

- отображение окружающей обстановки с помощью специализированной телевизионной системы наблюдения, включающей четыре телевизионные камеры (переднюю, заднюю, левого и правого борта) и три монитора (центральный, левый и правый);

- получение картографической информации на мониторе водителя.

Реализация этих функций обеспечивается БИУС во всем диапазоне изменения условий эксплуатации машины.

Управление узлами и агрегатами машины обеспечивается путем формирования в БИУС и подачи на исполнительные механизмы соответствующих агрегатов сигналов управления в виде выходных уровней постоянного напряжения 24 В и управляющего тока, регулируемого с помощью широтно-импульсной модуляции выходного напряжения.

Для согласования потока информации о текущем техническом состоянии систем, агрегатов и узлов машины и параметрах ее движения, поступающей к механику – водителю, с реальной пропускной информационной способностью БИУС предусмотрены следующие режимы отображения информации:

- режим постоянного отображения информации о скорости движения машины и частоте вращения тягового двигателя;
- режим автоматического отображения аварийной информации;
- режим автоматического отображения предупреждающей информации;
- режим отображения более подробной информации о контролируемых параметрах в виде «информационных экранов», причем на каждый «информационный экран» выводятся параметры только одной контролируемой системы.

Реализация указанных видов отображения информации в БИУС обеспечивается на основе использования в качестве дисплейного модуля (ДС) многофункционального цветного жидкокристаллического индикатора (ЖКИ), который одновременно используется и в качестве центрального монитора ТСН. Использование подобного индикатора позволяет формировать на экране ДМ информационные модели процессов, контролируемых и управляемых с помощью БИУС и изображения, получаемые от передней или задней телекамер, в виде, обеспечивающем комфортное восприятие этих моделей механиком-водителем.

Отображение подробной информации о контролируемых параметрах систем и агрегатов машины, которые представляются в виде «информационных экранов», вызывается соответствующими кнопками, которые размещены на обрамлении экрана ДС. Также кнопками производится управление режимами работы передней и задней телекамер с выводом изображения от соответствующей камеры на экран.

На экране дисплейного модуля постоянно высвечиваются индикаторы «информационных экранов» и телекамер. Если все системы исправны и нормально функционируют – индикаторы «информационных экранов» зеленого цвета. Если индикатор какого-нибудь «информационного экрана» загорается желтым цветом – это является предупреждением о неполадках в работе данной системы и возможности выхода ее из строя; если же индикатор красный – аварийный режим работы данной системы. Более подробно об отклонениях в работе и возникших неисправностях можно узнать, вызвав кнопками «информационный экран» той системы, в которой возникли нарушения в нормальной работе, а также вызвав «информационный экран» всех сообщений БИУС.

Разработанная БИУС для гусеничного шасси вместе с элементами управления, датчиками и средствами отображения информации позволила:

- автоматизировать процессы управления и контроля состояния шасси;

- создать более комфортные условия для работы водителя, оптимизировав интерфейс и алгоритм подачи необходимой для управления машиной информации.

Использованные при создании БИУС технические решения во многом являются универсальными, что позволяет подобные системы применить на машинах разнообразного хозяйственного назначения, и соответствуют уровню аналогичных зарубежных образцов.

Внедрение БИУС позволило значительно повысить технический уровень конструкции гусеничного шасси, его конкурентоспособность на международном рынке в сравнении с аналогичными образцами военной техники зарубежных производителей.

УДК 620.178.3

Е.К. Почтенный, П.П. Капуста

АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ И РАСЧЕТ РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Институт механики и надежности машин НАН Беларуси,
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь*

Введение. Проблема анализа нагруженности и расчета ресурса конструкций при случайном нагружении является фундаментальной как в теоретическом так и в практическом аспектах. Решение этих задач на экспериментальном и на теоретическом уровнях позволило предложить расчетно-экспериментальные и расчетные методы оценки и анализа эксплуатационного нагружения, являющегося в общем случае случайным, и расчета ресурса конструкций по критериям сопротивления усталости [1 - 13]. Основные положения разработанной методики и образующих ее методов рассмотрим на примере использования экспоненциальной функции кривой усталости, подходов о многорежимности и многочастотности действующих нагрузок, с учетом влияния асимметрии нагружения на характеристики сопротивления усталости, снижения предела выносливости конструкций и, в связи с этим, - суммирования усталостных повреждений.

