

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ СХЕМАТИЗАЦИИ СЛУЧАЙНОГО НАГРУЖЕНИЯ

<sup>1</sup>Д.т.н. Е.К. Почтенный, <sup>2</sup>к.т.н. П.П. Капуста

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

### 1. Постановка задачи и обоснование выбора метода схематизации

Применение каждого метода регламентировано ГОСТ 23207-78 [1] в зависимости от коэффициента нерегулярности случайного процесса нагружения. Наиболее универсальные, с данной точки зрения, признаются два метода (ГОСТ 25.101-83): метод полных циклов и метод “падающего дождя” [2]. Эти методы позволяют дать расчетные оценки долговечности более сопоставимые с экспериментальными данными, чем остальные методы. Поэтому их применение является предпочтительным.

Хорошую точность оценки нагруженности дает метод анализа полуциклов напряжений [3]. Данный метод учитывает асимметрию нагружения путем приведения случайного асимметричного нагружения с переменным коэффициентом асимметрии к случайному нагружению с постоянным коэффициентом асимметрии [4]. Метод прошел широкую экспериментальную проверку. Наилучший эффект при его использовании можно получать в случае автоматизированного учета и статистической обработки реального случайного нагрузочного ряда напряжений [2 – 9].

Сравнительный анализ экспериментальных и аналитических методов оценки нагруженности показал необходимость дополнения их друг другом.

### 2. Выделение экстремальных значений случайного процесса нагружения

При проведении процесса схематизации применяют разбиение всего диапазона изменения нагрузок на классы, т.е. интервалы разной ширины. Ширина класса определяется количеством классов разбиения и шириной диапазона нагрузок. Примем стандартный ряд количества классов: 8, 16, 32. Наиболее часто применяется 32 класса. Нумерация классов осуществляется от минимального значения диапазона.

Например, если весь диапазон изменения исходного сигнала составляет от  $-10.24V$  до  $+10.24V$ , то при 32 классах разбиения, ширина класса составит  $0.64V$ , а границы 1-го класса будут  $-10.24V \dots -9.6V$ , 16-го класса –  $-0.64V \dots 0V$ , 32-го класса –  $+9.6V \dots +10.24V$ .

Выделенные в результате предварительной обработки экстремумы в дальнейшем описываются не своим реальным значением, а номером класса. Это позволит при проведении схематизации оперировать с целыми числами в диапазоне от 1 до 32.

При выделении экстремумов должны выполняться следующие правила [2–9, 12–16 ]:

- начальные и конечные значения процесса нагружения принимаются за экстремумы;
- соседние экстремумы, образующие размах меньше ширины класса не выделяются (рис. 1);
- если несколько соседних экстремумов процесса нагружения равны между собой, то выделяется один экстремум (рис. 1, 2);
- ординату процесса нагружения  $X$  принимать за экстремум при выполнении одного из условий:

$$\begin{cases} X_{i-1} > X_i \\ X_{i+1} \geq X_i \\ |X_{i-1} - X_i| \geq \Delta \end{cases} \quad (1)$$

и

$$\begin{cases} X_{i-1} < X_i \\ X_{i+1} \leq X_i \\ |X_{i-1} - X_i| \geq \Delta \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритмизация выделения экстремальных значений по соотношениям вида (1 и 2) сводится к формализации следующих операций. Из массива последовательных дискретных значений процесса нагружения, полученных при постоянном шаге квантования  $\Delta t$ , выделение экстремумов производят в соответствии с условием:

$$(X_i - X_{i-1})(X_{i+1} - X_i) < 0. \quad (3)$$

В неравенстве (3) –  $i=2, 3, \dots, n$ , где  $n$  – объем ряда дискретных значений процесса нагружения. При выполнении этого условия  $X_i$  принимается за экстремум.

Если произведение в левой части соотношения (3) больше нуля, выполняют сдвиг массива на одно значение и процедуру повторяют (анализируют следующие три значения  $X_i, X_{i+1}, X_{i+2}$  и т. д.).

