

Международная научно-практическая конференция
«ВМ-проектирование и МКЭ-анализ при проектировании
и эксплуатации зданий и сооружений»

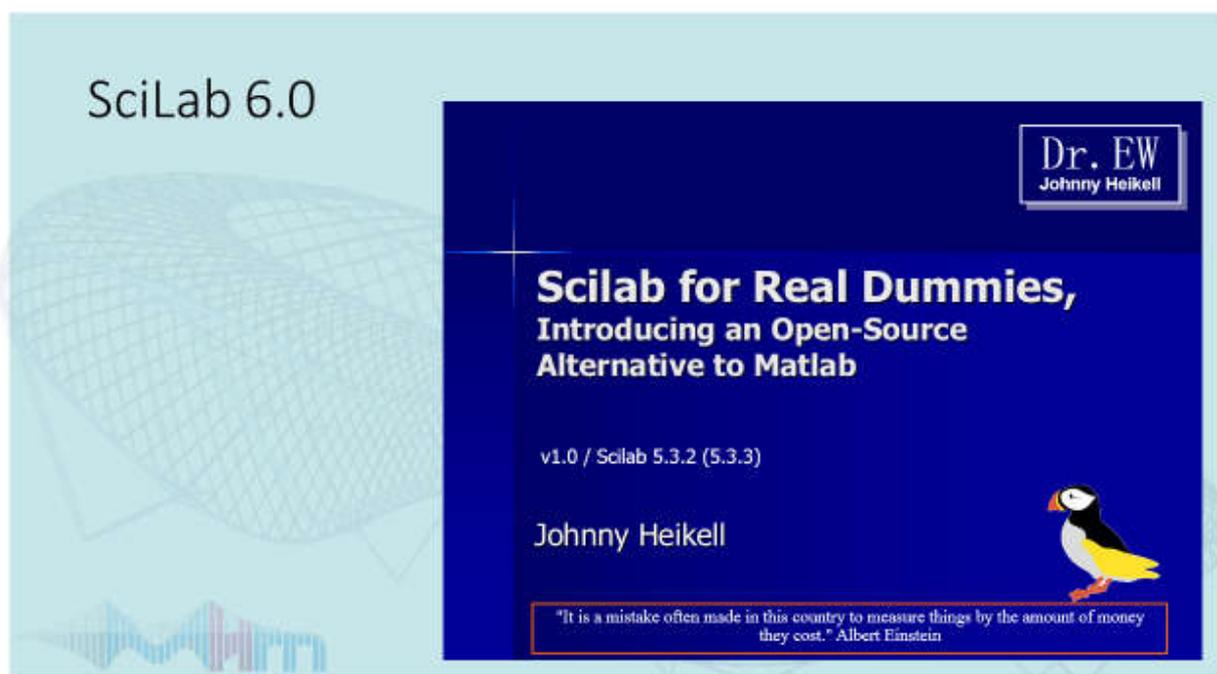
(г. Минск, БНТУ – 02 ноября 2018)

УДК 624.04

Анализ режимов динамической нагруженности пролетных строений в среде
SciLab 6.0

Ярошутин Д.А.

Кафедра автомобильных дорог, мостов и тоннелей ФГБОУ ВО СПбГАСУ,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация



Немного об усталости...

Некоторые термины

(ГОСТ 23207-78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения)

Усталость – процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий у изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению

Выносливость – свойство материала противостоять усталости

Усталостное повреждение – необратимое изменение физико-механических свойств материала под действием переменных напряжений

Многоцикловая усталость – усталость материала, при которой усталостное разрушение происходит, в основном, при упругом деформировании (условная граница - более 10 тысяч циклов)

... и еще термины

Продолжительность испытаний – продолжительность нахождения нагруженного образца в режиме испытаний (может быть выражена числом циклов или интервалом времени)

База испытаний – предварительно задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость

