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

gost.e-ecolog.ru

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. Седякин**, канд. **техн. наук**; **В. В. Никонов**, канд. техн. наук; **Н. Д. Чернова**; **В. Н. Захаров**; **Б. Г. Поликаренков**, 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. тенх. наук; **О. З. Шур**, канд. техн наук; **М. В. Мурашов**, д-р техн. наук **А. Г. Цуркан**, канд. техн. наук; **А. А. Головнин** канд. техн. наук; **О. А. Головнина**

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. № 1571

УДК 621—192:006.354 Группа Т51

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

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 treatement. 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.

Издание официальное ★

Перепечатка воспрещена

© Издательство стандартов, 1979

4. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ

4.1. Определение статистических характеристик нагруженности состоит из следующих этапов:

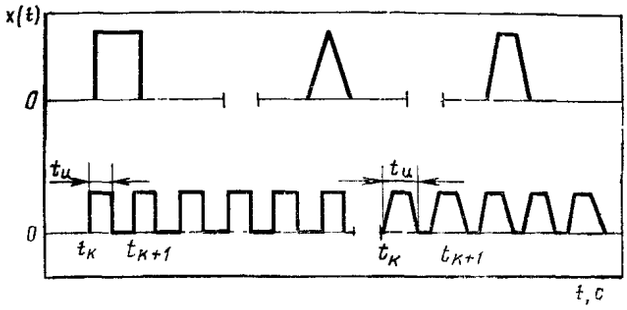
вычисления оценок характеристик нагруженности с применением в зависимости от метода схематизации аппарата математической статистики или аппарата теории случайных процессов;

оценки точности и достоверности полученных данных.

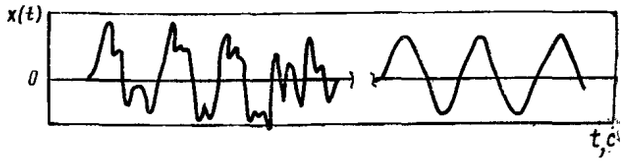
ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Рекомендуемое

Термины, применяемые в настоящем стандарте, и их определения

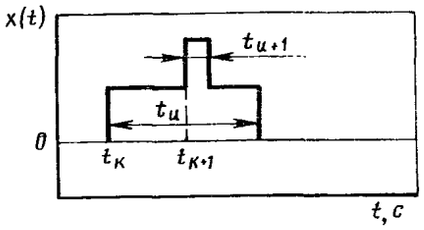
Термин	Определение	Примечание
1. Нагруженность	Состояние машин и механизмов, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования	
2. Схематизация нагруженности	Представление нагруженности в упрощенном виде для получения статистических характеристик нагруженности на основе определенных допущений, 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 обусловливается 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 $t_{k+1}-t_k \ll t_u$ (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 $t_{\lambda+1}=t_\lambda+\Delta t$, $\lambda=1,2\ldots$	
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	



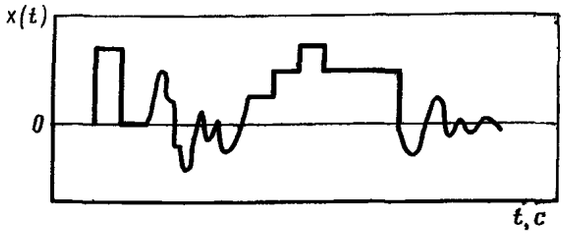
Черт. 1



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 наблюденных 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 (TM), запаса усталостной долговечности (AKM) и запаса усталостной прочности (ANM).

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 $\varepsilon_r \leqslant 20\%$.

Ошибку вычисления определяют по формуле

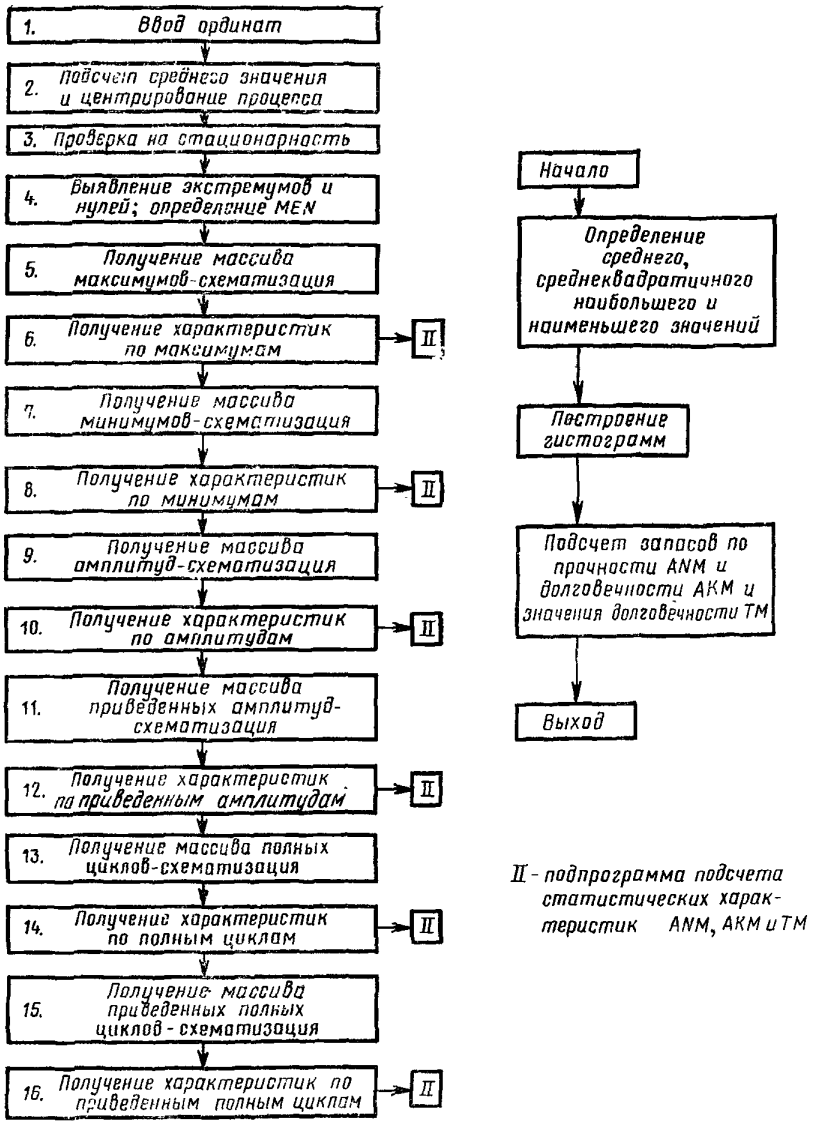
$$\varepsilon_r^2=\frac{C_m}{N},$$

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

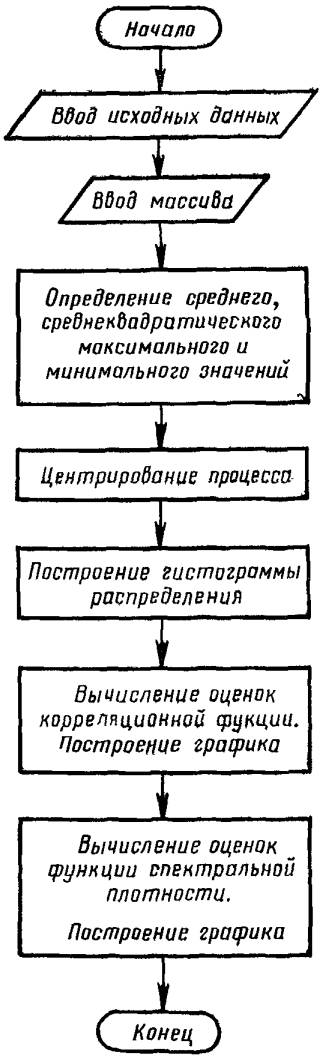
$m=100$ — число шагов при вычислении корреляционной функции;

$N=1007$ — количество точек в реализации.