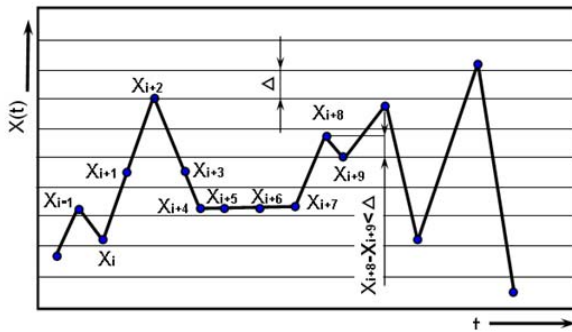


Рис. 10 Выделение экстремумов, образующих размах меньше ширины класса

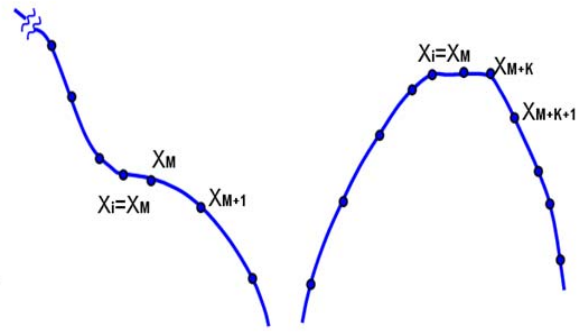


Рис. 20 Выделение экстремумов при равенстве нескольких соседних экстремальных значений процесса

При наличии в массиве следующих друг за другом двух и более одинаковых значений (рис. 2) возможно равенство нулю левой части выражения (3).

$$X_{i+1} - X_i = 0 \quad (4)$$

и фиксируют значение  $X_m = X_i$ . Далее, последовательно проверяют неравенство

$$(X_m - X_{m-1})(X_{i+1} - X_i) < 0. \quad (5)$$

В неравенстве (5) –  $i=m+1, m+2, \dots, m-k-1$ , где  $k$  – число одинаковых значений. При равенстве нулю левой части выражения (5), массив сдвигают на одно значение и вновь проверяют неравенство (5). Если неравенство (5) выполнено, значение  $X_{m+k} = X_i$  принимают за экстремум (рис. 2, 3), после чего поиск экстремумов вновь осуществляют по условию (2).

### 3. Выделение экстремальных значений случайного процесса нагружения по методу полных циклов

Один из наиболее распространенных алгоритмов, метод полных циклов, широко применяют при оценке эксплуатационной нагруженности элементов машин и механизмов.

В соответствии с определением метода полных циклов схематизацию ведут в несколько этапов. В начале (рис. 3) из реализации процесса выделяют простые промежуточные циклы с амплитудами, меньшими некоторой, наперед заданной, величины  $L$  и определяют их количество.

Далее, исключив из рассмотрения выделенные таким образом циклы, определяют число простых циклов, с амплитудами, меньшими величины  $L_1$ . Такую процедуру повторяют, выделяя последовательно из реализации процесса циклы с амплитудами, меньшими  $L_3, \dots, L_n$  ( $L_3 < L_4 < \dots < L_n$ ) до тех пор пока не будут выделены все циклы.

Выделение полных циклов производится на основании анализа четырех последовательно расположенных экстремумов (рис. 4).