Общие положения. Объектом анализа является реализация случайного процесса многочастотного нагружения опасных по усталости зон конструкций – изменение во времени нормальных напряжений, перпендикулярных усталостной трещине, при типовом режиме эксплуатации.

Анализ процессов нагружения и статистическое представление результатов анализа включает следующие этапы: дискретизация процессов нагружения; выделение экстремумов процессов по дискретной последовательности; построение блоков нагружения действующих частот; приведение асимметричных напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным с построением для каждой частоты убывающих вариационных рядов напряжений – нагрузочных блоков; аппроксимацию вариационных рядов с использованием функции распределения Вейбулла.

Синтез повреждающего действия нагрузочных блоков включает следующие этапы: расчет циклической долговечности при действии каждого нагрузочного блока; определение ресурса конструкций при действии каждого нагрузочного блока; расчет

ресурса конструкций в типовых условиях эксплуатации путем суммирования повреждающего действия всех блоков нагружения анализируемого типового режима эксплуатации.

Анализ процесса нагружения проводят применительно к типовому режиму эксплуатации – совокупности последовательных значений напряжений, возникающих за характерный период эксплуатации (l километров пробега автомобиля по дороге определенного профиля, при загрузке или разгрузке автомобиля и т.д.).

Аналізу предшествует дискретное представление аналогового процесса в виде случайной последовательности ординат напряжений и выделения из этой последовательности экстремумов (минимумов и следующих за ними максимумов) по трем последовательным значениям для ввода парной цифровой информации о полуциклах напряжений в ЭВМ.

Интервал дискретизации определяется из условия:

$$\Delta t \leq \frac{1}{10 f_{\max}}, \quad (1)$$

где f_{\max} – максимальная частота процесса.

Выделение блоков напряжений действующих частот нагружения. Выделение нагрузочных блоков базируется на поэтапном использовании метода анализа полуциклов напряжений (минимумов и следующих за ними максимумов), исходя из теоретического и экспериментального анализов двухчастотного нагружения.

На первом этапе анализа полуциклов напряжений выделяются полуциклы напряжений наиболее высокой частоты, которые составляют первый нагрузочный блок случайных напряжений. Пример выделения полуциклов показан на рис.1. Для этого фрагмента случайного нагружения первый нагрузочный блок составляют полуциклы напряжений: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8,, 93-94.