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


1. Ввод ординат
2. Подсчет среднего значения и центрирование процесса
3. Проверка на стационарность
4. Выявление экстремумов и нулей; определение MEN
5. Получение массива максимумов-схематизация
6. Получение характеристик по максимумам
7. Получение массива минимумов-схематизация
8. Получение характеристик по минимумам
9. Получение массива амплитуд-схематизация
10. Получение характеристик по амплитудам
11. Получение массива приведенных амплитуд-схематизация
12. Получение характеристик по приведенным амплитудам
13. Получение массива полных циклов-схематизация
14. Получение характеристик по полным циклам
15. Получение массива приведенных полных циклов - схематизация
16. Получение характеристик по приведенным полным циклам
II
Начало
Определение среднего, среднеквадратичного наибольшего и наименьшего значений
Построение гистограмм
Подсчет запасов по прочности ANM и долговечности AKM и значения долговечности TM
Выход
II - подпрограмма подсчета статистических характеристик ANM, AKM и TM

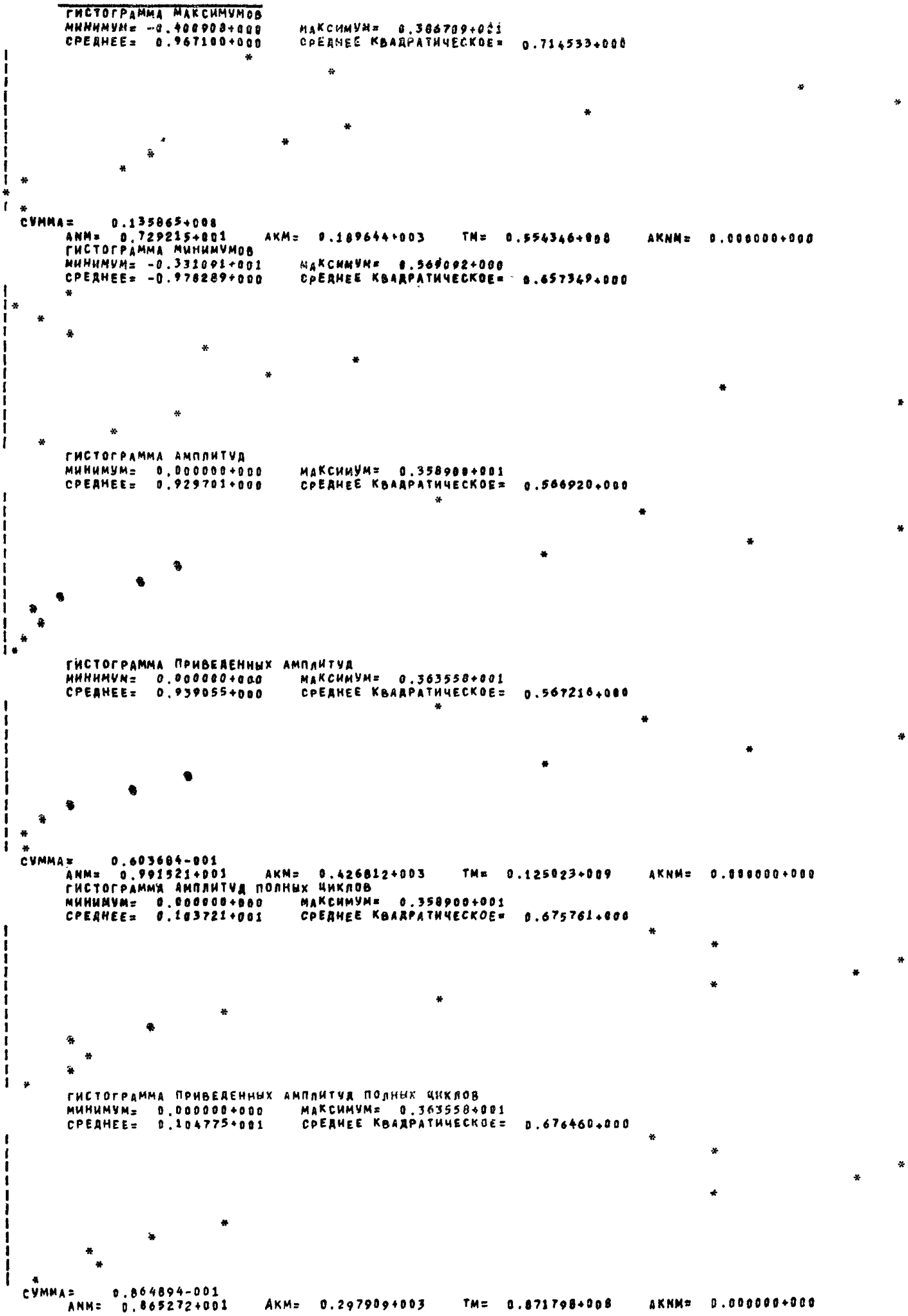
Черт. 1


Начало
Ввод исходных данных
Ввод массива
Определение среднего, среднеквадратического максимального и минимального значений
Центрирование процесса
Построение гистограммы распределения
Вычисление оценок корреляционной фукции. Построение графика
Вычисление оценок функции спектральной плотности.
Построение графика
Конец

Черт. 2

```
        О Б Р А Б О Т К А   О С Ц И Л Л О Г Р А М М


        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
  8.400908+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  4.3890-001  5.3395-00
  8.6629-001  5.6440-001  4.6705-001  8.3915-001  1.5510+000  1.5556+000  1.2738+000  4.9004-001  6.8806-001  1.2800+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 -2.8679-001
 -1.2045-002  6.9983-001
  4.2258-001 -3.6116-001
 -1.6314-001  4.2877-001

КОЛИЧЕСТВО СЕРИЙ
```

Черт. 3


ГИСТОГРАММА МАКСИМУМОВ
МИНИМУМ= -0.400908+000 МАКСИМУМ= 0.386709+001
СРЕДНЕЕ= 0.967100+000 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.714533+000
СУММА= 0.135865+008
ANM= 0.729215+001 AKM= 0.189644+003 TM= 0.554346+008 AKNM= 0.000000+000
ГИСТОГРАММА МИНИМУМОВ
МИНИМУМ= -0.331091+001 МАКСИМУМ= 0.569092+000
СРЕДНЕЕ= -0.978289+000 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.657349+000
ГИСТОГРАММА АМПЛИТУД
МИНИМУМ= 0.000000+000 МАКСИМУМ= 0.358900+001
СРЕДНЕЕ= 0.929701+000 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.566920+000
ГИСТОГРАММА ПРИВЕДЕННЫХ АМПЛИТУД
МИНИМУМ= 0.000000+000 МАКСИМУМ= 0.363558+001
СРЕДНЕЕ= 0.939055+000 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.567216+000
СУММА= 0.603604-001
ANM= 0.991521+001 AKM= 0.426812+003 TM= 0.125023+009 AKNM= 0.000000+000
ГИСТОГРАММА АМПЛИТУД ПОЛНЫХ ЦИКЛОВ
МИНИМУМ= 0.000000+000 МАКСИМУМ= 0.358900+001
СРЕДНЕЕ= 0.103721+001 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.675761+000
ГИСТОГРАММА ПРИВЕДЕННЫХ АМПЛИТУД ПОЛНЫХ ЦИКЛОВ
МИНИМУМ= 0.000000+000 МАКСИМУМ= 0.363558+001
СРЕДНЕЕ= 0.104775+001 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.676460+000
СУММА= 0.864894-001
ANM= 0.865272+001 AKM= 0.297909+003 TM= 0.871798+008 AKNM= 0.000000+000