Реализация случайного нагружения – совокупность последовательных значений переменных напряжений, возникающих в объекте за рассматриваемый период эксплуатации

Усталостная долговечность – продолжительность действия переменных напряжений до разрушения или до определенной протяженности усталостной трещины

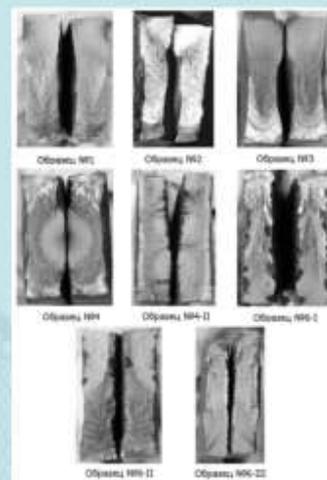
Исследования материалов

Определение прочностных и усталостных характеристик при лабораторных испытаниях

Лабораторные исследования образцов



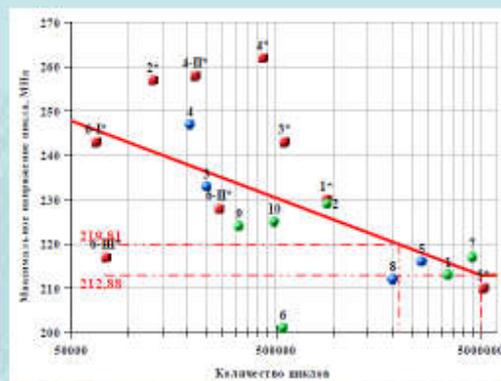
ЦДМ-10ПУ



Полученные результаты

Определение предела выносливости образцов металла дорожных балок стачкаемого проездового строения Дворового моста

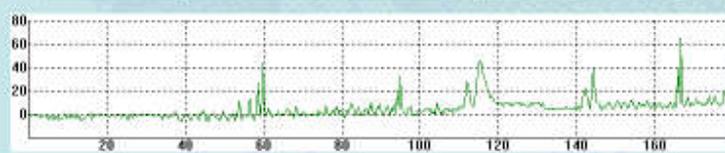
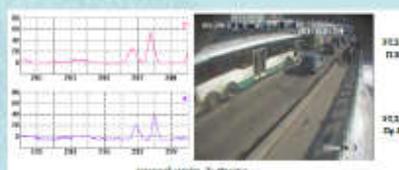
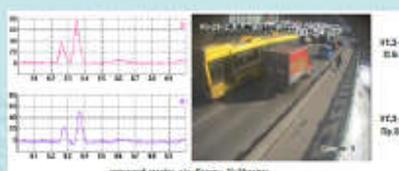
№ образца	Максимальное напряжение, МПа		Коэффициент симметрии λ	Логарифмический ресурс $\lg N$	Вариативное напряжение-логарифм $\Delta \lg \sigma$	Прогнозируемый остаточный $\Delta \lg \sigma$	
	1	2					
1	230	229 490	92,23	1,319	0,221	-2,809	
4	247	190 080	408,295	0,276	0,232	-11,242	
5	236	2 566 080	121,285	6,438	0,227	-4,402	
6	232	1 046 080	228,184	6,287	0,242	-4,422	
Среднее	236,89			3,328			
Сумма			800,845		1,012	-26,834	
Количество образцов							4
Среднее квадратичное отклонение напряжений от среднего значения $\sigma_{\text{ср}}$							14,241
Среднее квадратичное отклонение логарифмов числа циклов от среднего значения $\sigma_{\text{ср}}$							0,212
Коэффициент корреляции r							-0,928
Предел выносливости на базе 10^7 циклов							216,591
Вероятная ошибка предела выносливости $\sigma_{\text{в}}$							8,608



Исследования нагруженности

Определение характеристик процесса нагружения элементов при действии фактически-обращающихся нагрузок

Запись данных о напряжениях



Подсчет циклов колебаний

Реализация алгоритма метода «дождя» (Rainflow)

