
1	1.172 .11883E+04	1.172 .81141E+03
Q	1.497 .54571E+03	1.497 .61939E+03
6	1.823 .39451E+03	1.823 .17596E+03
E1	2.148 .26823E+03	2.148 .32001E+03
250	2.474 .30191E+03	2.474 .15175E+03
FSP	2.799 .25053E+03	2.799 .28455E+03
SP	3.125 .70376E+03	3.125 .54681E+03
.000 .20594E+02	3.451 .19701E+03	3.451 .45746E+03
.195 .60007E+03	3.776 .42447E+03	3.776 .40890E+03
.521 .75872E+03	4.102 .42139E+03	4.102 .51395E+03
.846 .12914E+04	4.427 .34453E+03	4.427 .95563E+03
1.172 .31026E+03	4.753 .44524E+03	4.753 .16157E+03
1.497 .17954E+03	5.078 .78022E+03	5.078 .13461E+03
1.823 .39781E+03	5.404 .30187E+03	5.404 .11679E+03
2.148 .28932E+03	5.729 .16104E+03	6.380 .48241E+02
2.474 .35889E+03	6.055 .10370E+03	6.706 .63422E+02
2.799 .34591E+03	6.380 .85205E+02	8.659 .41034E+02
3.125 .19074E+03	6.706 .12376E+03	8.984 .54803E+02
3.451 .19471E+03	7.031 .14072E+03	9.310 .21972E+03
3.776 .82419E+03	7.357 .58005E+02	SG=.25722E+04
4.102 .10460E+03	7.682 .14776E+03	SG2=.14994E+06
4.427 .27061E+03	8.333 .57623E+02	SG4=.66749E+08
4.753 .28737E+03	8.659 .43747E+02	WE= 7.63488
5.078 .62364E+03	8.984 .38174E+02	DW= .93223
5.404 .46106E+03	19.08 .47301E+02	KM=2.76352
5.729 .50896E+02	20.05 .39939E+02	
6.055 .61505E+02	21.03 .71263E+02	
6.380 .70098E+02	22.01 .41594E+02	
6.706 .80461E+02	SG=.38735E+04	
7.031 .12603E+03	SG2=.23135E+06	
7.357 .10502E+03	SG4=.11662E+09	
8.659 .49023E+02	WE= 7.72821	
SG=.27300E+04	DW= .93890	
SG2=.16289E+06	KW= 2.90526	
SG4=.81722E+03		
WE= 7.72436		
DW= .93866		
KM= 2.69976		

Результаты обработки данных о нагруженности.  
Спектральные плотности и спектральные моменты при скоростях движения  
70—79, 80—89, 90—99 км/ч.

### Пример 6. Обработка данных о нагруженности с применением теории случайных процессов

Объект исследования — нагруженности элементов трансмиссии и подвески автомобиля «Москвич-412 ИЖ», движение на четвертой передаче.

Цель обработки данных — расчеты на прочность и получение исходных данных для обоснования режимов стеновых (полигонных) испытаний.

#### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТИ

1.1. Нагруженность характеризуется двумя процессами: изменением крутящего момента  $M(t)$  на полуоси автомобиля; изменением вертикальной реакции  $Z(t)$  на колесе.

1.2. Характеры нагруженностей — непрерывные.

1.3. Вид нагруженностей — случайные.

1.4. Предварительная обработка нагруженностей показала, что они нестационарны по математическому ожиданию и дисперсии, процессы — широкополосные.

#### 2. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ

2.1. Структура нагруженностей требует схематизации с применением теории случайных процессов. Для этого анализируемые нагруженности представляют моделями случайных процессов, составленными из двух режимов:

первый — режим при движении по асфальтобетонному шоссе с новым покрытием в сухом состоянии на скорости 100 км/ч;

второй — режим движения по бетонному шоссе с разбитым покрытием в сухом состоянии на скорости 36 км/ч.

Нагруженности в одном режиме стационарны и эргодичны.

Были рассмотрены одновременно два процесса:  $Z(t)$  и  $M(t)$ , проанализированы по две реализации нагруженностей  $Z(t)$  и  $M(t)$ , каждая по 15 с, составленные из синхронных записей процессов в первом и втором режимах.

#### 3. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ

3.1. Величину корреляционной связи между входом и выходом линейной системы (черт. 30) описывают квадратом коэффициента корреляции на частотах  $\chi_{ZM}^2(\omega)$ . Динамическими характеристиками линейной системы являются амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики системы,  $K(j\omega)$  и  $\arg K(j\omega)$  соответственно.