Черт. 4

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

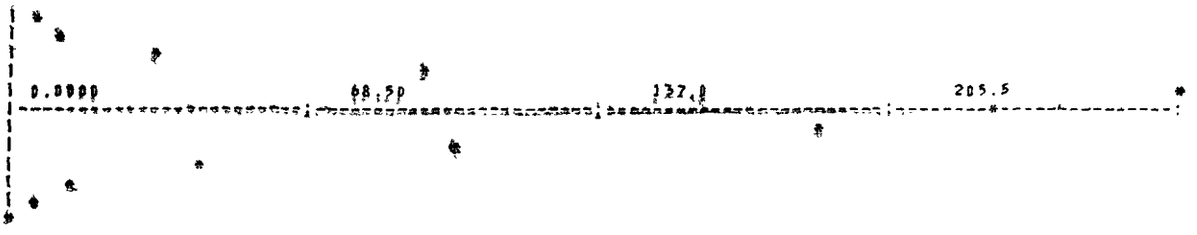
ДЛИНА МАССИВА 1007
ШАГ КВАНТОВАНИЯ 0.5000000-001 СЕК
ЧАСТОТА НАЙКВИСТА 0.1000000+002 ГЦ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА

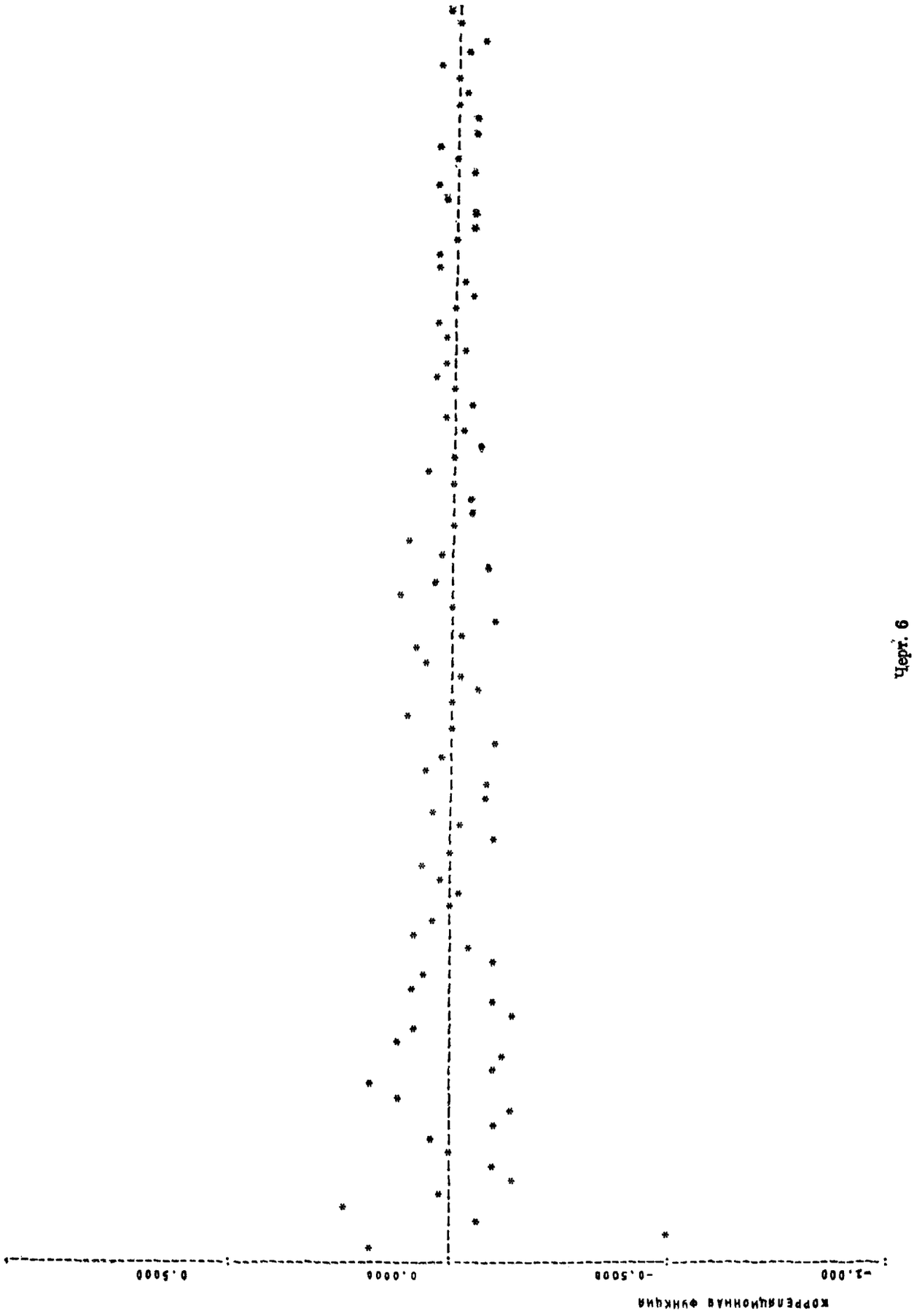
СРЕДНЕЕ 0.4023560+002 0.2926848+001
ДИСПЕРСИЯ 0.8566438+004 СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЕ 0.9255506+002 0.2485320+001
ВАРИАЦИЯ 0.2300327+001
АСИММЕТРИЯ 0.1070183+000 0.7745996-001 ЭКСЦЕСС 0.8841941+000 0.1549199+000

ГИСТОГРАММА ПРОЦЕССА

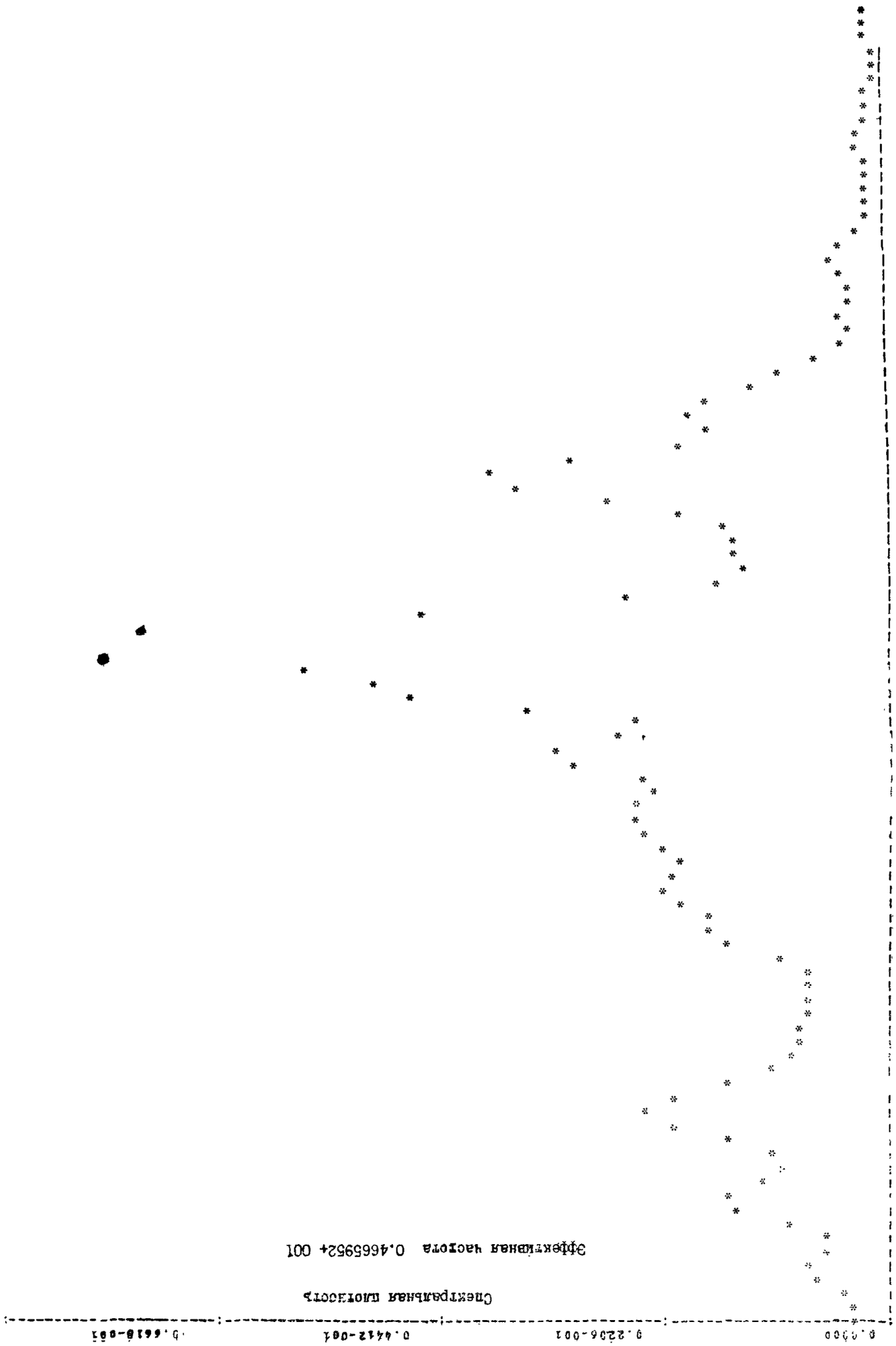
МИНИМУМ= -0.331091+003 МАКСИМУМ= 0.386709+003
СРЕДНЕЕ= -0.287131+001 СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ= 0.977560+002