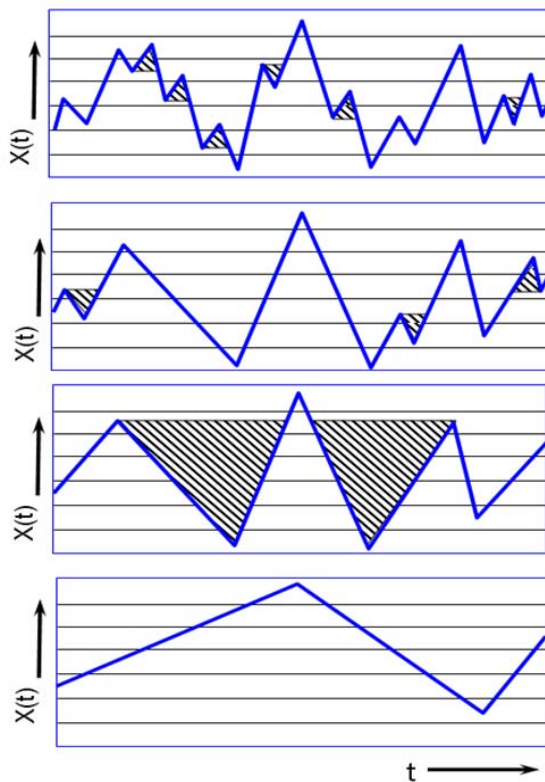


Рис. 3. Схема выделения из реализации процесса простых промежуточных циклов

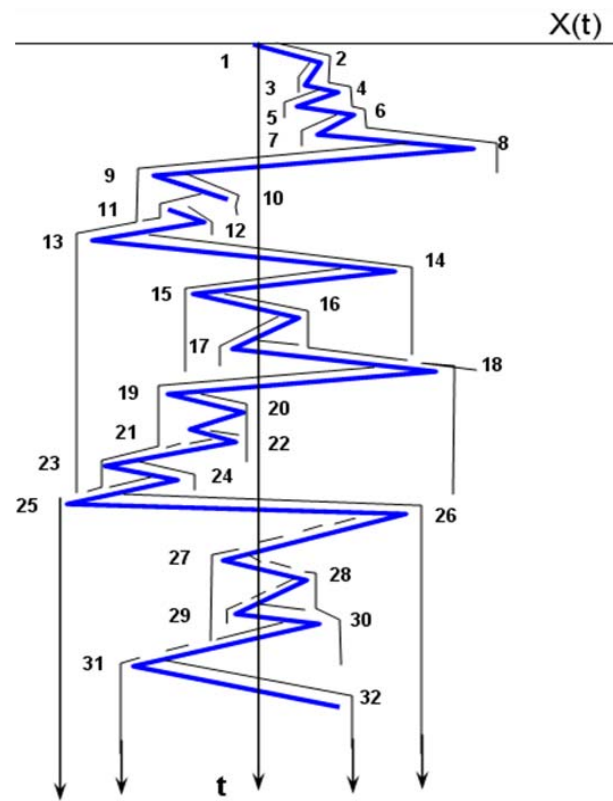


Рис. 4. Схема подсчета циклов нагружения по методу "падающего дождя"

Условия выделения полного цикла по четырем экстремумам имеет вид:

где:  $X_{2i} \leq X_{1i}, X_{3i} \leq X_{3i},$

$$X_{1i} = |X_{i+1} - X_i|, X_{2i} = |X_{i+2} - X_{i+1}|, X_{3i} = |X_{i+3} - X_{i+2}|. \quad (6)$$

Если уравнение (6) не выполняется, тогда сдвигают массив на величину одного экстремума, т. е. производят перенумерацию четырех следующих экстремумов и снова проверяют выполнение неравенства (6).

После выделения полного цикла происходит сдвиг массива с исключением точек  $X_{i+2}$ ,  $X_{i+1}$  и процесс поиска полного цикла из начального значения экстремума.

В результате выделения полных циклов в соответствии с неравенством (6) на обрабатываемом участке реализации остаются невыделенные циклы напряжений, соответствующие, как правило, колебаниям с монотонно убывающими или монотонно возрастающими амплитудами.

Метод полных циклов учитывает, как основные, так и наложенные циклы.

Алгоритм схематизации по методу “полных циклов” довольно прост и легко реализуется, но он имеет ряд существенных недостатков:

- для проведения схематизации требуется запоминание больших массивов экстремумов на носителях информации;
- схематизация требует продолжительного времени обработки, зависящего от длины массива данных;
- невозможно проводить схематизацию в режиме реального времени без промежуточного запоминания массивов экстремумов.

Эти недостатки отсутствуют у другого метода выделения полных циклов, который называется методом “падающего дождя”.

#### 4. Выделение экстремальных значений случайного процесса нагружения по методу “падающего дождя”

Схема подсчета циклов нагружения по методу “падающего дождя” проиллюстрирована на рис. 5.

