

Н.Н. САРКИСЯН

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНОЙ НАГРУЖЕННОСТИ

Предложен метод эквивалентного программирования случайной нагруженности машиностроительных конструкций, пригодный как для "жесткого", так и для "мягкого" способов схематизации реального процесса. Дается анализ предложенного метода, который может существенно сократить время испытаний, поскольку в программе реализуются только амплитуды напряжений, вызывающие усталостное повреждение.

**Ключевые слова:** долговечность, коэффициент широкополосности, метод схематизации, программное нагружение.

В процессе обработки машиностроительных конструкций большое внимание уделяется стендовым вибрационным испытаниям, имитирующим условия их реальной эксплуатации. Как правило, программы стендовых испытаний составляют на основе имеющейся статистики по распределению нагрузок и числа циклов их, полученных для существующих конструкций аналогичного класса [1, 2 и др]. Следовательно, наиболее точная информация о долговечности конструкции может быть получена, если в процессе испытаний воспроизводится реальный спектр нагрузок, характерный для проектируемой машины. Тогда условие эквивалентности нагружения для стендовых испытаний может быть записано как

$$S_{\sigma}^p(\omega) = S_{\sigma}^c(\omega), \quad (1)$$

где  $S_{\sigma}^p(\omega)$ ,  $S_{\sigma}^c(\omega)$  - энергетические спектры реального и стендового нагружения.

Обеспечение равенства (1) требует проведения стендовых испытаний при случайном нагружении, что не всегда возможно. Определенные результаты по долговечности, близкие к долговечности при случайном нагружении, могут быть получены, если случайное распределение нагрузок заменить программным. При программных испытаниях нагрузки реализуются с помощью гармонического процесса, амплитуда которого изменяется согласно функции распределения амплитуд напряжений  $f(\sigma_a)$  реального процесса. Кроме того, процесс нагружения с переменной частотой заменяется процессом с постоянной частотой в предположении, что в рассматриваемом частотном диапазоне этот фактор не оказывает влияния на долговечность. Тогда условие (1) можно переписать как

$$f^p(\sigma_a) = f^c(\sigma_a) \mid_{\omega=\text{const}}, \quad (2)$$

$$N^p = N^c, \quad (3)$$

где  $f^p(\sigma_a)$  и  $f^c(\sigma_a)$  - функции распределения эксплуатационных и стендовых амплитуд напряжений;  $N^p$  и  $N^c$  - число циклов амплитуд напряжений  $\sigma_a$  в реальных условиях и на стенде.

Таким образом, главной задачей при использовании программного нагружения является нахождение функции распределения амплитуд напряжений и статистических характеристик процесса нагружения либо аналитическими методами по расчетным статистическим характеристикам нагружения объектов [2-4], либо в результате обработки осциллографических записей случайного процесса одним из существующих методов схематизации [5-6 и др.].

Известно, что самым “жестким” методом схематизации (оказывающим наибольшее повреждающее действие) является метод максимумов, при котором за амплитуду процесса принимается его максимальное значение. Наименее “жестким” методом схематизации является метод размахов, при котором в качестве амплитуды принимается половина приращения процесса между двумя соседними экстремумами. Существует и множество других методов. Используя какой-либо метод схематизации случайного процесса, можно получить соответствующее распределение амплитуд.

В настоящей работе рассматриваются два метода схематизации: максимумов и размахов, для которых существуют аналитические выражения для функций распределения амплитуд. Эти функции распределения  $f_{\max}(\sigma_a)$  и  $f_{\text{разм}}(\sigma_a)$ , а также условия (1) и (2), являются основной информацией при построении эквивалентных программ усталостных испытаний. Отметим также, что распределение амплитуд есть функция параметра широкополосности, коэффициент  $\beta$  которого равен отношению среднего числа экстремумов рассматриваемого процесса к среднему числу пересечений нулевого уровня.

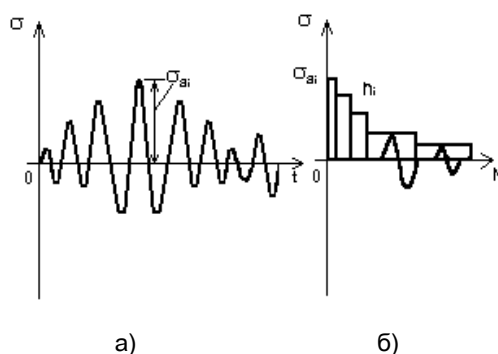


Рис.1. Пример составления программы (б) для узкополосного случайного процесса (а)

Как непрерывная реализация напряжений по числу циклов согласно функции  $f(\sigma_a)$ , так и дискретное ее представление предполагают гармоническую реализацию нагрузок. В этом случае наибольшего совпадения результатов усталостных испытаний при случайном и программном нагружениях следует ожидать для процессов с  $\beta=1$ , когда случайный процесс имеет характер биений, т.е. является узкополосным (рис.1а), и может быть приближенно представлен зависимостью

$$\sigma(t)=a(t) \sin \omega_0 t, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  - средняя частота процесса;  $a(t)$  - амплитуда (случайная функция времени).  
 Для рассматриваемого процесса число максимумов и положительных пересечений нулевого уровня одинаково, и различие между программным и случайным нагружением заключается в упорядоченном чередовании дискретных амплитуд (рис.1б) согласно  $f(\sigma_a)$ , т.е.  $f(\sigma_a)=f_{\max}(\sigma_a)$ . При  $\beta>1$  в случайном процессе появляются промежуточные экстремумы. Если два соседних максимума и минимума принять за размах, то его среднее значение  $\sigma_m$ , характеризующее смещение цикла, будет отлично от нуля (рис.2а).