Черт. 5



Черт. 6


0.0000
0.2206-001
0.4412-001
0.6618-001
Центральная плотность
Эффективная частота 0.4665952+ 001

Черт. 7

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

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

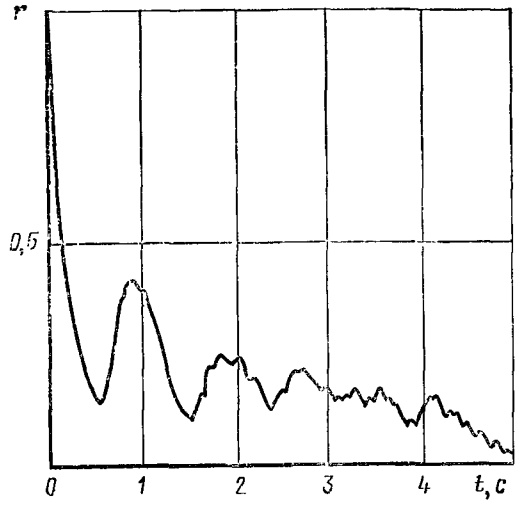
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТИ

1.1. Характер нагруженности — непрерывный.

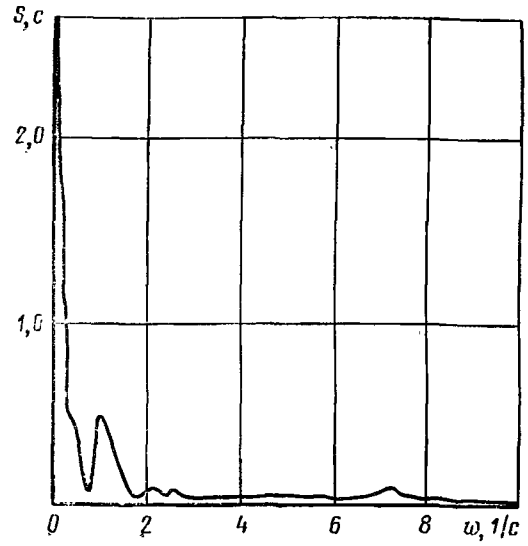
1.2. Вид нагруженности — случайный.

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 $a=0{,}3$ $^1/_с$ пика на кривой спектральной плотности (на уровне половинной энергии) определяют необходимый интервал корреляции (τ) 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^2;

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

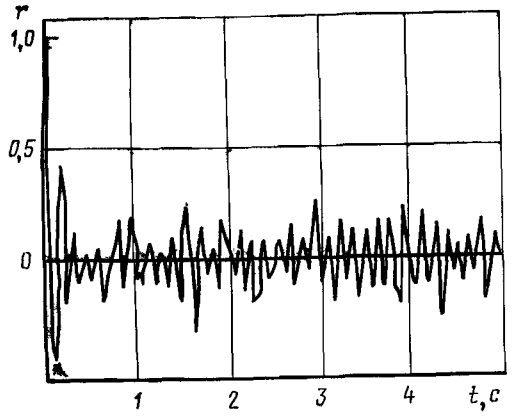
Вид корреляционной функции обусловлен наличием в исследуемой нагруженности периодических колебаний с частотой 7 Гц.

Оценки статистических характеристик исходной нагруженности (до схематизации) следующие:

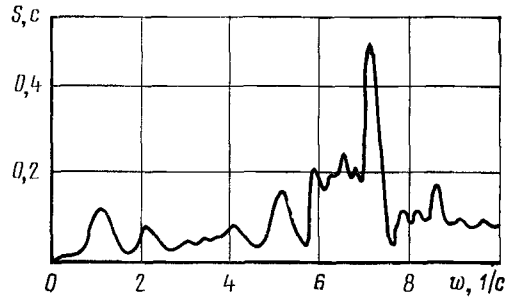
математическое ожидание $m=11{,}26$ кН;

дисперсия $D=3{,}29$ кН^2;

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 $\varepsilon_r<30\%$.

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

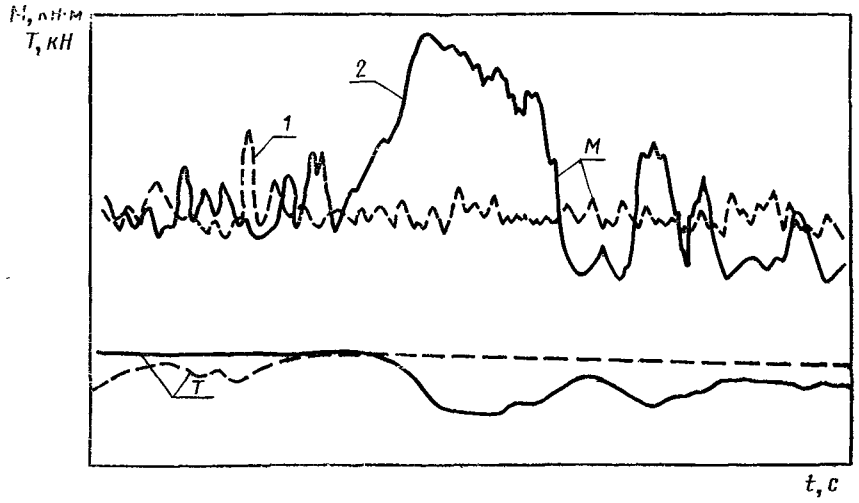
1.1. Нагруженность характеризуется двумя процессами:
изменением крутящего момента M на корчующем роторе;
изменением тягового усилия T на сцепном устройстве (черт. 12).

1.2. Характер нагруженностей — непрерывные.

1.3. Вид нагруженностей — случайные.

1.4. Визуальный просмотр реализиций 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 беспнистой 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 $a=0{,}4\ ^1/_{\text{с}}$ пика на кривой спектральной плотности (на уровне половинной энергии) определяют необходимый интервал корреляции (τ) при применении сглаживающего окна Бартлетта с шириной $b_1=1{,}5$ по формуле

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

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 $D_M=15{,}867$ кН², $D_T=52{,}491$ кН²;

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·м², $D_T=582{,}672$ кН²;

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 $\left(\frac{\nu}{\chi^2_{\nu,(1-\alpha)}}\ ,\ \frac{\nu}{\chi^2_{\nu,(\alpha)}}\right)$ и погрешность $\varepsilon_r\leqslant 30\%$.

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.