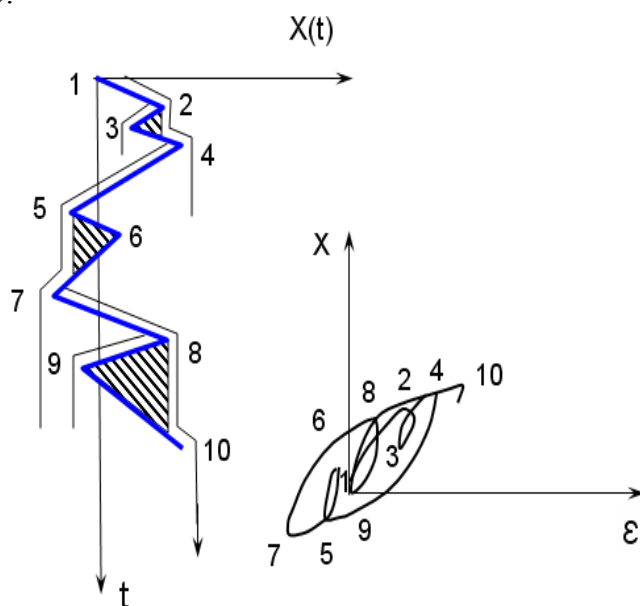


Рис. 5. Выделение полных циклов на основании анализа четырех последовательно расположенных экстремумов

При схематизации по методу “падающего дождя” ось времени направлена вертикально вниз, а линии, соединяющие соседние экстремумы – это последовательность крыш, по которым стекают потоки дождя [2].

Рассмотрим применение этих правил для реализации, показанной на рис. 5.

Траектории потоков определяются в соответствии со следующими правилами.

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

Поток, начавшийся в точке максимума (минимума), прерывается в тот момент, когда встретится максимум (минимум), больший (меньший), чем исходный.

При встрече на одной из крыш нескольких потоков движение продолжает тот, который берет начало в экстремуме с меньшим номером, а остальные прерываются.

Поток, не встретивший препятствий, падает на землю.

Толстыми линиями изображены траектории изменения нагрузки, а тонкими – воображаемые потоки дождя. Начало первого потока происходит из минимума 1, а остановка – после максимума 8, напротив минимума 9 так как, он является более отрицательным, чем минимум 1. Размах полуцикла при этом подсчитывается как расстояние между точками проекции минимума 1 и максимума 8 и на горизонтальную ось.

Второй поток начинается от максимума 2 и останавливается напротив максимума 4 в соответствии с правилом 2; размах полуцикла равен расстоянию между проекциями экстремумов 2 и 3 на горизонтальную ось. Аналогично определяют длину потоков, начинающихся от максимумов 4 и 6. Поток от максимума 8 (в рамках рассматриваемого примера) не заканчивается (обозначен стрелкой). Потоки от минимумов 3, 5, 7 в соответствии с третьим правилом останавливаются у мест слияния с потоками, стекающими с крыш, расположенных выше. Размах полуциклов для этих потоков равен соответственно 2–3, 4–5, 6–7. Остальные потоки, приведенные на рис. 5, определены по тем же правилам.

Особенностью метода “падающего дождя” является то, что схематизация по этому методу соответствует диаграмме циклического деформирования: размахи деформаций, подсчитанные как циклы, образуют в координатах “напряжение – деформация” замкнутые петли гистерезиса (Рис. 5), а размахи деформаций, подсчитанные как полуциклы, не образуют замкнутых петель.

Непрекратившиеся потоки после завершения схематизации определяют обычно максимальные размахи полуциклов. В их последовательности сначала встречается охватывающий крупный размах, затем размахи промежуточных циклов нагружения.

Результаты схематизации, как правило, заносятся в корреляционную таблицу, где строками являются номера классов минимумов, а столбцами – номера классов максимумов, выделенных циклов. Так цикл, у которого минимум находится в 5 классе, а максимум в 16, записывается в 16-й столбец 5-й строки корреляционной таблицы (ввиду ограниченности объема статьи таблица не приводится). Числа в ячейках таблицы обозначают числа циклов, подсчитанных в результате схематизации, с одинаковыми значениями максимумов и минимумов.

Незавершенные циклы выводятся отдельным протоколом.

Метод “падающего дождя” позволяет проводить схематизацию в режиме реального времени, при этом запоминается лишь траектория потоков дождя, а обработку производят по мере ввода экстремумов.

