

Расчеты и испытания на прочность.

**МЕТОДЫ СХЕМАТИЗАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ
ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ И СТАТИСТИЧЕСКОГО
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**

**ГОСТ
25.101-83**

Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results

ОКСТУ 0025

Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 12 июля 1983 г. № 3066 срок действия установлен

с 01.07.84

до 01.07.94

Настоящий стандарт устанавливает методы схематизации случайных процессов нагружения, возникающих в условиях эксплуатации или испытаний элементов машин и конструкций, и статистического представления результатов схематизации.

Результаты схематизации используют для:

расчетной оценки усталостной долговечности элементов по критериям накопления усталостных повреждений на стадиях до появления макроскопической усталостной трещины и ее развития;

сравнительной оценки процессов нагружения однотипных элементов с целью выявления наиболее нагруженных элементов;

количественной оценки эксплуатационных режимов машин и конструкций по их повреждающему воздействию;

моделирования реального нагружения (ГОСТ 23604—79) элементов при испытаниях на усталость и расчетном определении характеристик их сопротивления усталости.

Настоящий стандарт не распространяется на методы вычисления корреляционных, автокорреляционных функций и спектральных плотностей процессов реального нагружения, а также методы выбора теоретического закона распределения и проверки согласия с эмпирическим распределением (ГОСТ 11.006—74).

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Объектом исследования является реализация случайного процесса нагружения элементов машин или конструкции (изменение во времени нормальных и касательных напряжений, сил, моментов, линейных и угловых деформаций и др.) $x(t)$, далее — процесса нагружения.

1.2. Схематизация процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистическое представление результатов схематизации включает следующие этапы:

предварительная подготовка процесса нагружения к схематизации;

дискретизация процесса нагружения (ГОСТ 23207—78);

вычисление статистических характеристик дискретной последовательности ординат процесса нагружения;

выделение экстремумов процесса по дискретной последовательности его ординат;

замена реального процесса нагружения схематизированным по выбранному методу схематизации;

получение эмпирических распределений нагрузок схематизированного процесса и вычисление основных статистических характеристик распределений.

Примечание. В зависимости от применяемых алгоритмов и технических средств допускается изменение последовательности и исключение этапов.

1.3. Схематизацию процессов нагружения проводят применительно к блоку нагружения (ГОСТ 23207—78), который соответствует совокупности последовательных значений переменных нагрузок, возникающих в элементе конструкции за какой-либо характерный период эксплуатации (один полет самолета, l_6 километров пробега автомобиля по дороге определенного профиля, l_6 часов работы и т. д.).

1.4. Длительность записи или длина реализации процесса нагружения, соответствующая блоку нагружения, должна содержать не менее 1000 экстремумов n_6 процесса.

Примечание. Допускается проводить схематизацию для коротких процессов с числом экстремумов менее 1000. В этом случае рекомендуется оценивать погрешность, вносимую использованием недостаточно представительных по числу экстремумов реализаций.

1.5. При схематизации не учитывают колебания, амплитуда которых меньше половины ширины класса.

1.6. Термины и определения, применяемые в стандарте, соответствуют ГОСТ 23207—78, ГОСТ 21878—76, ГОСТ 23605—79. Условные обозначения приведены в обязательном приложении 1.

1.7. Теоретические основы стандарта приведены в справочном приложении 5.

2. ПОДГОТОВКА, ДИСКРЕТИЗАЦИЯ И ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ

2.1. Подготовка процесса нагружения к схематизации

2.1.1. Разбиение процесса нагружения на классы

Диапазон изменения нагрузок процесса

$$a_{\max} = X_{\max} - X_{\min} \quad (1)$$

разбивается равноотстоящими уровнями нагрузок на классы шириной.