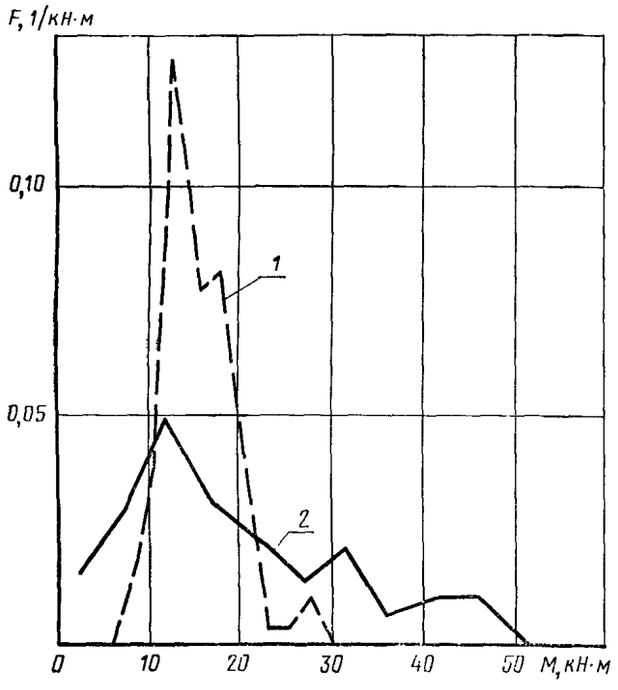
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАГРУЖЕННОСТЕЙ

1.1. Характер нагруженностей — непрерывные.

1.2. Вид нагруженностей — случайные.

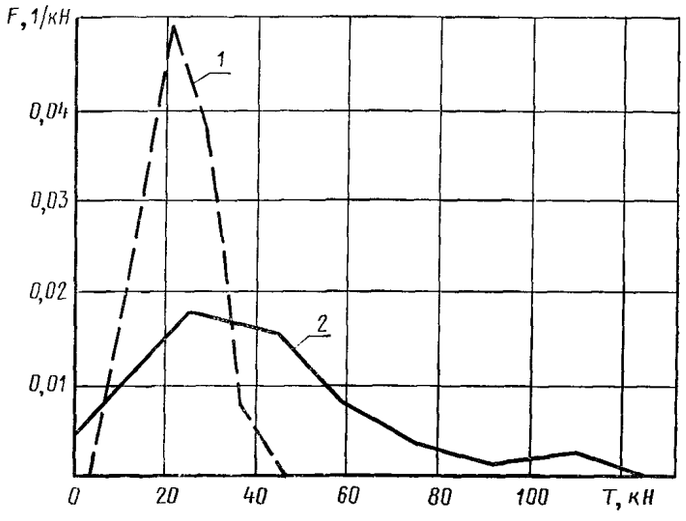
1.3. Визуальный просмотр реализаций нагруженностей показал, что они нестационарны по математическому ожиданию и обусловлено это уклоном шахтной дороги.

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



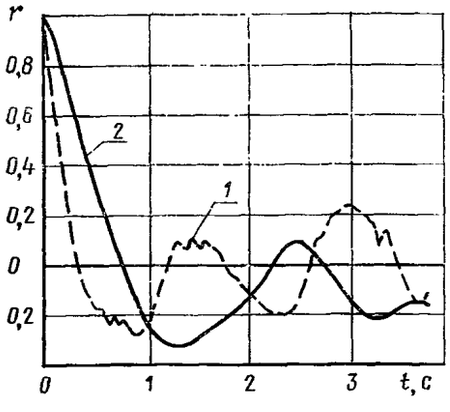
1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 13



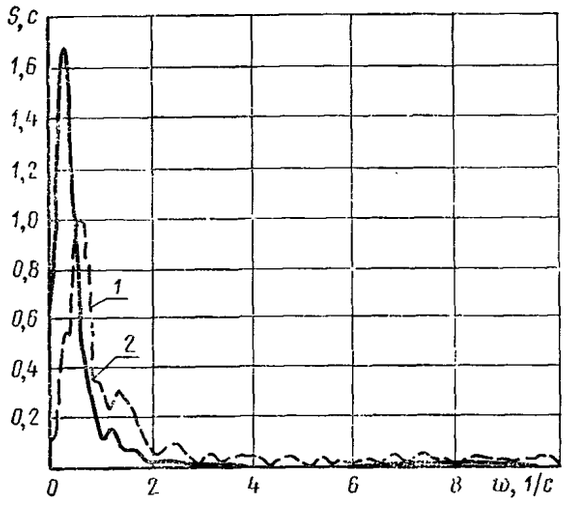
1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 14



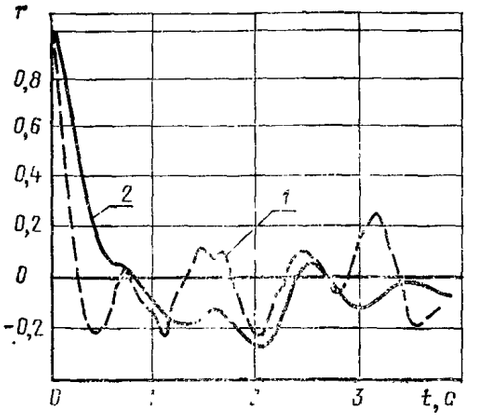
1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 15



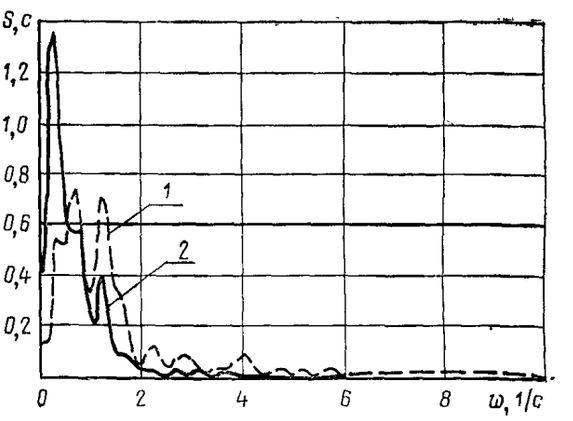
1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 16



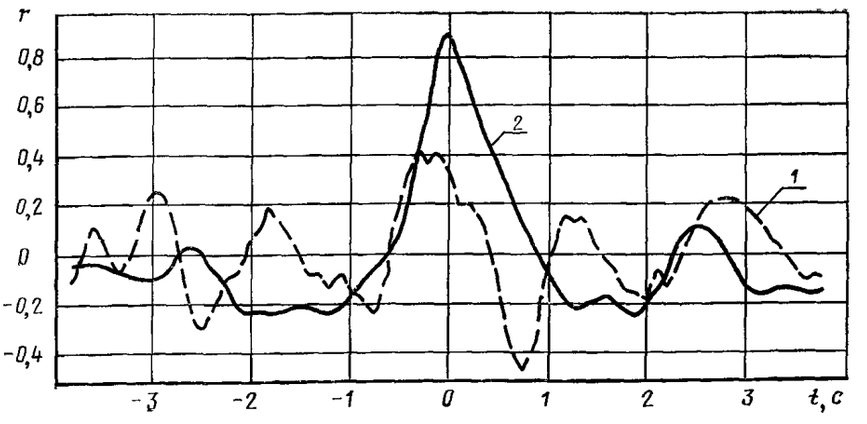
1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 17



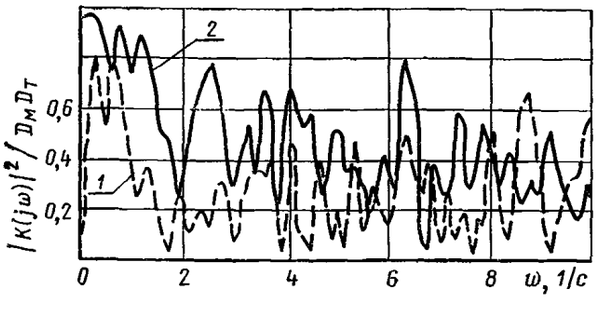
1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 18