Алгоритм схематизации по методу “падающего дождя” реализован на ПЭВМ. Разработаны: блок-схема и программа.

## **5. Обоснование, разработка и выбор методов схематизации с целью получения процесса, эквивалентного по повреждающему воздействию исходному нагрузочному процессу**

### **5.1. Обоснование выбора метода схематизации**

Выше описанные методы схематизации, имеют целый ряд недостатков. Они заключаются в следующем:

- методы игнорируют возможную и достаточно широко распространенную многочастотность процесса нагружения;
- при выделении циклов по данным методам исходят из размахов как нагружения, так и разгрузки, искажая фактическую картину нагружения;
- методы ориентируются только на размах напряжений, не учитывая, что это не соответствует повреждающему воздействию низкочастотных циклов;
- методы не учитывают одновременности действия циклов малого и большого размахов, что вносит погрешности при формировании нагрузочного блока.

Поэтому существует необходимость модернизации старых или разработки новых методов с целью получения в результате схематизации процессов, эквивалентных по повреждающему воздействию исходным процессам и отвечающих следующим требованиям:

- должен разделять основную и наложенную составляющие случайного процесса нагружения;
- в качестве повреждающих учитывать только полуциклы нагружения.

В соответствии **теории огибающих** должна быть обеспечена возможность проводить схематизацию как в режиме реального времени, так и в пакетном режиме.

Массивы, описывающие схематизированный процесс, должны иметь минимальные объемы.

## **5.2. Методы схематизации случайного нагружения**

Для реализации цели повышения адекватности оценки случайного нагружения разработаны два новых метода схематизации.

### **Метод схематизации 1 для выделения составляющих исходного процесса нагружения**

Первый метод основывается на следующих принципах:

- во-первых: поступающие экстремумы разделяются на две группы, в первой из них находятся все экстремумы, во второй – только максимумы. Таким образом, первая группа будет описывать исходный случайный процесс (кривая 1, рис. 6), а вторая – его огибающую (кривая 2, рис. 6);

- во-вторых: обе группы схематизируются отдельно и параллельно в режиме реального времени;

- в-третьих: схематизация производится модифицированным методом “падающего дождя”, учитывающего только полуциклы нагружения в соответствии со следующими правилами:

поток начинается от каждого минимума на обращенной вверх стороне сигнала;

- поток, начавшийся у минимума, стекает отдельной струей по крышам до тех пор, пока не оказывается напротив “более отрицательного” минимума, чем у которого начался;

- поток прекращается при встрече с потоками, стекающими с крыши, расположенной выше.

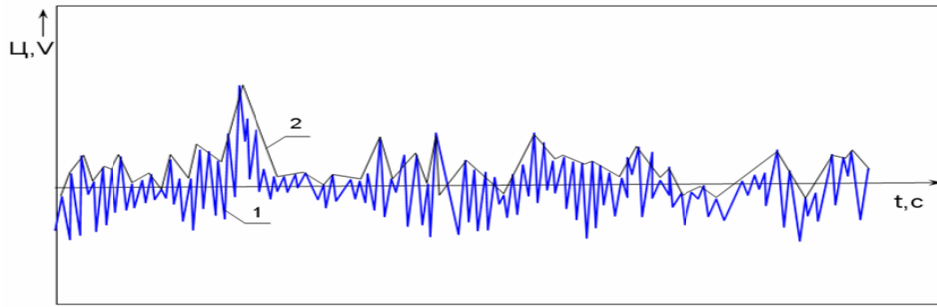


Рис. 6. Схема к пояснению метода схематизации 1 для выделения составляющих исходного процесса

Таким образом, в результате схематизации получают две корреляционных матрицы, одна из которых описывает основной процесс нагружения, т.е. низкочастотную составляющую процесса, а вторая - наложенный сигнал или высокочастотную составляющую исходного сигнала.

Рассмотрим предложенный метод на примере случайного процесса, изображенного на рис. 7–9. На рис. 7–8 изображена схематизация с целью получения высокочастотной составляющей исходного сигнала, а на рис. 9 – низкочастотной.