При необходимой разрешающей способности анализа спектральных характеристик нагруженности не хуже 2 Гц выбран шаг дискретизации по времени 0,01 с, объем выборки — 1500 точек для каждой реализации.

3.2. Оценки статистических характеристик сглажены с использованием корреляционного окна Тьюки и было выполнено «стягивание окна», т. е. вычисление сглаженных выборочных спектральных оценок при сокращении ширины корреляционного окна, что позволило исследовать устойчивость и точность выборочных спектральных оценок при уменьшении разрешающей способности анализа.

Были использованы два значения ширины корреляционного окна  $B$ : 1 и 0,5 с. Число степеней свободы выборочных спектральных оценок соответственно равно 32 и 64, а разрешающая способность анализа 1 и 2 Гц. Результаты обработки при разрешающей способности анализа 1 Гц приведены на черт. 31 и 32.

При заданных параметрах спектрального анализа спектральные оценки нагруженности характеризуются большой дисперсией. Поэтому для вычисления оценок  $\chi_{ZM}^2(\omega)$ ,  $K(j\omega)$  и  $\arg K(j\omega)$  проведено осреднение выборочных оценок, для которых получено 125 и 250 степеней свободы при разрешающей способности 1 и 2 Гц соответственно (черт. 33—35).

#### 3.3. Оценка точности и достоверности полученных результатов

3.3.1. Для получения 100  $(1-\alpha)$  %-ного доверительного интервала при  $\chi_{ZM}^2(\omega)$  пользовались приближенным распределением случайной величины

$$P[\hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)] = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{1 + \hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)}{1 - \hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)} \right],$$

где  $\hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)$  — оценка величины  $\chi_{ZM}^2(\omega)$ , имеющая приближенно гауссовское распределение и дисперсию, равную  $0,5/B$  и не зависящую от частоты  $\omega$ .

Приближенные 100  $(1-\alpha)$  %-ные доверительные интервалы при  $K(j\omega)$  и  $\arg K(j\omega)$  соответственно вычисляются по следующим формулам:

осредненную амплитудно-частотную характеристику

$$K(j\omega) = 1 \pm \sqrt{\frac{2}{v-2} \bar{f}_{2,v-2}(1-\alpha) \frac{1 - \hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)}{\hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)}},$$

осредненную фазочастотную характеристику

$$\arg K(j\omega) = \pm \arctg \left( \sqrt{\frac{2}{v-2} \bar{f}_{2,v-2}(1-\alpha) \frac{1 - \hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)}{\hat{\chi}_{ZM}^2(\omega)}} \right),$$

где  $\nu$  — число степеней свободы, соответствующее степени сглаживания;  
 $f_{2,\nu-2}(1-\alpha)$  — 100(1- $\alpha$ )-ный квантиль функции распределения погрешностей.

При  $\nu=250$  для доверительного интервала, равного 95%,  $\alpha=0,5$ ,  $f_{2,\nu-2}(1-\alpha)=f_{2,248}=3,03$ .

Верхние и нижние границы доверительных интервалов для осредненных оценок характеристик вычисляются по формулам:

верхнюю границу

$$\hat{x}_{ZM}^B(\omega) = \frac{A_{B-1}}{A_{B+1}},$$

нижнюю границу

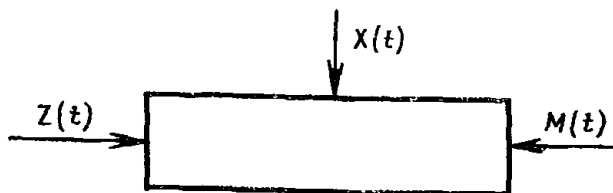
$$\hat{x}_{ZM}^H(\omega) = \frac{A_{H-1}}{A_{H+1}},$$

где

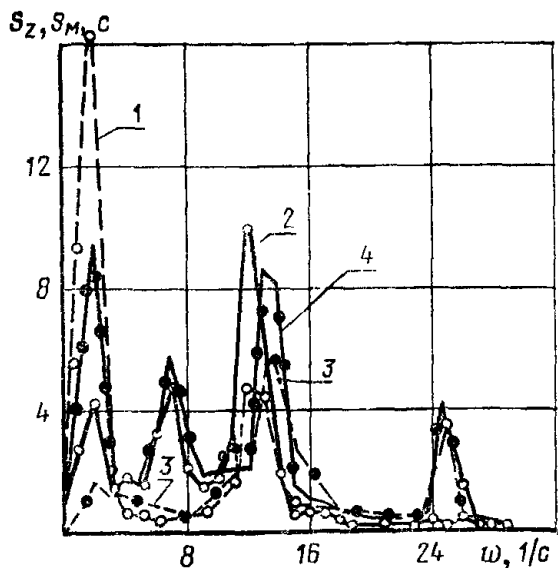
$$A_B = \frac{1 + \hat{x}_{ZM}(\omega)}{1 - \hat{x}_{ZM}(\omega)} e^{0,248}; \quad A_H = \frac{1 + \hat{x}_{ZM}(\omega)}{1 - \hat{x}_{ZM}(\omega)} e^{-0,248}.$$