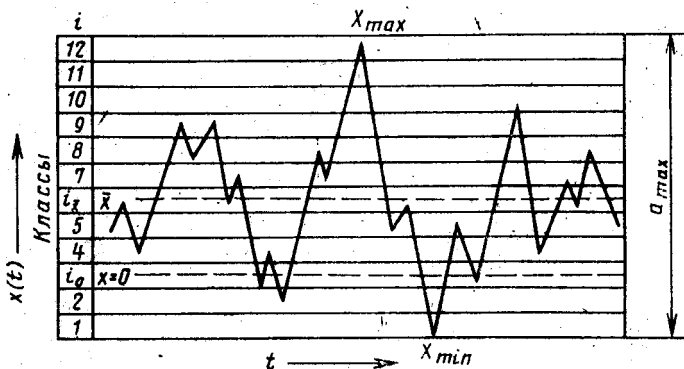
$$\Delta = \frac{a_{\max}}{m} \quad (2)$$

Величина Δ отражает масштаб при схематизации и показывает, какая нагрузка соответствует одному классу. Количество классов m должно удовлетворять неравенству

$$14 \leq m \leq 32.$$

Нумерация классов i производится снизу вверх в направлении возрастания нагрузок процесса, начиная с первого класса в области X_{\min} . Пример разбиения на классы показан на черт. 1.

Разбиение на классы



Черт. 1

Класс, в который попадает значение средней нагрузки \bar{x} , называется классом средней нагрузки и обозначается $i_{\bar{x}}$. Класс, в котором располагается значение нагрузки, равное нулю, обозначается i_0 .

Если величина нагрузки попадает на границу класса, то ее следует относить к классу с большим номером.

2.1.2. Определение максимальной частоты процесса F_{\max}

Для определения F_{\max} разбивают процесс на 20—50 равных фрагментов длительностью t_{ϕ} , измеряемой в секундах. В каждом фрагменте подсчитывают количество экстремумов. Соседние экстремумы, образующие размах меньше ширины класса, не подсчитывают. Значение F_{\max} определяют по формуле

$$F_{\max} = \frac{n_{\phi}}{2t_{\phi}}, \quad (3)$$

где n_{ϕ} — максимальное для рассмотренных фрагментов число экстремумов.

2.1.3. Определение минимальной длины процесса нагружения

Минимальную длину процесса нагружения, необходимую для схематизации, выбирают с учетом п. 1.4, что обеспечивает достаточную статистическую представительность результатов.

Примечание. Допускается выбирать из общей длины процесса нагружения несколько отдельно взятых участков, соответствующих каждому режиму нагружения, входящему в блок нагружения, при условии выполнения п. 1.4 для каждого участка (например, запись процесса нагружения элементов самолета за один полет может быть представлена участками руления, взлета, горизонтального полета и посадки).

2.2. Дискретизация процесса нагружения

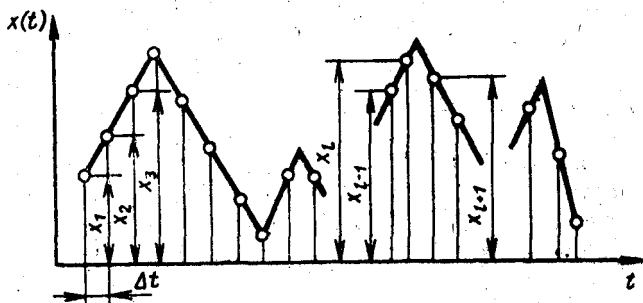
Проведению схематизации предшествует дискретное представление процесса нагружения в виде последовательности ординат процесса для ввода цифровой информации в ЭВМ и вычисления статистических характеристик.

Дискретизация может осуществляться методом случайных ординат или методом пересечений.

2.2.1. Дискретизация по методу случайных ординат

На черт. 2 показана дискретизация по методу случайных ординат. Значения процесса нагружения $x(t)$ определяют через равные промежутки времени Δt , в результате получают случайную последовательность ординат процесса нагружения.