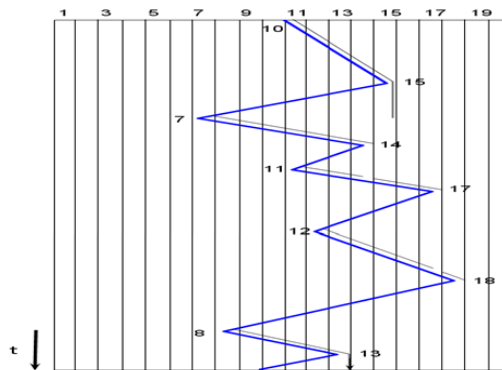


Рис. 7. Схема к пояснению метода схематизации 1 для получения низкочастотной составляющей

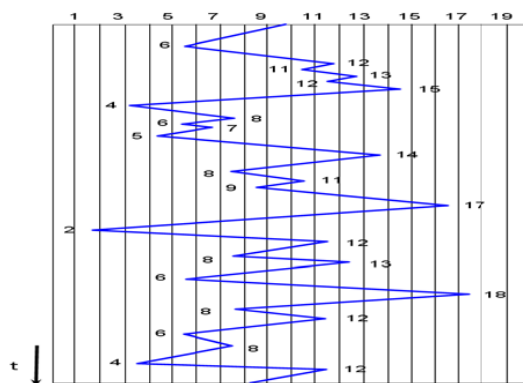


Рис. 8. Схема метода схематизации 2 для получения высокочастотной составляющей исходного процесса нагружения

В результате схематизации выделены следующие полуциклы нагружения (полуциклы обозначены номерами классов минимума и максимума):

- высокочастотная составляющая: –6–15, 11–12, 12–13, 4–17, 6–7, 5–8, 8–14, 9–11, 8–12, 6–13, 8–12, 6–8, 4–12 нез., 2–18 нез. (сокращение нез. обозначает незавершенный цикл);

- низкочастотная составляющая: 10–15, 11–14, 12–17, 7–18 нез., 8–12 нез.  
 Дальнейшая обработка двух корреляционных таблиц ведется параллельно.

### Метод схематизации 2 для выделения составляющих исходного процесса нагружения

Второй метод проиллюстрирован на рис. 9 и основывается на следующих принципах:

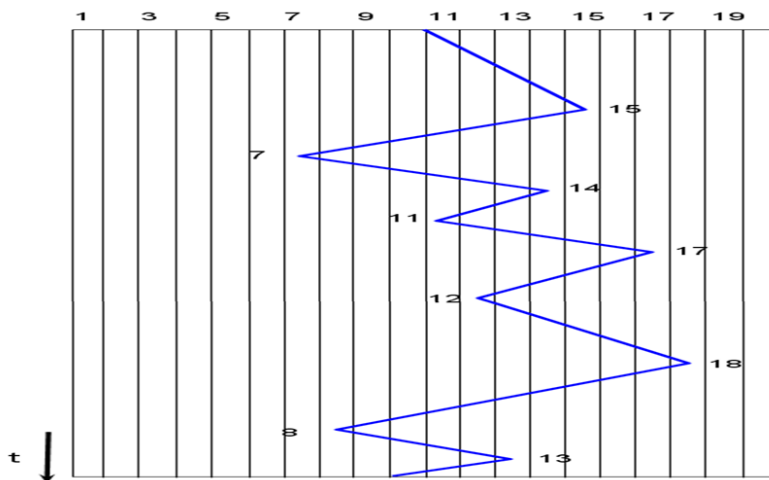


Рис. 9. Схема метода схематизации 2 для получения низкочастотной составляющей исходного процесса нагружения

- во-первых: поступающие экстремумы разделяются на две группы, а в первой из них находятся все экстремумы, во второй – только максимумы;
- во-вторых: обе группы схематизируются отдельно и параллельно в режиме реального времени;
- в-третьих: выделение полуциклов начинается с первого встретившегося минимума; началу полуцикла соответствует минимуму, а концу – следующий за ним максимум.