Ширина доверительных интервалов зависит от номинальных значений  $x_{ZM}^2(\omega)$  и указана на черт. 33—35.

Условная схема линейной системы подвеска-трансмиссия с одним входом  $Z(t)$  при наличии шума  $X(t)$  и выходом  $M(t)$ .



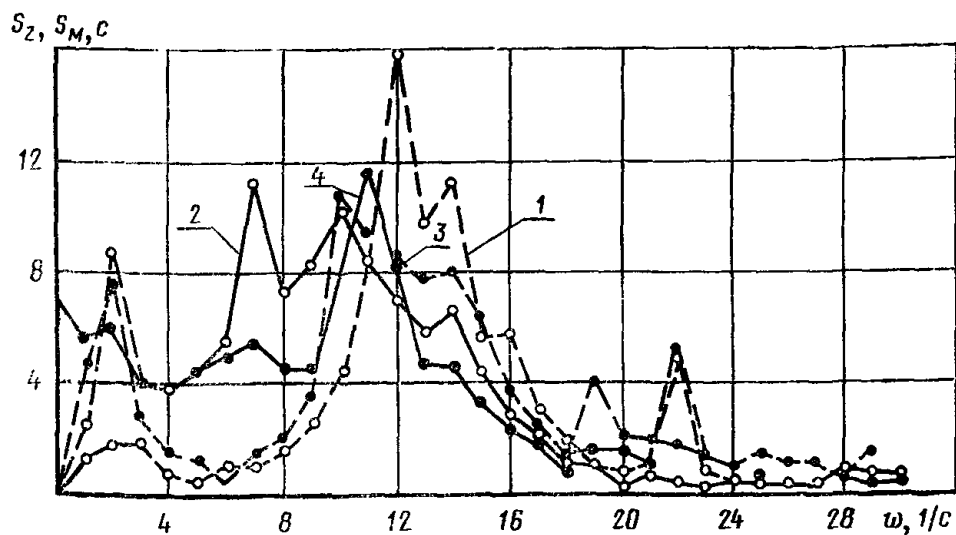
Черт. 30



Нормированные спектральные плотности нагруженностей на новом асфальтобетонном шоссе при скорости движения 100 км/ч:

1, 3—вертикальная реакция  $Z(t)$  на колесе;  
 2, 4—крутящий момент  $M(t)$  на полуоси; 1, 2—первый участок дороги; 3, 4—второй участок дороги