Схематизация процесса нагружения

(представление процесса случайного нагружения более простым)

Способы схематизации случайных процессов описаны в ГОСТ 25.101-83 и применимы к условиям эксплуатации или испытаний конструкций на выносливость в следующих случаях:

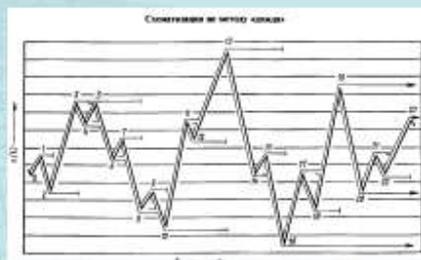
- При расчетной оценке долговечности по критерию накопления усталостных повреждений
- Для сравнительной оценки нагруженности одинаковых элементов
- Для количественной оценки режимов нагруженности по повреждающему воздействию
- При моделировании реального нагружения при испытаниях на усталость

Основные этапы схематизации

- Дискретизация процесса нагружения (ГОСТ 23207-78)
- Вычисление статистических характеристик для заданной дискретной последовательности и выделение экстремумов процесса
- Замена реального процесса нагружения схематизированным и получение эмпирических распределений нагрузок

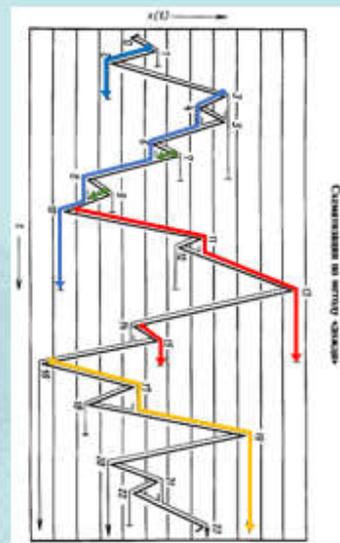
Схематизация – однопараметрическая и двухпараметрическая

Метод «дождя»



Тринадцать этапов определяют в соответствии со следующим правилом:

1. Пиком является с внутренней стороны остроконечный выступ. Каждый пик определяет нагрузку нагружения. Высота пика определяет проекцией времени пика на ось времени.
2. Пиком, начинающим и заканчивающим, признается в тот момент, когда встретится максимум больший, чем соседний. Например, пиком из максимума I станет по направлению к максимуму J и прекратится надругие максимумы K , поскольку он больше соседнего.
3. Пиком, заканчивающим и только начинающим, признается, когда встретится максимум меньший, чем соседний. Например, пиком из точки P признается максимум M , так как минимум N меньше соседнего.
4. При встрече на одной из сторон соседнего пика анализ прекращает тот, который будет выше и встретится с меньшим соседом, а остальные признаются. Например, пиком из точки Z признается свой пик, а пиком из точки 7 и 9 признаются.
5. Пиком, не встречающий соседней, пиком не признают, например пиком из максимума P .