Дискретизация по методу случайных ординат



Черт. 2

Интервал дискретизации Δt определяют по формуле

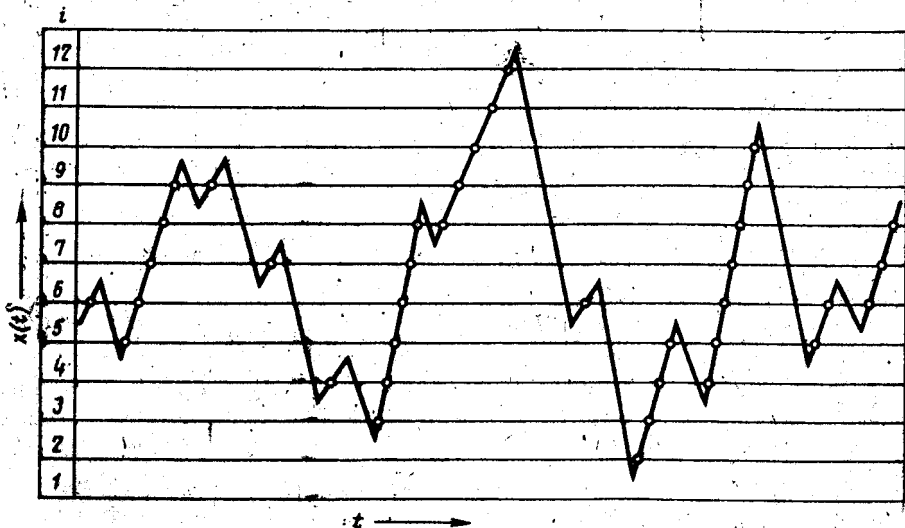
$$\Delta t = \frac{1}{(5-10)F_{\max}} \quad (4)$$

2.2.2. Дискретизация по методу пересечений

При дискретизации по методу пересечений ординаты процесса нагружения определяют в момент пересечения верхней границы класса восходящей или нисходящей ветвями процесса. На черт. 3 иллюстрируется дискретизация по восходящим ветвям процесса.

Примечание. Допускается использовать метод пересечений для схематизации процесса нагружения (справочное приложение 2).

Дискретизация по методу пересечений



Черт. 3

2.3. Оценка статистических характеристик процесса нагружения

Для выбора метода схематизации, ее проведения и общей характеристики процесса нагружения вычисляют ряд статистических характеристик по последовательности ординат процесса: среднее арифметическое значение процесса нагружения (средняя нагрузка) \bar{x} , вычисляют как выборочное среднее по ГОСТ 11.004—74;

дисперсию процесса нагружения S^2 , вычисляют как выборочную дисперсию по ГОСТ 11.004—74;

среднее квадратическое отклонение процесса нагружения S , вычисляют как выборочное среднее квадратическое отклонение по ГОСТ 11.004—74;

коэффициент нерегулярности процесса нагружения κ вычисляют согласно ГОСТ 23207—78 по формуле

$$\kappa = \frac{n_0}{n_s}, \quad (5)$$

где n_0 — число пересечений процессом уровня средней нагрузки;
 n_s — число экстремумов того же процесса.

3. МЕТОДЫ СХЕМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ

Методы схематизации устанавливают правила выделения цикла или полуцикла регулярного нагружения из исследуемого процесса нагружения.

Полуцикл нагружения составляет часть цикла регулярного нагружения (ГОСТ 23207—78), которая соответствует половине периода изменения нагрузки.

Схематизированная реализация случайного процесса нагружения (ГОСТ 23207—78), далее — схематизированный процесс, представляет собой совокупность выделенных по одному из методов схематизации циклов или полуциклов нагружения.

Последовательность нагрузок x_{s_j} в схематизированном процессе может быть представлена:

при однопараметрической схематизации — последовательностью амплитуд x_{a_j} или размахов выделенных циклов a_j ;

при двухпараметрической схематизации — корреляционной таблицей (п. 3.3.2) или последовательностью приведенных к симметричному циклу нагружения амплитуд x_{npj} . Полученную по методу схематизации последовательность нагрузок группируют по интервалам, образуя эмпирическое распределение частот повторения нагрузок схематизированного процесса $h(x_s)$ (п. 5.1).

3.1. Выделение экстремумов

Непосредственно перед схематизацией по любому из методов должно проводиться выделение экстремумов. Соседние экстремумы, образующие размах меньше ширины класса, выделению не подлежат.