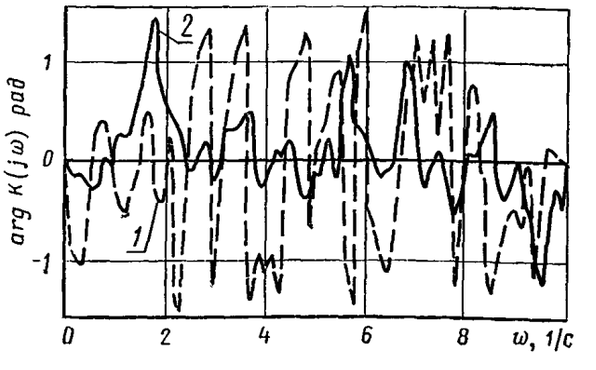
1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 19



1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 20



1—первый режим; *2*—второй режим

Черт. 21

2. СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОСТИ

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

Реализации нагруженностей 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 ϑ_1 и максимумов ϑ_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 $\varepsilon_r \leqslant 30\%$ 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 $\left(\frac{\nu}{\chi^2_{\nu,(1-\alpha)}}, \frac{\nu}{\chi^2_{\nu,(\alpha)}}\right)$ и погрешность $\varepsilon_r \leqslant 30\%$.

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.

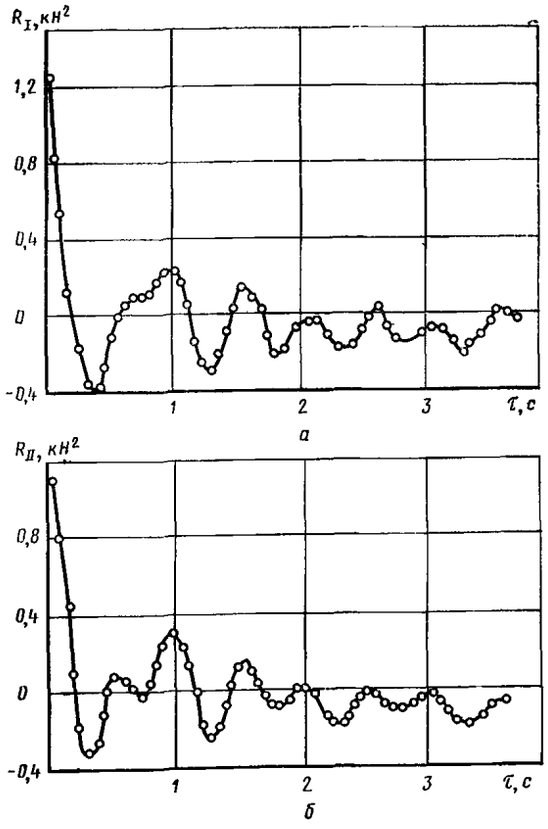
1.3. Процессы — стационарные, широкополосные.

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

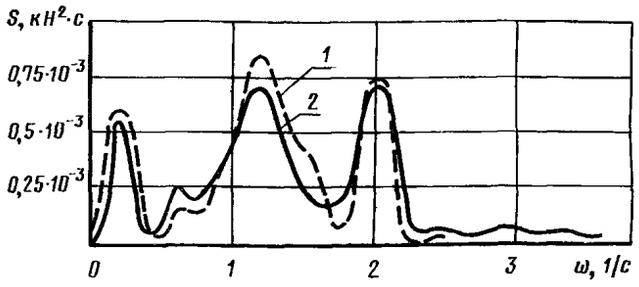
2.1. Непосредственная схематизация нагруженности выполнена методом амплитуд.

2.2. Для расчета показателей прочности и надежности необходимы характеристики спектральной плотности и 0,2,4-е спектральные моменты. Для получения этих характеристик выполнена схематизация с применением теории случайных процессов.



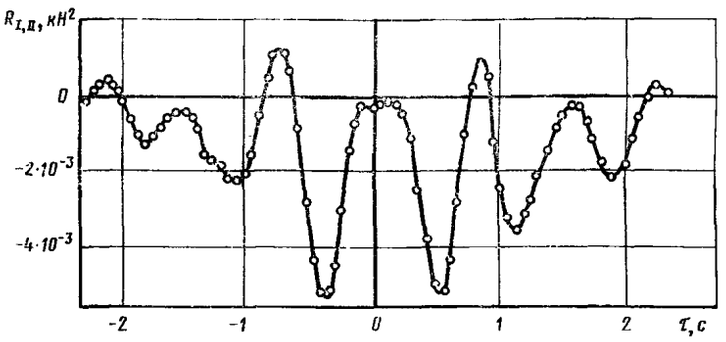
а—передний мост; *б*—задний мост

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 ε_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 широкополостности 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.

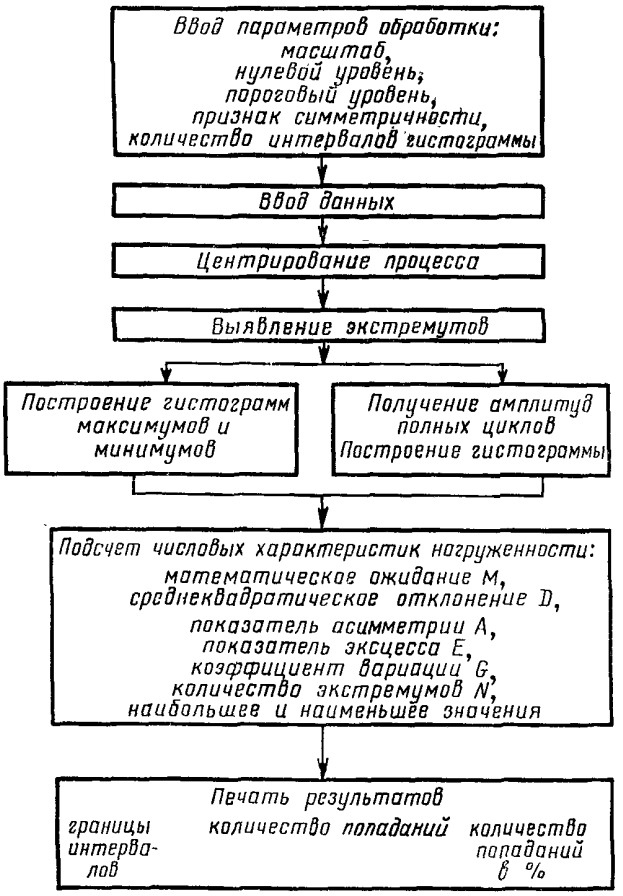
3.3. Оценка точности и достоверности полученных данных

Нормированную стандартную ошибку вычисления оценки спектральной плотности определяют по формуле

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

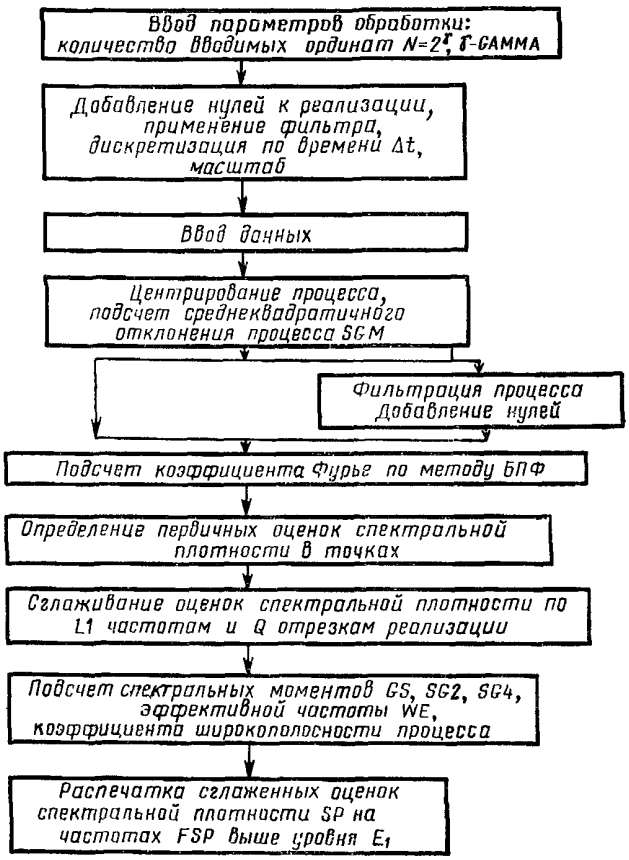
где L=5, Q=6 — параметры при сглаживании первичных оценок спектральной плотности комбинированным способом (осреднение по L смежным частотам и по Q отрезкам реализации). Погрешность ε_r<20% удовлетворяет заданному значению.