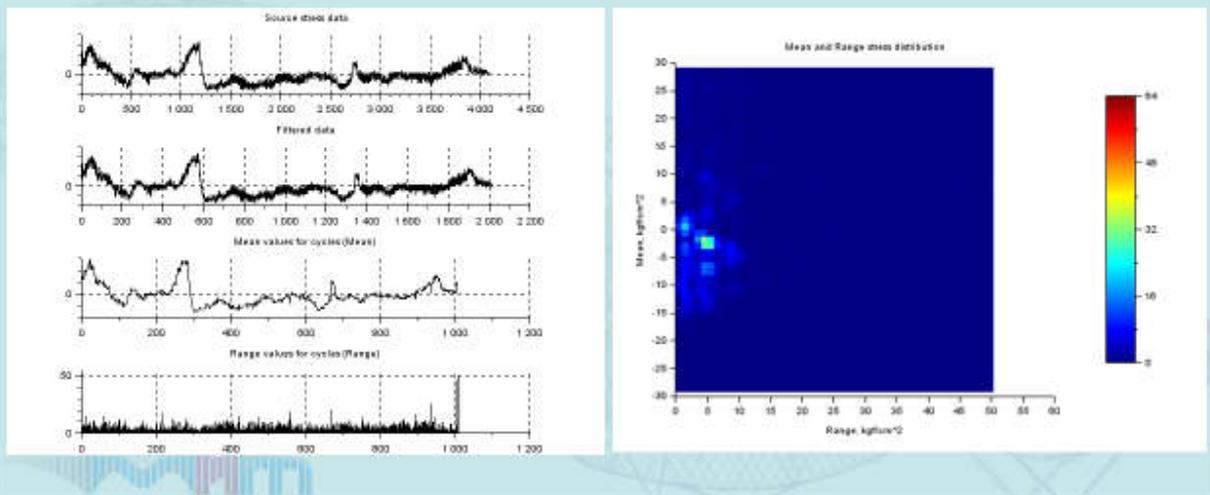
Основные этапы реализации алгоритма

- Фильтрация исходных данных
- Подсчет амплитуд и средних значений для линий стока
- Сортировка результатов в массивы данных
- Графическое отображение и постобработка данных

```
.....  
// Adaptive algorithm for Range and Mean data by indexing and range  
// from original data (Mean)  
// .....
```

```
Function (Mean, DMean, Range, DRange) = Calc_Range_Mean  
  L = size(M, 't');  
  index = 1;  
  start = 1 // constant  
  k = 1;  
  
  DMean = 0;  
  DRange = 0;  
  
  for k=1:L;  
    SEG = 0;  
    Pindex = Pindex;  
    while (index-1) <= index;  
      X = size(Pindex - Pindex-1);  
      Y = size(Pindex-1 - Pindex-1); //for every value  
      if (X > Y) (index-1 == start) then start = start+1 else  
        if (X > Y) (index-1 == start) then  
          k = k+1;  
          Mean(k) = (Pindex-1) + Pindex-1; //, DMean = size(DMean, size(DMean, 't'));  
          Range(k) = Y; DRange = size(DRange, size(DRange, 't'));  
          Pindex = [1; Pindex-1];  
          index = index-1;  
          Pindex = Pindex;  
          else break;  
        end;  
      end;  
    end;  
    index = index+1;  
  end;  
end
```

Реализация алгоритма в среде SciLab 6.0

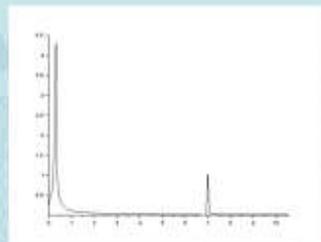
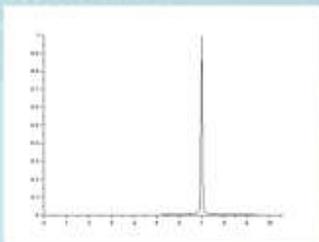
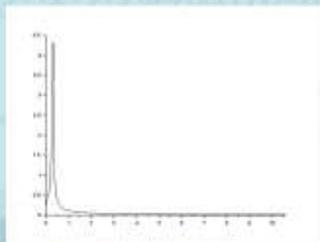
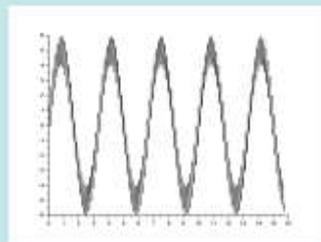
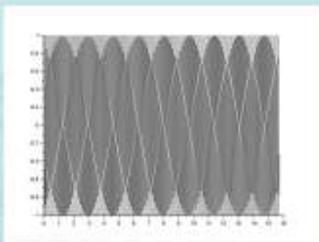
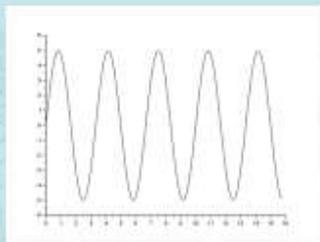