3.2. Однопараметрические методы схематизации

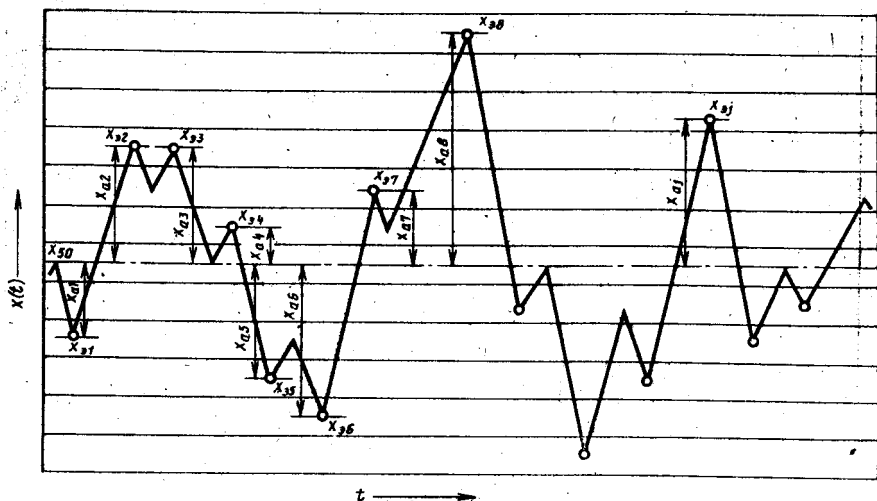
3.2.1. Метод экстремумов

По данному методу рассматривают все положительные максимумы и все отрицательные минимумы (ГОСТ 23207—78) процесса нагружения. На черт. 4 иллюстрируется выделение амплитуд по методу экстремумов. За амплитуды нагружения принимают

модуль разности каждого из указанных экстремумов $x_{эj}$ и медианой экстремумов процесса нагружения x_{50} (ГОСТ 23207—78)

$$x_{aj} = |x_{эj} - x_{50}|. \quad (6)$$

Схематизация по методу экстремумов



Черт. 4

По последовательности значений x_{aj} определяют распределение частот повторения амплитуд полуциклов нагружения $h(x_a)$.

3.2.2. Метод максимумов

По данному методу рассматривают все положительные максимумы. На черт. 5 иллюстрируется схематизация по методу максимумов. За амплитуды нагружения принимают разность

$$x_{aj} = x_{\max j} - x_{50}. \quad (7)$$

По последовательности значений x_{aj} определяют распределение частот повторения амплитуд циклов $h(x_a)$.

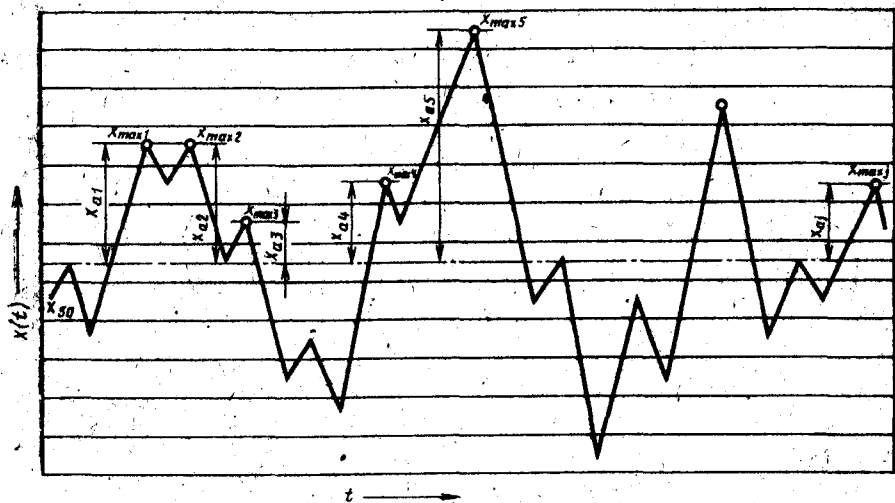
3.2.3. Метод минимумов

По данному методу рассматривают все отрицательные минимумы. На черт. 6 иллюстрируется схематизация по методу минимумов. За амплитуду принимают разность