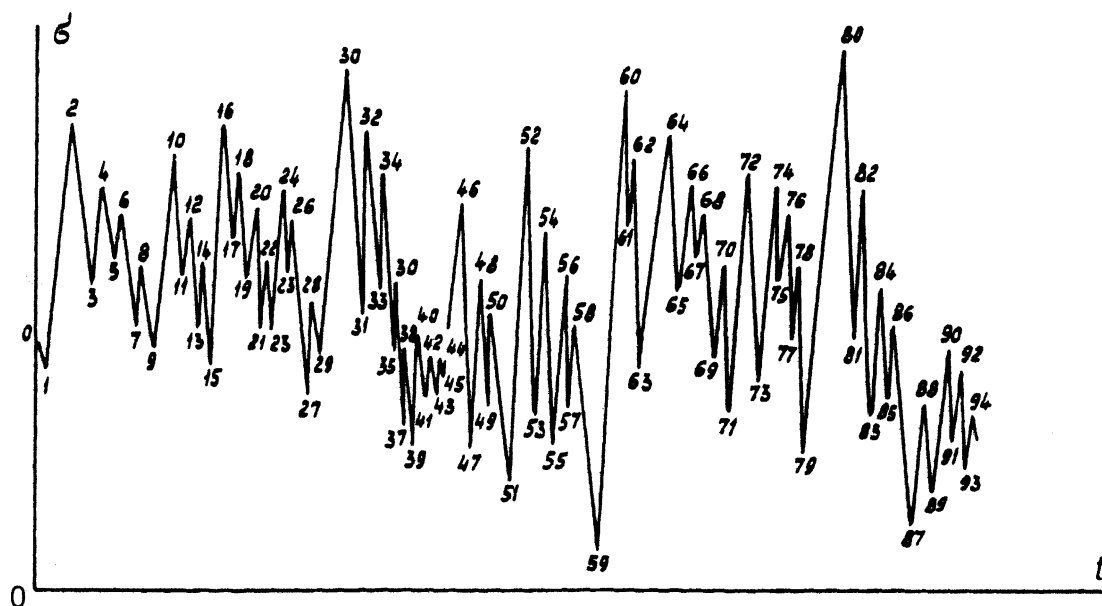


Рис.1. Фрагмент случайного нагружения

На втором этапе выделяются максимумы предыдущего блока: 2, 4, 6, 8 и т.д., которые в виде огибающей образуют циклы напряжений второй более низкой частоты. Полуциклы напряжений этой частоты образуют второй нагрузочный блок: 0-2, 8-10, 14-16, 22-24,, 88-90.

На третьем этапе выделяются максимумы напряжений второй частоты: 2, 10, 16, 24, 30, 46, 52, 60, 72, 78, 80, 90, которые в виде огибающей образуют циклы напряжений третьей частоты. Полуциклы напряжений этой частоты образуют третий нагрузочный блок: 10-16, 24-30, 46-60, 72-80.

Процесс выделения циклов более низких частот продолжается пока колебания напряжений и число максимумов остается значимым. Примером выделения блоков нагружения может служить анализ фрагментов нагружения опасных зон стенки лонжерона рамы автомобиля МАЗ-5551 (рис. 2, а) и балки передней оси автомобиля БелАЗ-7521 (рис.2, б).

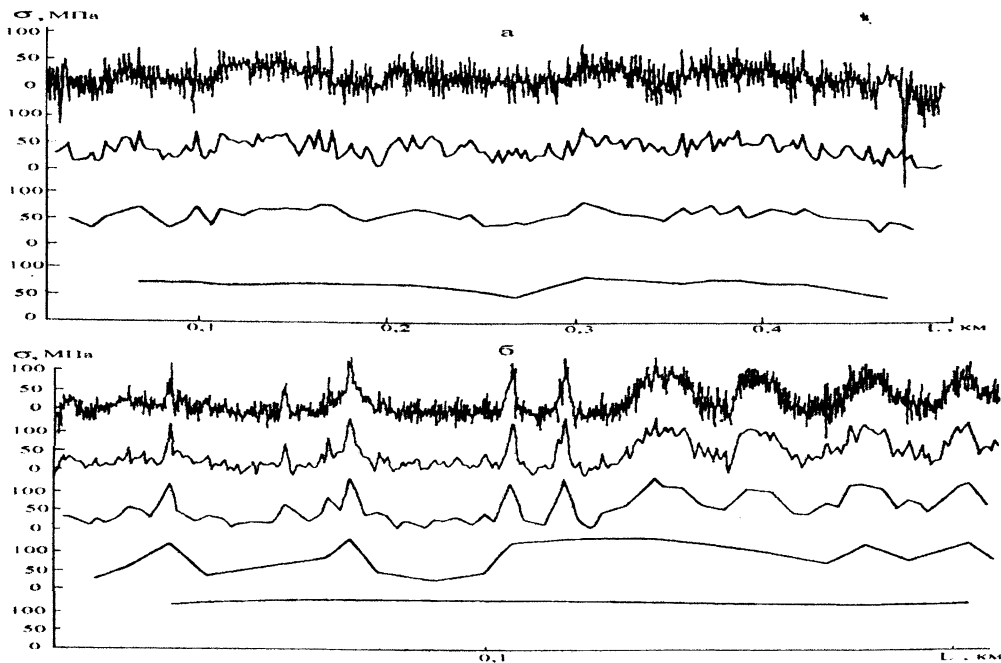


Рис. 2. Выделение случайных блоков нагружения лонжерона (а) и балки передней оси (б).