Спектральный анализ данных

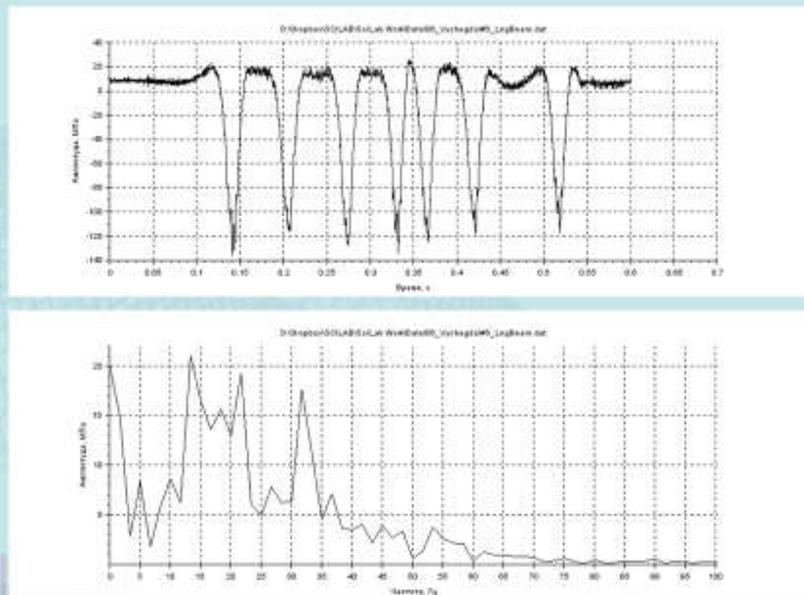
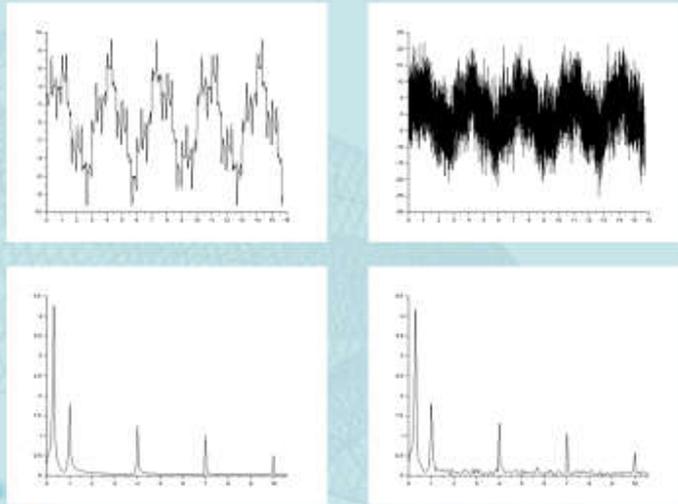
Анализ нагрузки через алгоритмы быстрого и оконного преобразования Фурье