$$x_{aj} = x_{50} - x_{\min j}. \quad (8)$$

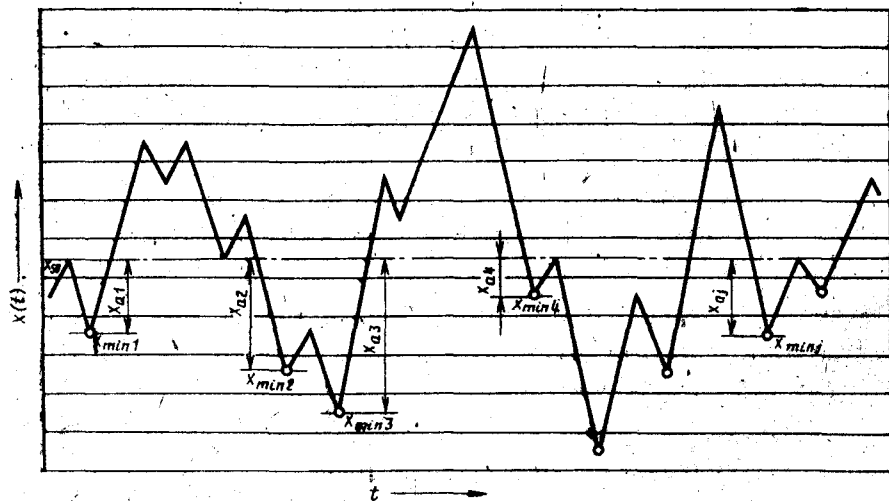
По последовательности значений x_{aj} определяют распределение частот повторения амплитуд циклов $h(x_a)$.

Схематизация по методу максимумов



Черт. 5

Схематизация по методу минимумов



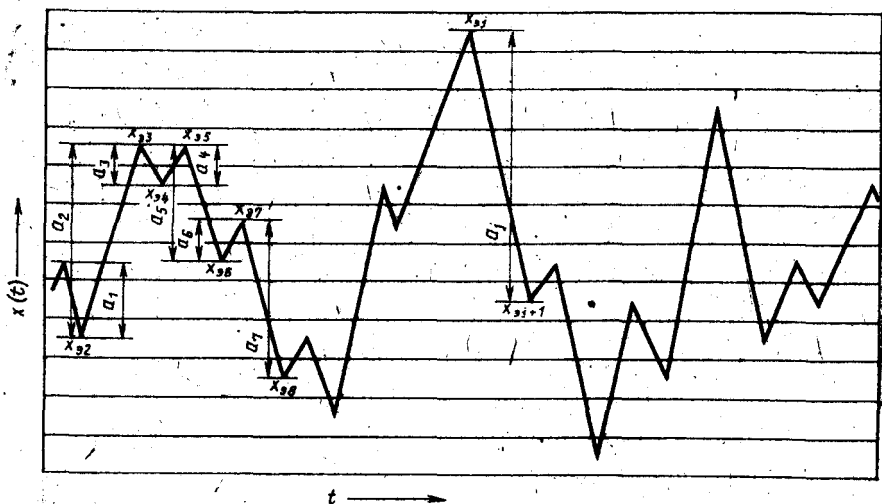
Черт. 6

3.2.4. Однопараметрический метод размахов

На черт. 7 иллюстрируется схематизация по однопараметрическому методу размахов. За размах принимают абсолютное значение разности следующих друг за другом экстремумов

$$a_j = |x_{э_{j+1}} - x_{э_j}| \quad (9)$$

Схематизация по однопараметрическому методу размахов



Черт. 7

Учитывают размахи как на восходящих, так и на нисходящих ветвях процесса. Амплитуды полуцикла нагружения определяют как половину размаха

$$x_{aj} = \frac{a_j}{2} \quad (10)$$

Примечание. Допускается проводить схематизацию только по восходящим или по нисходящим ветвям процесса.

3.3. Двухпараметрические методы схематизации

При двухпараметрической схематизации результат представляют либо в виде корреляционной таблицы, либо в виде распределения приведенных амплитуд.