Построение расчетных нагрузочных блоков. Реализация метода суммирования усталостных повреждений при оценках циклической долговечности требует приведения асимметричных циклов напряжений блоков к эквивалентным по повреждению блокам с постоянной асимметрией циклов.

Для описания кривой усталости используется уравнение:

$$N = N_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_R}{v_R} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (2)$$

где N - число циклов до разрушения при действии максимального напряжения цикла σ_{max} , N_0 - не зависящее от асимметрии нагружения число циклов до точки нижнего перегиба кривой усталости, σ_R - предел выносливости и v_R - характеристика угла наклона кривой усталости при коэффициенте асимметрии R .

Условие эквивалентности, исходя из уравнения кривой усталости, формулируются следующим образом:

$$\frac{\sigma_{max} - \sigma_R}{v_R} = \frac{\sigma - \sigma_{-1}}{v_2}, \quad (3)$$

где для симметричного нагружения ($R = -1$) значение σ - эквивалентное максимальное напряжение цикла, σ_{-1} и v_2 - параметры уравнения кривой усталости.

Зависимость предела выносливости от асимметрии нагружения описывается уравнением:

$$\sigma_R = a \cdot \sigma_{-1}, \quad (4)$$

где

$$a = 2 / [2 - (1 - \psi) \cdot (1 + R)],$$

$\psi = \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_0} - 1$ - коэффициент чувствительности к асимметрии нагружения, σ_0 - предел

выносливости при отнулевом нагружении ($R = 0$).

Зависимость характеристики угла наклона кривой усталости от коэффициента асимметрии нагружения описывается уравнением:

$$v_R = v_1 + (v_1 - v_2) \cdot R. \quad (5)$$

Здесь v_1 - характеристика угла наклона кривой усталости при отнулевом нагружении.

Уравнение для приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению симметричным, исходя из 2 - 4 записываются следующим образом:

$$\sigma = b \cdot \sigma_{max} - (a \cdot b - 1) \cdot \sigma_{-1}, \quad (6)$$

где
$$b = \frac{v_2}{v_R} = 1 / \left[\frac{v_1}{v_2} + \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right) \cdot R \right].$$

В результате регистрации многочастотного нагружения, выделения циклов напряжений каждой частоты и приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению симметричным циклам; для каждой частоты нагружения воспроизводится убывающий вариационный ряд симметричных циклов

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \dots > \sigma_i > \dots > \sigma_n. \quad (7)$$

В качестве примера на рис. 3 представлены приведенные нагрузочные блоки симметричных циклов нагружения опасной зоны лонжерона автомобиля МАЗ - 5551.