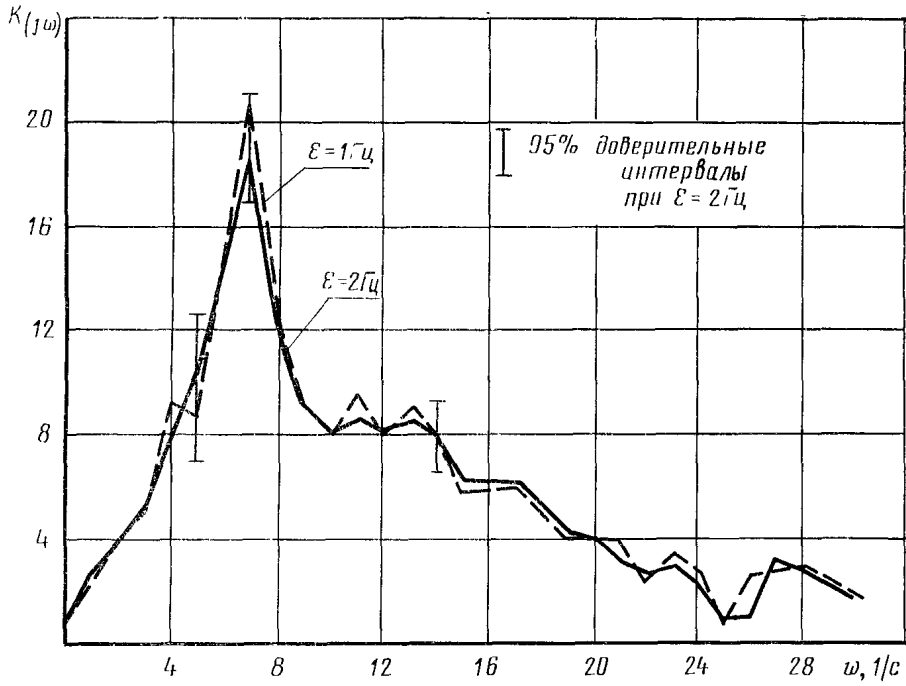
Черт. 31



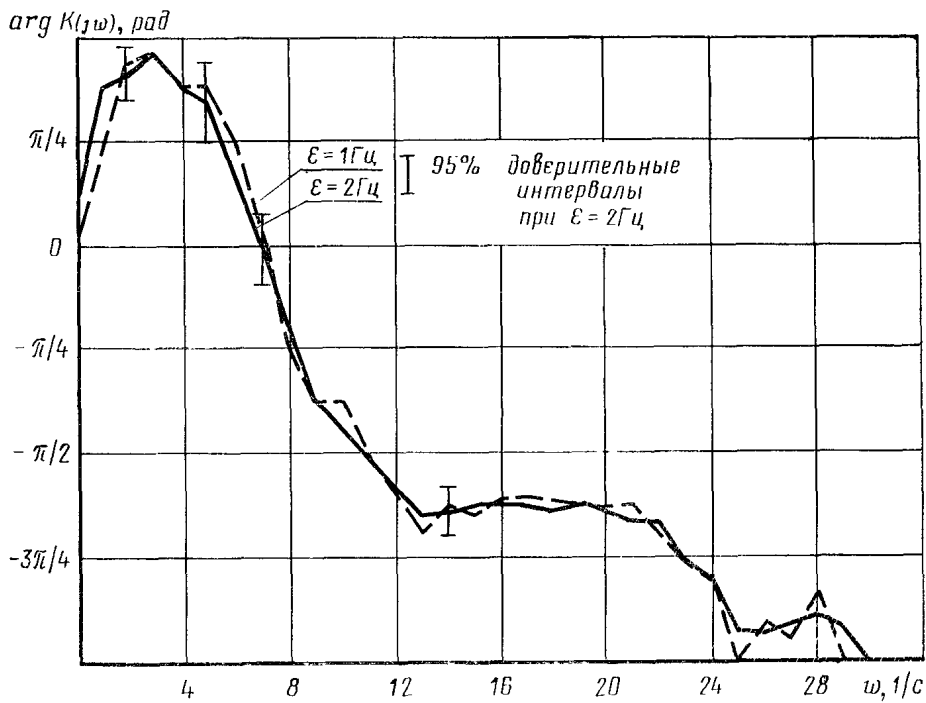
Нормированные спектральные плотности нагруженностей на сильно изношенном бетонном шоссе при скорости движения 36 км/ч:

1, 3—вертикальная реакция на колесе; 2, 4—крутящий момент на полуоси; 1, 2—первый участок дороги; 3, 4—второй участок дороги

Черт. 32

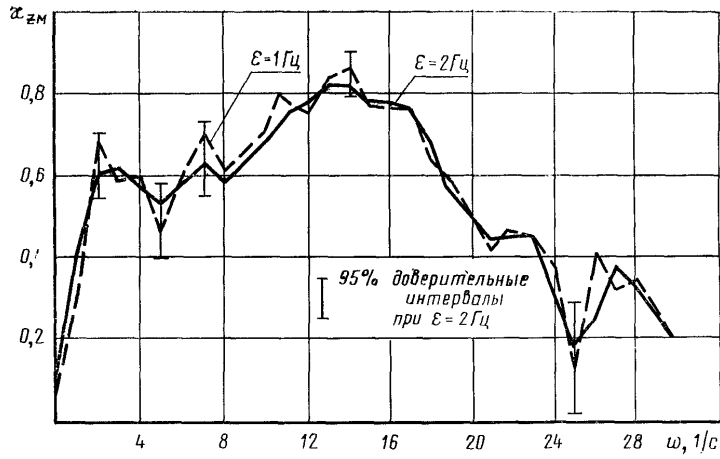


Осредненная оценка амплитудно-частотной характеристики системы  
Черт. 33



Осредненная оценка фазочастотной характеристики системы  
Черт. 34





Коэффициент корреляции на частотах системы

Черт. 35