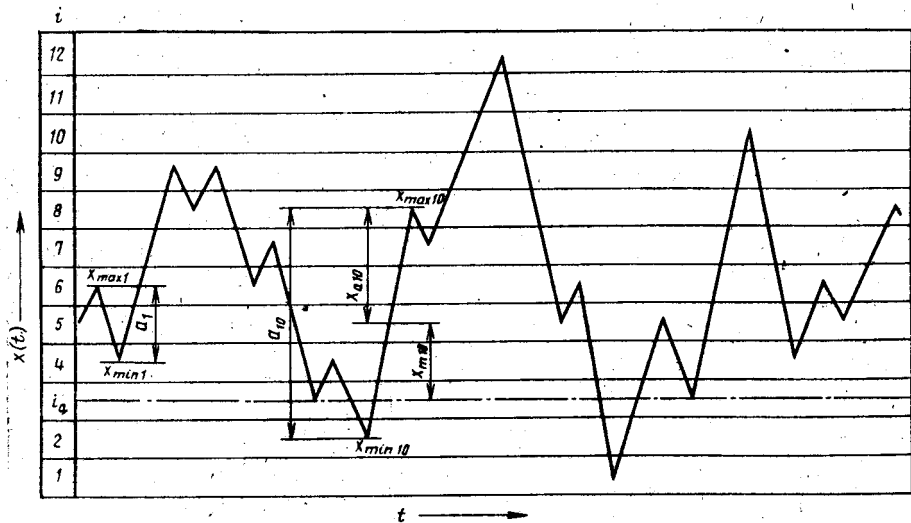
3.3.1. Двухпараметрический метод размахов

Схематизацию по этому методу проводят аналогично однопараметрическому методу размахов, однако учитывают не только величину размаха, но и положение размаха относительно нагруз-

ки, равной нулю. На черт. 8 показана схематизация по двухпараметрическому методу размахов. В результате схематизации заполняют корреляционную таблицу (п. 3.3.2). Схематизацию проводят по восходящим и нисходящим ветвям процесса нагружения.

Примечание. Допускается проводить схематизацию только по восходящим или по нисходящим ветвям процесса.

Схематизация по двухпараметрическому методу, размахов



Черт. 8

3.3.2. Корреляционная таблица

Корреляционная таблица является одной из форм представления результата при двухпараметрической схематизации. В каждой ее клетке содержится накопленное число выделенных циклов или полуциклов нагружения. Величина интервала разбиения каждого параметра корреляционной таблицы равна или кратна ширине класса Δ .

Допускается использовать две формы корреляционной таблицы:

корреляционная таблица максимумов и минимумов (параметрами таблицы являются максимумы и минимумы выделенных циклов или полуциклов);

корреляционная таблица амплитуд и средних значений (параметрами таблицы являются амплитуда и среднее выделенных циклов или полуциклов).

При заполнении корреляционной таблицы указывают, построена она для циклов или для полуциклов.

3.3.2.1. Корреляционная таблица максимумов и минимумов.

Корреляционная таблица максимумов и минимумов показана в табл. 1. По вертикали сверху вниз и по горизонтали слева направо указывают номера классов.

Регистрацию j -го цикла (полуцикла) производят в клетке корреляционной таблицы с координатами; по вертикали — номер класса ($i_{x_{max}}$), в который попадает максимум; по горизонтали — номер класса ($i_{x_{min}}$), в который попадает минимум. Табл. 1 за-

Таблица 1

Корреляционная таблица максимумов и минимумов

$h(x_{max})$	$i_{x_{max}}$													
—	1													
—	2													
—	3													
2	4		+	+										
2	5	+		+										
3	6	+			+	+								
4	7				+	+		++						
3	8		+					+	+					
4	9					+		+		++				
√2	10				+	+								
	11													
2	12							+						
$i_{x_{min}}$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$h(x_{min})$		2	2	4	4	2	4	2	2	—	—	—	—	
$\frac{x'_a}{\Delta}$		—	—	—	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	—	
$h(x_a)$		—	—	—	—	2	2	3	2	2	4	7	—	

полнена для полуциклов процесса нагружения, изображенного на черт. 8 при схематизации его по двухпараметрическому методу размахов. Так, например, полуцикл с размахом a_1 попадает в заштрихованную в табл. 1 клетку, поскольку x_{\max} лежит в классе № 6, а x_{\min} — в классе № 4. В данном примере ширина класса и интервала совпадают.

На основании корреляционной таблицы максимумов и минимумов могут быть получены три однопараметрических распределения:

суммирование содержимого клеток в таблице в направлении строк дает распределение минимумов $h(x_{\min})$;

суммирование в направлении столбцов дает распределение максимумов $h(x_{\max})$;

суммирование в направлении диагоналей, указанных в табл. 1, дает распределение амплитуд $h(x_a)$.