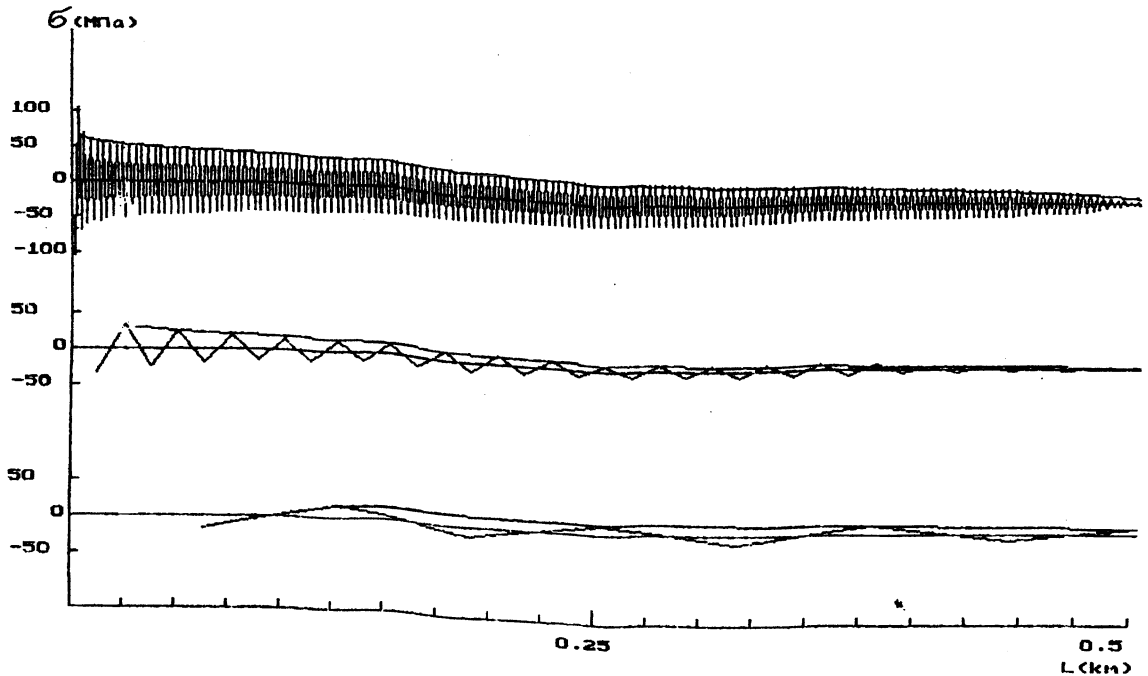


Рис. 3. Нагрузочные блоки для лонжерона

На рис. 4. приведенные нагрузочные блоки для опасной зоны балки передней оси автомобиля БелАЗ – 7521.

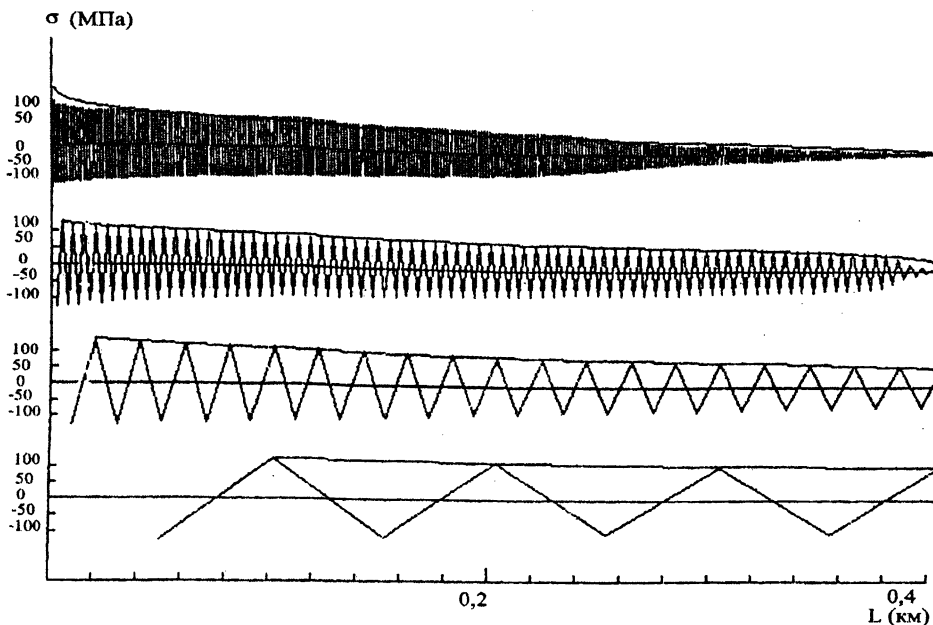


Рис. 4. Нагрузочный блок для балки передней оси

Эти ряды являются дискретными нагрузочными блоками напряжений, которые используются при оценках циклической долговечности по методу суммирования усталостных повреждений с учетом снижения предела выносливости в процессе усталости конструкций.

Аппроксимация нагрузочных блоков. Для сокращения объема хранимой информации о случайном распределении напряжений используется аппроксимирующая функция - функция распределения Вейбулла в записи:

$$\frac{i}{n} = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_i - \overset{\vee}{\sigma}}{\sigma_w} \right)^w \right], \quad (8)$$

где n – число напряжений в вариационном ряду, i – порядковый номер напряжения σ_i в этом ряду, $\overset{\vee}{\sigma}$ – аппроксимированное минимальное значение напряжения, σ_w – параметр с размерностью напряжения, w – показатель степени. Из уравнения (8) при $i = 1$ напряжение $\overset{\wedge}{\sigma}$ – аппроксимированное максимальное значение напряжения.