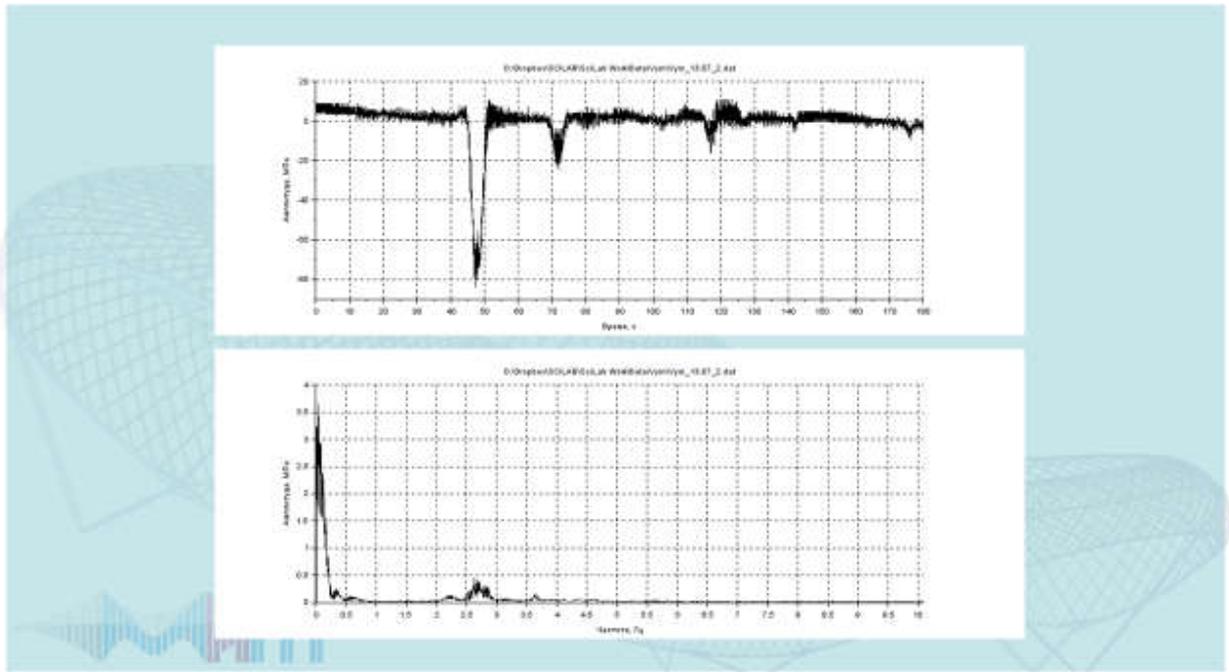


Пример



Пример





Расчет повреждений на основе БПФ

- Расчет доли повреждения D_i от каждой гармоники спектра амплитудой C в отдельности
- Повреждение за период выборки D как суперпозиция повреждений D_i от гармоник

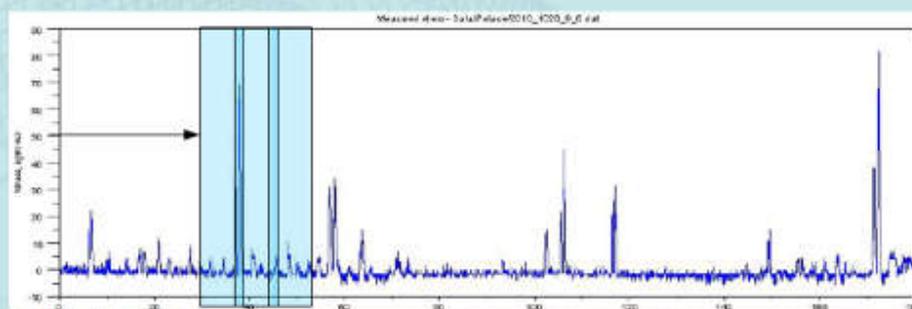
$$C_k = C(k \Delta f) = \Delta t \sum_{n=1}^N \sigma_n e^{-j 2 \pi \frac{kn}{N}}, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

$$\sigma(t) = C_0 + \sum_{k=1}^N C_k \cos\left(2 \pi \frac{k}{N \Delta t} t - \theta_k\right)$$

$$D = \frac{T e^{-\beta(C_0 - \sigma_0)}}{2 \pi N_0} \sum_{k=1}^N \left[\omega_k e^{i C_k} \prod_{j=1}^{k-1} D_j \right]$$

Применение «оконного» преобразования к расчету повреждений

- Свертка временного представления сигнала с «оконной» функцией Хэмминга
- Использование перемещающегося окна



Реализация «оконного» преобразования в SciLab 6.0