Блок-схема алгоритма статистической обработки

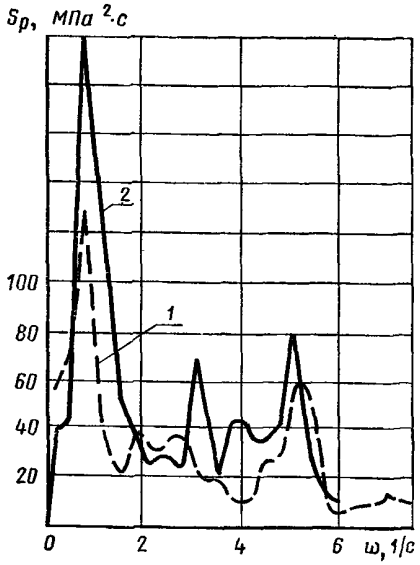


Черт. 25

Блок-схема алгоритма вычисления спектральной плотности и спектральных моментов

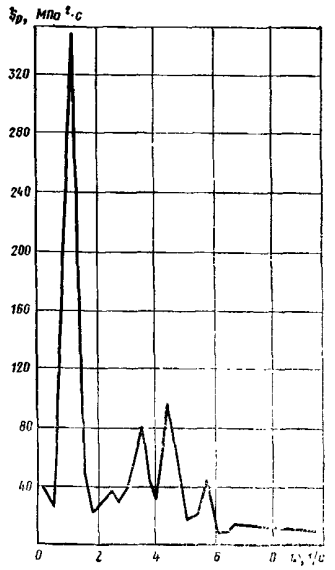


Черт. 26



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

```
 GAMMA
10
ДОБ.О
0
ФИЛЬТР
1
ДИСКРЕТИЗАЦИЯ DT
15
КОЭФ
6.44
MU
0
SGM=2868.087
L1
5
BEGIN
0
OUT
1
Q
6
E1
250
 FSP        SP
 .000    .20594E+02
 .195    .60007E+03
 .521    .75872E+03
 .846    .12914E+04
1.172    .31026E+03
1.497    .17954E+03
1.823    .39781E+03
2.148    .28932E+03
2.474    .35889E+03
2.799    .34591E+03
3.125    .19074E+03
3.451    .19471E+03
3.776    .82419E+03
4.102    .10460E+03
4.427    .27061E+03
4.753    .28737E+03
5.078    .62364E+03
5.404    .46106E+03
5.729    .50896E+02
6.055    .61505E+02
6.380    .70098E+02
6.706    .80461E+02
7.031    .12603E+03
7.357    .10502E+03
8.659    .49023E+02
SG=.27300E+04
SG2=.16289E+06
SG4=.81722E+08
WE= 7.72436
DW=  .93866
KW= 2.89975
```

80-89 км/ч

```
SGM=6250.972
L1
5
BEGIN
0
OUT
1
Q
4
E1
150
 FSP        SP
 .000    .14343E+01
 .195    .56874E+03
 .521    .44393E+03
 .846    .20273E+04
1.172    .11883E+04
1.497    .54571E+03
1.823    .39451E+03
2.148    .26825E+03
2.474    .30191E+03
2.799    .25053E+03
3.125    .70376E+03
3.451    .19701E+03
3.776    .42447E+03
4.102    .42139E+03
4.427    .34453E+03
4.753    .44524E+03
5.078    .78022E+03
5.404    .30187E+03
5.729    .16104E+03
6.055    .10370E+03
6.380    .85205E+02
6.706    .12376E+03
7.031    .14072E+03
7.357    .58005E+02
7.682    .14776E+03
8.333    .57623E+02
8.659    .43747E+02
8.984    .38174E+02
19.08    .47301E+02
20.05    .39939E+02
21.03    .71263E+02
22.01    .41594E+02
SG=.38735E+04
SG2=.23135E+06
SG4=.11662E+09
WE= 7.72821
DW=  .93890
KW= 2.90526
```

90-99 км/ч

```
SGM=2578.753
L1
5
BEGIN
0
OUT
1
Q
5
E1
200
 FSP        SP
.000    .16769E+02
 .195    .18436E+03
 .521    .19510E+03
 .846    .39672E+03
1.172    .81141E+03
1.497    .61939E+03
1.823    .17596E+03
2.148    .32001E+03
2.474    .15175E+03
2.799    .28455E+03
3.125    .54681E+03
3.451    .45746E+03
3.776    .40890E+03
4.102    .51395E+03
4.427    .95563E+03
4.753    .16157E+03
5.078    .13461E+03
5.404    .11679E+03
6.380    .48241E+02
6.706    .63422E+02
8.659    .41034E+02
8.984    .54803E+02
9.310    .21972E+03
SG=.25722E+04
SG2=.14994E+06
 SG4=.66749E+08
WE= 7.63488
DW=  .93223
KM=2.76352
```

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

Черт. 29

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 стендовых (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 $\varkappa^2_{ZM}(\omega)$. 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 $\varkappa^2_{ZM}(\omega)$, $K(j\omega)$ 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 $\varkappa_{ZM}(\omega)$ пользовались приближенным распределением случайной величины

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

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

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

осредненную амплитудно-частотную характеристику

$$K(j\omega)=1\pm\sqrt{\frac{2}{\nu-2}\,f_{2,\nu-2}(1-\alpha)\,\frac{1-\hat{\varkappa}^2_{ZM}(\omega)}{\hat{\varkappa}^2_{ZM}(\omega)}},$$

осредненную фазочастотную характеристику

$$\arg K(j\omega)=\pm\operatorname{arc\,tg}\left(\sqrt{\frac{2}{\nu-2}\,f_{2,\nu-2}(1-\alpha)\,\frac{1-\hat{\varkappa}^2_{ZM}(\omega)}{\hat{\varkappa}^2_{ZM}(\omega)}}\right),$$

где ν — 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 вычисляют по формулам:

верхнюю границу

$$\hat{\varkappa}^{\text{в}}_{ZM}(\omega)=\frac{A_{\text{в}-1}}{A_{\text{в}+1}},$$

нижнюю границу

$$\hat{\varkappa}^{\text{н}}_{ZM}(\omega)=\frac{A_{\text{н}-1}}{A_{\text{н}+1}},$$

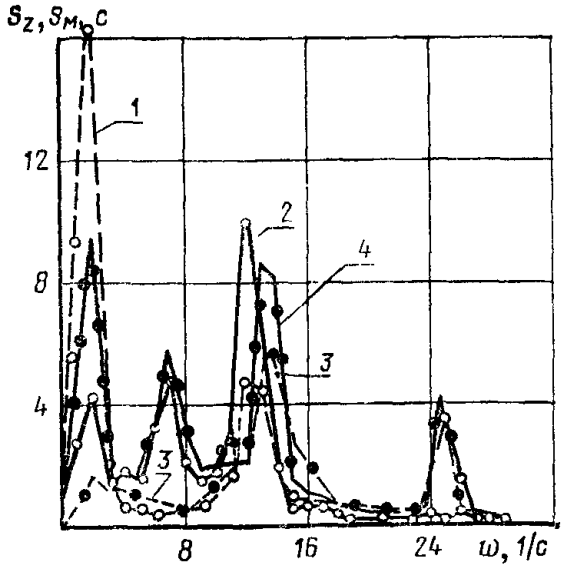
где

$$A_{\text{в}}=\frac{1+\hat{\varkappa}_{ZM}(\omega)}{1-\hat{\varkappa}_{ZM}(\omega)}e^{0{,}248};\qquad A_{\text{н}}=\frac{1+\hat{\varkappa}_{ZM}(\omega)}{1-\hat{\varkappa}_{ZM}(\omega)}e^{-0{,}248}.$$