В результате схематизации случайного процесса, приведенного на рис. 9, по второму предлагаемому методу схематизации, выделены следующие полуциклы:

- высокочастотная составляющая: – 6–12, 11–13, 12–15, 4–8, 6–7, 5–14, 8–11, 9–17, 2–12, 8–13, 6–18, 8–12, 6–8, 4–12;
- низкочастотная составляющая: 7–14, 11–17, 12–18, 8–13.

## 6. Принципы и методы схематизации случайных процессов нагружения

На основании проведенного сравнительного анализа методов схематизации случайных процессов нагружения предложены принципы и методы схематизации случайных процессов нагружения конструкций и деталей машин, учитывающие временной фактор действующих нагрузок.

Примерами применения и основой для развития указанного подхода являются предложенные: комплексный метод и программа схематизации случайных процессов эксплуатационного нагружения несущих систем мобильных машин; метод схематизации с целью получения процесса, эквивалентного по повреждающему воздействию реальному нагрузочному процессу; алгоритмы новых методов схематизации и метода “падающего дождя”, а также программы для ПЭВМ, обеспечивающие возможность автоматизации обработки экспериментальных результатов эксплуатационных испытаний нагруженности несущих конструкций и деталей мобильных машин [2–16].



## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – Введ. с 01.01.1979. М.: Изд-во стандартов, 1981. – 50 с.
2. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – Введ. с 01.07.1984. - М.: Изд-во стандартов, 1083. – 50 с.
3. Почтенный, Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин / Е.К. Почтенный. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 246 с.
4. Почтенный, Е.К. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Весці НАН Беларусі: Серыя фізіка-тэхнічных навук.* – 2000. – №2. – С. 59 – 61.
5. Капуста, П.П. Ресурсное проектирование несущих деталей автотранспортных средств / П.П. Капуста // *Автомобильная промышленность.* – 2000. – № 2. – С. 24–26.
6. Оценка долговечности рам тракторных прицепов / А.И. Журавель и др. // *Весці акадэміі навук БССР. Сер. фізіка-тэхнічных навук.* – 1987. – №3. – С.6–12.
7. Почтенный, Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций / Е.К. Почтенный. – Мн.: УП «Арти-Фекс», 2002. – 186 с., ил.
8. Почтенный, Е.К. Прогнозирование случайного нагружения и построение нагрузочных блоков / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления. Сборник научных трудов. В 3-х томах. Т. 2. / Под общ. ред. академика П.А. Витязя.* – Мн.: УП “Технопринт”, 2002. – С. 167–177.
9. Почтенный, Е.К. Анализ нагруженности и расчет ресурса конструкций при случайном нагружении / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. – Т. 1. Перспективные направления создания машин. / Под общ. ред. академика П.А. Витязя.* – Мн., 2004. – С. 125–135.
10. Почтенный, Е.К. Принципы ускорения испытаний конструкций и деталей машин II Теория и практика машиностроения. – 2004 г – №4.- С. 56-61.
11. Капуста, П.П. Принципы ресурсного проектирования несущих систем и деталей машин / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Вестник машиностроения.* – 2005. – №7. – С. 13– 16.
12. Почтенный, Е.К. Прогнозирование эксплуатационного нагружения несущих конструкций автомобилей-самосвалов / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Горная механика.* – 2005. – № 3. – С. 47–60.
13. Почтенный, Е.К. Метод ускоренных усталостных стендовых испытаний конструкций при регулярном многоцикловом нагружении / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Вестник БНТУ.* – 2006. – №2. – С. 13–16.
14. Почтенный, Е.К. Метод ускоренных усталостных испытаний при регулярном многоцикловом нагружении / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Трибофатика: Сборник докладов V Международного симпозиума по трибофатике ISTF, 2005.; В 3-х томах: 3–7 октября 2005 г. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – Т. 1. – С. 267–281.*
15. Почтенный, Е.К. Ресурс несущих конструкций грузовых автомобилей с учетом многочастотности и многорегимности нагружения / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Грузовик.* – 2006. – № 1. – С. 31–38.
16. Почтенный, Е.К. Экспериментально-аналитическая методика ускоренных испытаний конструкций при регулярном многоцикловом нагружении и оценка их ресурса при случайном многочастотном и многорегимном нагружении / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // *Вестник машиностроения.* – 2006. – № 1. – С. 28–40.