Метод определения параметров функции распределения (8) предполагает запись функции в виде уравнения прямой:

$$y_i = a_0 + a_1 \cdot x_i,$$

$$\text{где } y_i = \sigma_i, \quad x_i = w \sqrt{\ln \frac{n}{i}},$$

$$a_0 = \overset{\vee}{\sigma}, \quad a_1 = \sigma_w.$$

При определении параметров перебирают значения w , начиная с $w = 1$, с шагом: $\pm 0,1; 0,01; 0,001$. Для каждого значения показателя степени методом наименьших квадратов определяются параметры a_0 и a_1 . По найденным параметрам, вычислив значения расчетных напряжений σ_{iP} , определяют разности $\sigma_i - \sigma_{iP}$ и сумму квадратов разностей. За искомые значения параметров распределения принимают такие значения, при которых:

$$\sum_1^n (\sigma_i - \sigma_{iP})^2 = \min.$$

Параметры функции распределения: $\overset{\wedge}{\sigma}$ – максимальное, $\overset{\vee}{\sigma}$ – минимальное значения напряжений нагруженного блока, σ_w – параметр с размерностью напряжения, w – показатель степени, – для всех блоков нагружения каждого типового режима эксплуатации сводятся в итоговую таблицу. Кроме того, в таблицу вносятся числа циклов нагружения на 1 км пробега для каждого нагруженного блока. Примером может быть таблица 1.

Параметры аппроксимирующей функции

Наименование конструкции	Частота	Число циклов на 1 км пробега	$\hat{\sigma}$ МПа	$\check{\sigma}$ МПа	σ_w МПа	w
Лонжерон автомобиля МАЗ-5551	1	332	67,3	3,6	30,6	2,22
	2	40	32,4	2,6	9,4	0,953
	3	8	17,1	9,3	6,3	1,48
Балка передней оси автомобиля БелАЗ - 7521	1	750	166,8	0	67,4	1,922
	2	198	126,8	3	86,6	4,122
	3	50	139,6	58,6	43,3	1,752
	4	10	124,2	101,2	16,5	1,106

Результаты аппроксимации нагрузочных блоков с использованием функции распределения (8) сплошными линиями нанесены на графики (рис. 3 и рис. 4).

Расчет циклической долговечности. Расчет циклической долговечности при действии вариационных рядов напряжений является первым этапом синтеза долговечности суммированием усталостных повреждений в условиях многоступенчатого нагружения. Для суммирования необходимо иметь параметры уравнения кривой усталости и вариационный ряд напряжений в виде многократно повторяющегося блока убывающих от σ_1 до σ_n напряжений. Возможны варианты расчета в зависимости от соотношения напряжений ряда и начального значения предела выносливости с учетом снижения последнего в процессе усталостного повреждения.

При $\sigma_n \geq \sigma_{-1}$ для расчета циклической долговечности может быть использована гипотеза Пальмгрена – Майнера в записи:

$$N_{\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\beta_i}{N_i} \right)^{-1} \quad (9)$$

или

$$\frac{1}{N_{\Sigma}} = \frac{\beta_1}{N_1} + \frac{\beta_2}{N_2} + \frac{\beta_3}{N_3} + \dots + \frac{\beta_i}{N_i} + \dots + \frac{\beta_n}{N_n},$$

где N_{Σ} - суммарная циклическая долговечность, N_i - циклическая долговечность при регулярном нагружении и напряжении σ_i , β_i - относительная продолжительность действия этого напряжения в ступенчатом нагрузочном блоке.

При $\sigma_1 > \sigma_{-1} > \sigma_n$ суммарное число циклов, необходимое для снижения предела выносливости до значения в момент предельного повреждения, определяется из уравнения:

$$N_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{j=k} \Delta N_{\Sigma j} = \sum_{j=1}^{j=k} \left(1 / \sum_{i=1}^{i=n_j} \frac{\beta_i}{\Delta N_{ji}} \right), \quad (10)$$

где ΔN_{Σ} – суммарное число циклов, необходимое для снижения предела с подключением к повреждению следующего по величине напряжения ряда, k – количество напряжений, подключаемых к процессу повреждения по мере снижения предела выносливости, ΔN_{ji} – разность циклических долговечностей при нагружении напряжением σ_i на каждом этапе снижения предела выносливости.