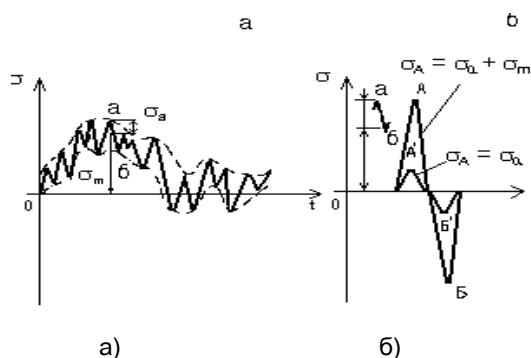


Рис.2. Пример составления программы (б) для широкополосного случайного процесса (а) по методу максимумов и размахов

Положим, что для составления программы используется функция плотности распределения максимумов  $f_{\max}(\sigma_a)$ . Тогда цикл аб (рис.2а), имеющий амплитуду  $\sigma_a$  и смещение цикла ( $m$ , заменяется в программе циклом АБ (рис.2б) с амплитудой

$$\sigma_A = \sigma_a + \sigma_m. \quad (5)$$

В соответствии со спрямленной диаграммой предельных состояний и кривой усталости (рис.3) можно оценить ошибку по долговечности, которая допускается заменой (5) реального случайного процесса нагружения. Эквивалентное по долговечности напряжение цикла с нулевым смещением запишется в виде

$$\sigma_a^{\circ} = \sigma_b \sigma_m / (\sigma_b - \sigma_m), \quad (6)$$

где  $\sigma_b$  - предел прочности материала.

Равенство  $\sigma_a^{\circ}=\sigma_a$  справедливо в том случае, если  $\theta=45^\circ$ , что невозможно, так как тогда  $\sigma_a=\sigma_b$ . Поэтому  $\sigma_a^{\circ}<\sigma_A$ , и программное нагружение оказывается всегда более “жестким” по сравнению с исходным случайным процессом. Следовательно, замена случайного широкополосного процесса эквивалентным случайным нагружением дает заниженную долговечность, и ошибка  $\Delta \lg N$  (рис.3) идет в запас прочности. Отметим, что чем больше  $\beta$  отличается от единицы, тем выше ошибка  $\Delta \lg N$ .

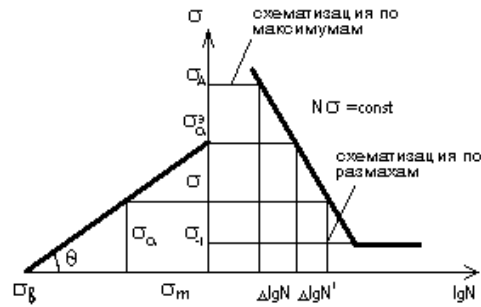


Рис.3. Сравнение долговечностей при использовании различных методов схематизации

Если для составления программы используется функция распределения плотности размахов  $f_{\text{разм}}(\sigma_a)$ , то в этом случае цикл  $ab$  (рис. 2а) заменяется в программе циклом  $A'B'$  (рис.2б) без учета смещения цикла  $\sigma_m$  с амплитудой

$$\sigma'_A = \sigma_a. \quad (7)$$

В соответствии с диаграммой предельных состояний и кривой усталости (рис.3) можно оценить ошибку по долговечности, которая допускается заменой (7) реального случайного процесса нагружения. Эквивалентное по долговечности напряжение цикла с нулевым смещением запишется в виде (7). Равенство  $\sigma_a^3 = \sigma'_A$  справедливо, если  $\sigma_m=0$ , т.е.  $\beta=1$ , и распределение размахов и максимумов совпадает. Для других случаев

$$\sigma'_A = \sigma_a^3, \quad (8)$$

и программное нагружение по сравнению с исходным случайным процессом оказывается более “мягким”. Следовательно, замена случайного широкополосного процесса эквивалентным программным нагружением дает завышенную долговечность, и ошибка  $\Delta \lg N'$  (рис.3) идет в опасную сторону. Асимметрию процесса учитывают по диаграмме предельных состояний, где каждому сочетанию  $\sqrt{\langle \sigma^2 \rangle_i}$  и  $\beta_k$  будет соответствовать точка в плоскости с координатами  $\lg N, \sqrt{\langle \sigma^2 \rangle}$  (рис.4).