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

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

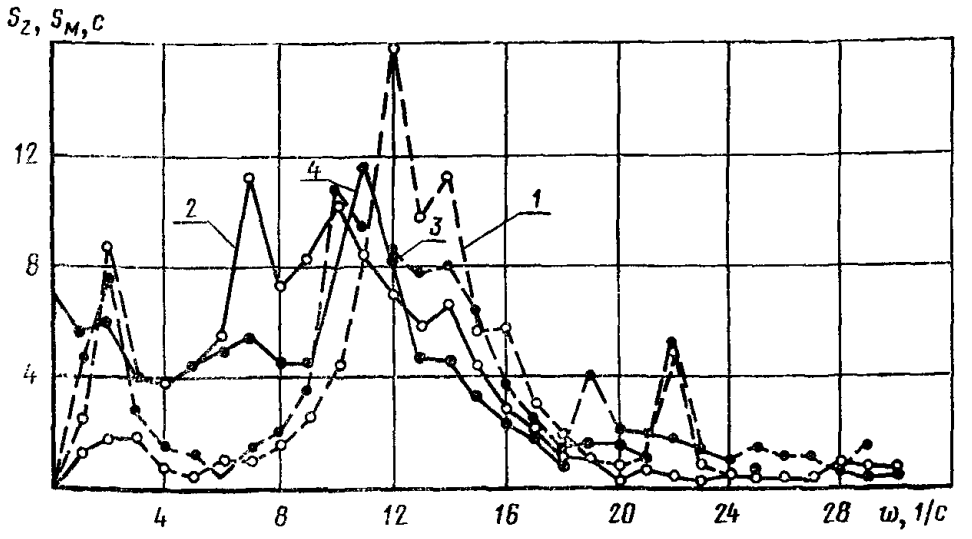
Черт. 30



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

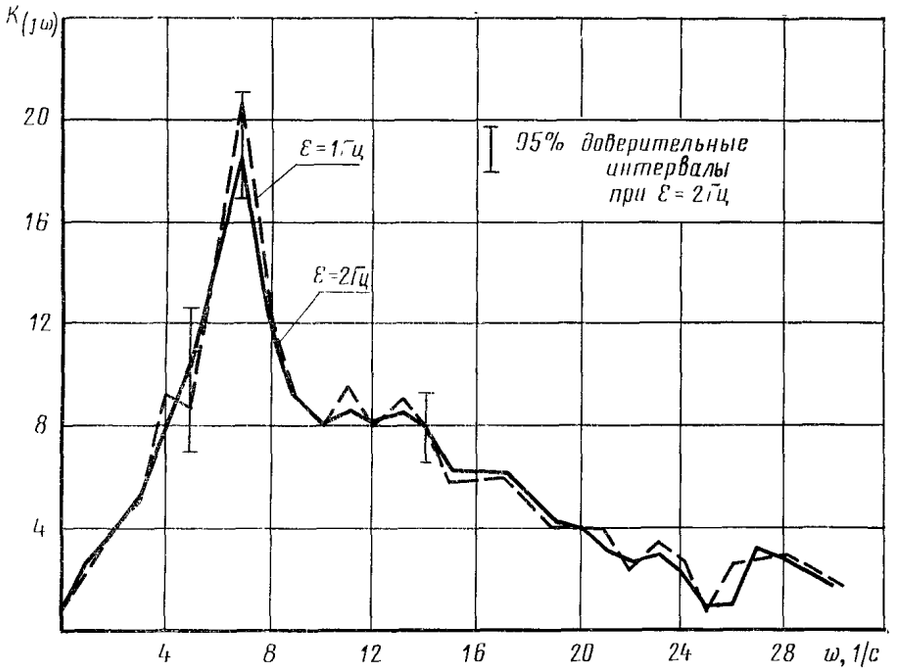
Черт. 31



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

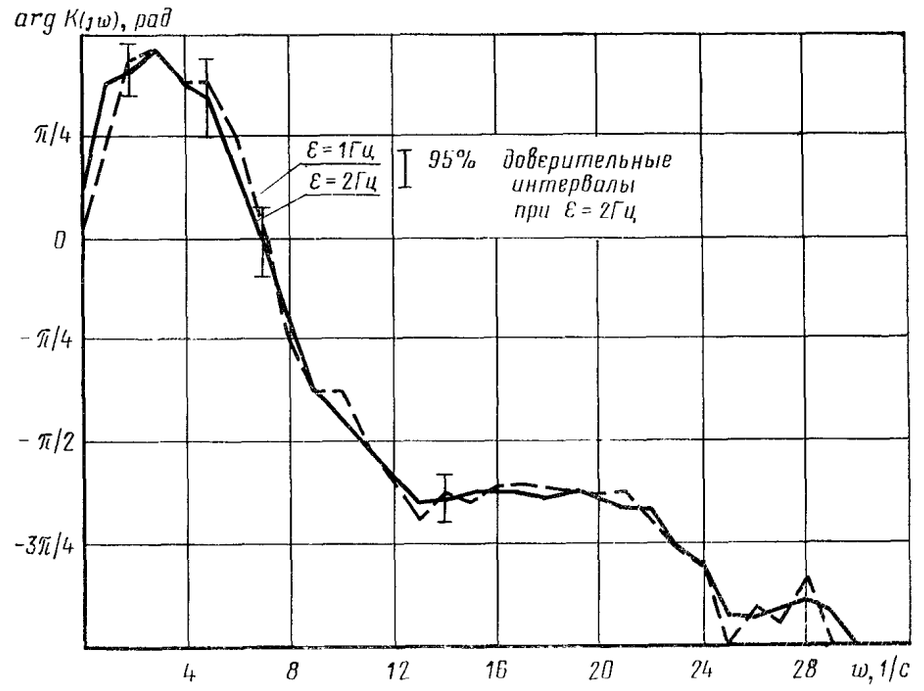
1, 3—вертикальная реакция на колесе; *2, 4*—крутящий момент на полуоси; *1, 2*—первый участок дороги; *3, 4*—второй участок дороги

Черт. 32



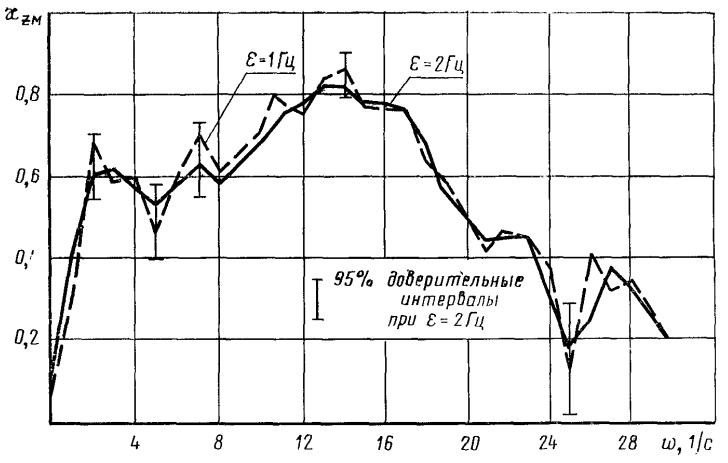
Осредненная оценка амплитудно-частотной характеристики системы

Черт. 33



Осредненная оценка фазочастотной характеристики системы

Черт. 34



Коэффициент корреляции на частотах системы

Черт. 35

gost.e-ecolog.ru