3.3.2.2. Корреляционная таблица амплитуд и средних значений.

Амплитуду i_{x_a} и среднее значение i_{x_m} для j -го цикла (полуцикла) в единицах класса определяют по формулам:

$$i_{x_a} = \frac{i_{x_{\max}} - i_{x_{\min}}}{2}; \quad (11)$$

$$i_{x_m} = \frac{i_{x_{\max}} + i_{x_{\min}}}{2}. \quad (12)$$

Регистрацию j -го цикла (полуцикла) производят в клетке корреляционной таблицы с координатами: по вертикали i_{x_a} ; по горизонтали i_{x_m} .

Корреляционная таблица амплитуд и средних значений показана в табл. 2. Табл. 2 заполнена для полуциклов процесса нагружения, изображенного на черт. 8 при схематизации его по двухпараметрическому методу размахов. Например, полуцикл с размахом a_{10} попадает в заштрихованную клетку таблицы, поскольку амплитуда полуцикла $i_{x_a} = 3,0$, а среднее цикла $i_{x_m} = 5,0$.

На основании корреляционной таблицы амплитуд и средних значений могут быть получены два однопараметрических распределения:

суммирование по строкам таблицы дает распределение амплитуд $h(x_a)$;

суммирование по столбцам таблицы дает распределение средних значений циклов (полуциклов) $h(x_m)$.

3.3.3. Методы выделения полных циклов

К методам выделения полных циклов относят:

метод полных циклов;

метод «дождя».

Таблица 2

Корреляционная таблица амплитуд и средних значений

$h(x_a)$	x_a/Δ														
2	3,5							+					+		
2	3,0				+			+							
3	2,5		+					+						+	
2	2,0	+			+										
2	1,5					+				+					
4	1,0	+		+		+				+					
7	0,5		+			+		++		+		++			
x_m/Δ		3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
$h(x_m)$		2	2	1	-	3	2	-	4	2	2	-	3	-	1

Оба метода приводят к практически одинаковым результатам. Допускается применять методы выделения полных циклов и при однопараметрической схематизации.

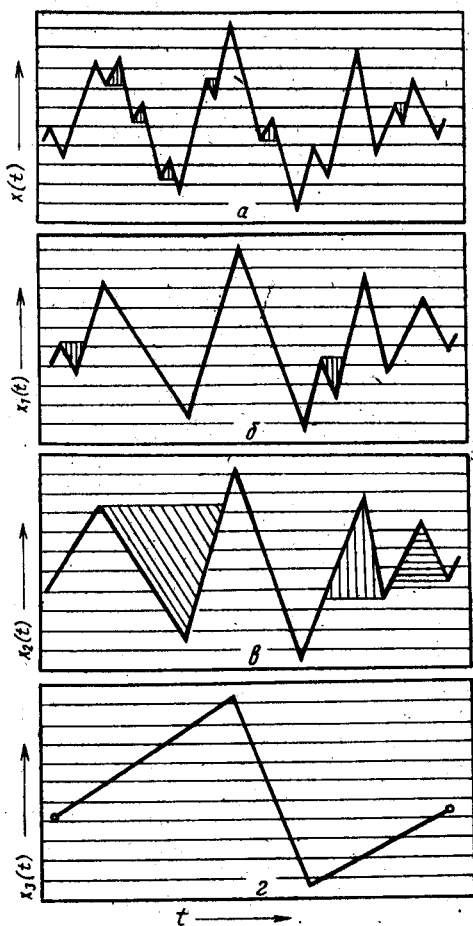
3.3.3.1. Метод полных циклов.