Используя известную линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений в виде  $\sum n_i / N_i = a$  (здесь  $n_i$  и  $N_i$  - соответственно число циклов действия и разрушающее число циклов для напряжения  $i$ -й амплитуды;  $a$  - некоторое положительное число), можно оценить гипотезу суммирования усталостных повреждений при замене случайного процесса программным. Так как доля общего числа циклов каждого уровня напряжений  $\sigma_{ai}$  в программе составляет  $n_i$ , а каждого уровня амплитуды  $\sigma_a$  случайного процесса и соответствующих ему смещений цикла  $\sigma_{mi}$  с учетом (6) и (8) -  $n_j$ , то ошибка в накоплении повреждений запишется в виде

$$\varepsilon = \sum n_i / N_i - \sum n_j / N_j. \quad (9)$$

Из анализа выражения (9) можно отметить, что при составлении программ испытаний, согласно схематизации по максимумам и размахам, ошибка  $\varepsilon$  меняет знак, т.е.  $\varepsilon > 0$  при схематизации по максимумам и

$\varepsilon < 0$  - при схематизации по размахам. Следует ожидать, что  $\varepsilon \rightarrow 0$  при  $\beta \rightarrow 1$ . Использование выражения (9) затруднено тем, что каждый цикл нагрузки в случайном процессе необходимо приводить к эквивалентному, что практически невозможно, если отсутствует запись реального процесса. Тем не менее, выражение (9) удобно при исследовании замены случайного процесса программным при использовании различных методов схематизации.

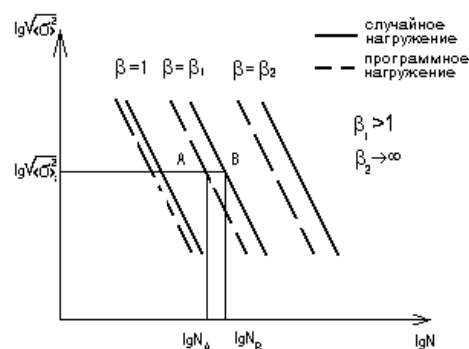


Рис.4. Сравнение долговечностей при случайном и программном нагружениях для процессов с различной структурой

Таким образом, решая задачу эквивалентной замены случайного процесса нагружения программным, можно утверждать, что ни один из методов схематизации не дает повреждения, адекватного повреждению при случайных нагрузках. Однако преимущество программных испытаний заключается в их относительно простой реализации на виброоборудовании. Долговечности, полученные методом схематизации по максимумам при программном нагружении, являются наименьшими, и составление программ можно проводить по расчетным статистическим характеристикам случайной нагруженности объекта и функции распределения максимумов напряжений. Кроме того, испытания по программам являются форсированными. Сокращение времени испытаний достигается за счет того, что в программе реализуются не все амплитуды напряжений, а только те, которые вызывают усталостное повреждение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасснер Е. Программные (эксплуатационные) усталостные испытания применительно к самолетным конструкциям // Усталость самолетных конструкций. - М.: Оборонгиз, 1961. - С. 20-45.
2. Яценко Н.Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей. - М.: Машиностроение, 1972. - 152 с.
3. Гусев А.С. О распределении амплитуд в широкополосных случайных процессах при схематизации их по методу полных циклов // Статистические методы расчетов. - М.: Машиноведение. - 1974. - 1.1. - С.25-32.
4. Райс С. Теория флуктуационных шумов // Теория передачи электрических сигналов при наличии помех. - М.: ИЛ, 1953. - С. 50-59.

5. Гольд Б.В. Прочность и долговечность автомобиля. - М.: Машиностроение, 1974. - 90 с.
6. Дмитриченко С.С., Благовещенский Ю.Н., Нерсисян Р.В. Использование эмпирических распределений амплитуд напряжений для накопленного повреждения // Вестник машиностроения. - М. - 1969. - <sup>1</sup> 5. - С.30-38.

ЕрАСИ. Материал поступил в редакцию 15.02.1998.

## Ն.Ն. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

### ՊԱՏԱՀԱԿԱՆ ԲԵՌՆՎԱԾՈՒԹՅԱՆԸ ՀԱՄԱՐԺԵՔ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ԵՎ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Առաջարկված է մեքենաշինական կառուցվածքների պատահական բեռնվածությանը համարժեք ծրագրավորման մեթոդ, որը կիրառելի է իրական գործընթացի սխեմայացման ինչպես օկոշտ, այնպես էլ օփափուկ եղանակների համար: Առաջարկված մեթոդը կարող է էապես կրճատել փորձարկման ժամանակը, քանի որ ծրագրում իրացվում են լարման միայն այն լայնությունները, որոնք առաջացնում են հոգնածային վնասվածք: Տրվում է մեթոդի վերլուծությունը:

N.N. SARGSYAN

### ANALYSIS AND ELABORATION OF EQUIVALENT PROGRAMMING METHOD OF RANDOM LOADING

A method of equivalent programming for random loading is suggested for machine-building constructions. This method is suitable for real process schemed both for "hard" and "soft" methods. The analysis of the suggested method can really decrease the experimental time, since the strain amplitudes causing the fatigue damage are realized in this program.