Рассмотрим результаты расчета с использованием уравнения (10) циклической долговечности опасной по усталости зоны рамы тракторного прицепа при движении по грунтовой дороге.

При анализе результатов испытаний локальных моделей опасной зоны соединения поперечины и лонжерона рамы использовано уравнение кривой усталости:

$$N = \frac{Q}{\sigma} \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_{-1}}{v_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (11)$$

где $Q = \sigma_1 \cdot N_0$ – коэффициент сопротивления усталости, v_0 – параметр с размерностью напряжения. Получены следующие характеристики сопротивления усталости при регулярном нагружении: $\sigma_1 = 63,84$ МПа, $v_0 = 48,3$ МПа, $Q = 7,92 \cdot 10^7$ МПа·цикл.

При расчетах использовалось значение $N_0 = const. = 1,24 \cdot 10^6$ циклов. Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Расчет циклической долговечности рамы тракторного прицепа

β_i	0,0002	0,0009	0,0033	0,0108	0,0304	0,0721	0,1439	0,2392	0,3243	0,1749	ΔN_{Σ} , тыс. циклов	
σ_i , МПа	117,8	107,4	97,08	86,68	76,28	65,88	55,48	45,08	34,68	24,38		
σ_{Ri} , $Q_i \cdot 10^{-7}$	N , тыс. циклов											
63,84	7,92	266	383	570	892	1539	3830				7225	
54,48	6,76	180	255	372	561	897	1599	4734			3296	
44,08	5,47	113	159	229	337	516	840	1536	4714		1402	
33,68	4,18	68	95	135	194	293	457	762	1445	4682	658	
23,38	2,90	38	50	73	105	155	236	378	655	1310	4623	586

В первой и второй строках таблицы внесены характеристики одного из расчетных нагрузочных блоков, в два левых столбца - характеристики сопротивления усталости, как в начальный момент нагружения блоками, так и в процессе усталостного повреждения. В таблице приведены значения кривой усталости с использованием уравнения (11).

Из десяти уровней напряжения в начальный момент нагружения многократно повторяющимися блоками нагрузок повреждают только шесть уровней. Четыре уровня подключаются к повреждению по мере снижения предела выносливости (в нашем случае на один МПа ниже подключаемого к повреждению напряжения).

Значения ΔN_{ji} определяются как разность значений N_i . Число циклов, необходимое для подключения к повреждению седьмой ступени:

$$\Delta N_{\Sigma 1} = 10^6 / \left(\frac{0,2}{266-180} + \frac{0,9}{383-255} + \frac{3,3}{570-372} + \frac{10,8}{892-561} + \frac{30,4}{1539-897} + \frac{72,1}{3830-1599} \right) = 7,225 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

Для подключения восьмой ступени требуется 3 млн.296 тыс.циклов (см. таблицу 2) и т.д.

Разрушение (долом) происходит под действием максимального напряжения блока (в таблице 117,88 МПа), но тогда, когда при конечном значении предела выносливости циклическая долговечность равна одному циклу. В нашем случае ($N_1=38$) минимальное напряжение блока выше конечного значения предела выносливости. Следовательно, на конечном этапе повреждения справедливо уравнение (9):

$$\Delta N_{\Sigma 5} = 10^6 / \left(\frac{0,2}{38} + \frac{0,9}{50} + \frac{3,3}{73} + \frac{10,8}{105} + \frac{30,4}{155} + \frac{72,1}{236} + \frac{143,9}{378} + \frac{239,2}{655} + \frac{324,3}{1310} + \frac{174,9}{462,3} \right) = 5,86 \cdot 10^5 \text{ циклов.}$$

Циклическая долговечность опасной зоны рамы тракторного прицепа равна:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=5} \Delta N_{\Sigma i} = 13,167 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

Определение ресурса конструкций при типовом режиме эксплуатации.