По данному методу осуществляют выделение циклов постепенно в несколько просмотров, начиная с циклов с наименьшим размахом. На черт. 9 приведена схематизация по методу полных циклов. Исходный процесс нагружения показан на черт. 9а. Здесь вначале выделяют заштрихованные циклы с размахом $\Delta \leq a < 2\Delta$, которые регистрируют и из дальнейшего рассмотрения исключают. Процесс $x_1(t)$, изображенный на черт. 9б, получен из исходного $x(t)$ после исключения циклов с $\Delta \leq a < 2\Delta$. Затем выделяют циклы с $2\Delta \leq a < 3\Delta$ (черт. 9в). Процесс $x_2(t)$, изображенный на черт. 9в, получен из процесса $x_1(t)$ после исключения циклов с размахом $2\Delta \leq a < 3\Delta$. После исключения циклов с размахами $a \leq 7\Delta$ будет получен процесс $x_3(t)$, изображенный на черт. 9г. Процесс $x_3(t)$ представляет собой один цикл, образованный X_{\max} и X_{\min} с наибольшим размахом a_{\max} .

3.3.3.2. Метод «дождя».

Схематизация по методу «дождя» приведена на черт. 10. При схематизации удобно представить, что ось времени направлена вертикально вниз. Пусть линии, соединяющие соседние экстремумы — это последовательность крыш, по которым стекают потоки дождя. Номерам максимумов соответствуют нечетные числа, номерам минимумов — четные.

Схематизация по методу полных циклов



Черт. 9

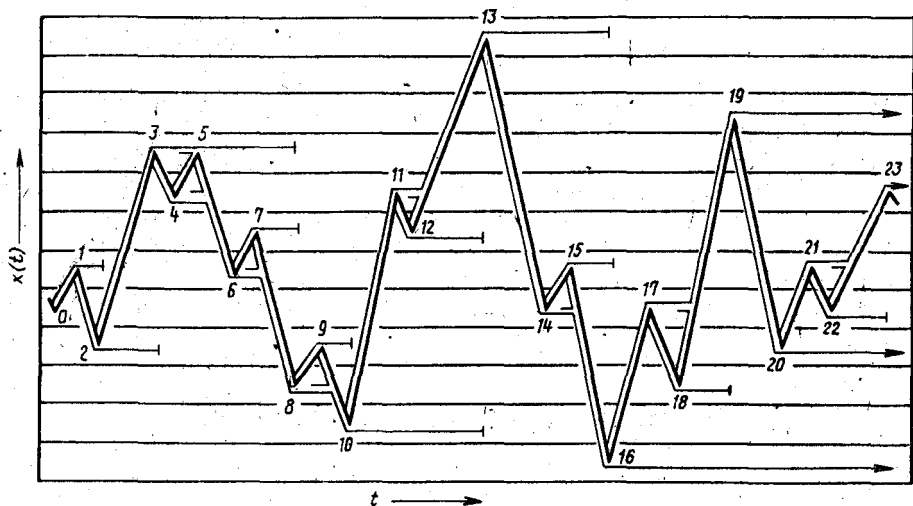
Траектории потоков определяют в соответствии со следующими правилами:

1. Потоки начинаются с внутренней стороны экстремумов последовательно. Каждый поток определяет полуцикл нагружения. Величину размаха определяют проекцией траектории потока на ось нагрузки.

2. Поток, начавшийся в точке максимума, прерывается в тот момент, когда встретится максимум, больший, чем исходный. На-

пример, поток из максимума 1 стекает по направлению к максимуму 2 и прерывается напротив максимума 3, поскольку он больше исходного.

Схематизация по методу «дождя»



Черт. 10

3. Поток, начавшийся в точке минимума, прерывается, когда встретится минимум меньший, чем исходный. Например, поток из точки 10 прерывается напротив 16, поскольку минимум 16 меньше исходного.

4. При встрече на одной из крыш нескольких потоков движение продолжает тот, который берет начало в экстремуме с меньшим номером, а остальные прерываются. Например, поток из точки 5 продолжает свой путь, а потоки из точек 7 и 9 прерываются.

5. Поток, не встретивший препятствий, падает на землю, например, поток из максимума 19.

Метод «дождя» позволяет ввести схематизацию в режиме реального времени. При этом запоминают лишь траектории потоков дождя и обработку производят по мере ввода экстремумов.

3.4. Приведение асимметричных циклов нагружения к эквивалентным симметричным

Для учета влияния асимметрии цикла нагружения при определении характеристик сопротивления усталости элементов машин и конструкций полученные в результате схематизации корреляционные таблицы преобразуют в однопараметрические таблицы распределения эквивалентных (в смысле вносимого уста-