Ресурс конструкций L при действии одного многократно повторяющегося нагрузочного блока определяется циклической долговечностью N_{Σ} и числом циклов многократно повторяющегося блока на 1 км пробега (см. таблицу 1):

$$L = \frac{N_{\Sigma}}{l},$$

где L – ресурс конструкции при действии одного нагрузочного блока, l – число циклов многократно повторяющегося блока на 1 км пробега.

Обратную величину ресурса $\frac{1}{L}$ можно рассматривать как повреждающее действие каждого нагрузочного блока.

В типовых условиях эксплуатации при действии многократно повторяющихся блоков случайного многочастотного нагружения **суммарное повреждающее действие всех одновременно действующих нагрузочных блоков равна сумме повреждающих действий нагрузочных блоков каждой частоты:**

$$\frac{1}{L_c} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_i} + \dots + \frac{1}{L_k} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{L_i}.$$

Следовательно, ресурс конструкций при типовом режиме эксплуатации определяется из уравнения:

$$L_c = 1 / \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{L_i}. \quad (12)$$

Для конструктора представляет интерес относительное повреждающее действие нагрузочных блоков (например, блоков, определяемых колебаниями подрессоренных или неподрессоренных масс, микро профилем дороги и т.д.):

$$\frac{L_c}{L_1} + \frac{L_c}{L_2} + \dots + \frac{L_c}{L_i} + \dots + \frac{L_c}{L_k} = 1.$$

В такой записи уравнение характеризует большее или меньшее участие блока в усталости.

Заключение. Важнейшими результатами от использования разработанной методики являются: адекватный учет условий эксплуатации, случайной нагруженности и изменения в эксплуатации характеристик сопротивления усталости конструкций при прогнозирующих расчетно-экспериментальных оценках их ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высоцкий М.С., Почтенный Е.К., Горбачевич М.И. Суммирование усталостных повреждений при двухчастотном нагружении// Доклады АН Беларуси, 1992, т.36, №6, с.511-514.; 2. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Оценка нерегулярного нагружения деталей машин// Колебания и волны в экологии, технологических процессах и диагностике: Тез. Докл. Междунар. конф.: - Минск, 1993.- С.107.; 3. Высоцкий М.С., Почтенный Е.К., Парфенович Е.К. Сопротивление усталости элементов конструкций при двухчастотном нагружении// Вестник машиностроения, 1995, №1, с.3-6.; 4. Почтенный Е.К., Кадолко Л.И., Парфенович Е.О. Анализ случайного многочастотного нагружения элементов конструкций// Вести АН Беларуси, серия физ.-техн. наук, 1997, № 4, с. 26-30.; 5. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Анализ сопротивления усталости конструкций при случайном многочастотном и многорегимном нагружении// В сб. Материалы международной 54-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА. - В 10 – ти частях. – Минск, –2000. – Ч. 6. – С. 14.; 6. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Схематизация случайного нагружения// В сб. Материалы международной 54-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА/ В 10 – ти частях. – Минск, –2000. – Ч. 6. – С. 107.; 7. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым// Весці НАН Беларусі: Серыя фізіка-тэхнічных навук.- 2000. - №2. - С. 59 – 61.; 8. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Суммирование усталостных повреждений при реальном многорегимном нагружении// Тез. докл. Международной научно-технической конференции “Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций”// Отв. ред. В.Т. Трошенко: В 2 томах. – Киев, 2000. – Т. 1. – С. 195 –196.; 9. Капуста П.П. Теоретический анализ распределения Вейбулла применительно к оценке нагруженности деталей машин// В сб. Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 17. Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: УП “Технопринт”, 2001. - С. 317-323.; 10. Капуста П.П. Уравнения нерегулярной нагруженности деталей машин// В сб. Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 17. Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: УП “Технопринт”, 2001. - С. 323-327.; 11. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Прогнозирование случайного нагружения и построение нагрузочных блоков// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология изготовления. Сборник научных трудов. Вып. 1. В 3-х т. - Т. 2/ Под общ. ред. П.А. Витязя. – Мн.: УП «Технопринт», 2002. - С. 334 – 344.; 12. Капуста П.П. Вероятностная оценка характеристик сопротивления усталости