

С. С. ДМИТРИЧЕНКО, Р. В. ПЕРСЕСЯН

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

При установлении статистических закономерностей нагруженности и расчетах усталостной прочности деталей машин, работающих в условиях переменных нестационарных нагрузок, применяется аппарат теории вероятностей и математической статистики; при этом существенно повышается точность прогноза срока службы [1]—[3].

Одним из основных этапов при получении исходных данных для расчета долговечности узлов и деталей автомобилей, тракторов, самоходных шасси и других транспортных и с.-х. машин является тензометрическое исследование напряженности изучаемых элементов конструкций [4]. В связи с разнообразием условий работы и вариантов использования указанных машин требуются достаточно длительные многоканальные записи большого числа эксплуатационных режимов нагружения. Огромный объем исходной информации и большие затраты труда на ее последующую статистическую обработку препятствуют широкому внедрению расчетных методов оценки срока службы.

При современном уровне развития вычислительной техники трудоемкость расчетов на усталость можно значительно уменьшить. Решение задач усталостной прочности на ЭВМ (электронно-вычислительная машина) целесообразно проводить по следующей схеме. В ЭВМ вводятся данные о нагруженности деталей и их сопротивлении усталости, а также о использовании машины, а на выходе получаются величины, характеризующие долговечность конструкции.

На первом этапе вычислений проводится алгоритмизация выбранного метода решения задачи: построение различных вариантов алгоритма, проверка их правильности, внесение необходимых исправлений, выбор оптимального варианта. На втором этапе составляется программа — перевод алгоритма на язык машины. На третьем этапе (отладка программы) проверяется правильность программы и полнота разработанного алгоритма.

Создание алгоритма, полностью исключающего анализ промежуточных этапов решения задачи усталостной прочности, связано со значительными трудностями (например, выбор теоретического закона, наилучшим образом описывающего эмпирические ряды распределений). Поэтому на начальной стадии применения ЭВМ для оценки долговеч-

ности элементов конструкций целесообразно программировать наиболее трудоемкие этапы вычислений;

1. Статистический анализ эмпирических распределений и подбор теоретических законов. 2. Расчетные оценки долговечности (вычисление коэффициентов запаса прочности или накопленного повреждения).

Алгоритм первого этапа

Алгоритм вычисления статистических характеристик и оценки их соответствия нормальному и нормально-логарифмическому законам приведен в табл. 1. По данным ряда работ [1], [4], [6] спектры напряжений, систематизированные по максимумам и размахам, удовлетворительно описываются этими законами.

Таблица 1

Алгоритм вычисления статистических характеристик эмпирических рядов распределений и критериев согласия Колмогорова и Пирсона

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_{j-1}, \dots, x_k$ — ряды чисел, принятых для обозначения разрядов;
 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_{j-1}, \dots, n_k$ — разрядные частоты;
 N — объем ряда;
 h — величина разряда (при принятом методе обработки осциллограмм для распределений, систематизированных по максимумам, $h = 1$, для распределений, систематизированных по размахам, $h = 0,5$);
 m_ν ($\nu = 1, 2, 3, 4$) — начальные эмпирические моменты;
 μ_ν ($\nu = 1, 2, 3, 4$) — центральные эмпирические моменты;
 S — основное (среднее квадратическое) отклонение ряда;
 α — асимметрия;
 i — эксцесс;
 $\Phi'(t)$ — плотность вероятности распределения;
 t_j — нормированные значения случайной величины;
 P_j — гипотетические вероятности,

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
$x_1, x_2, x_3, \dots, x_{j-1}, \dots, x_k$ $n_1, n_2, n_3, \dots, n_{j-1}, \dots, n_k$	
АЛГОРИТМ	
$N = \sum n_j$	$h = x_j - x_{j-1}$
$m_1 = \frac{1}{N} \sum n_j x_j$	$m_2 = \frac{1}{N} \sum n_j x_j^2$
$m_3 = m_1 \cdot m_2 - m_1^2$	$m_4 = m_1 \cdot 3m_2 m_3 - 2m_1^2 m_3$
$m_4 = m_1 \cdot 6m_2 m_3 - 3m_1^2 m_4$	
$S = \sqrt{m_2 - m_1^2}$	$L = \frac{m_3}{m_2^2} \cdot i = \frac{m_4}{m_2^3} - 3$
$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$	
$t_j = \frac{x_j - m_1}{S}$	$t_j = \frac{x_j - m_1 + h \ln \frac{1 - P_j}{1 - P_{j-1}}}{S}$
$t_{j-1} = \frac{x_{j-1} - m_1}{S}$	$t_{j-1} = \frac{x_{j-1} - m_1 + h \ln \frac{1 - P_{j-1}}{1 - P_{j-2}}}{S}$
$P_j = \int_{-\infty}^{t_j} \Phi'(t) dt \cdot j = 1, 2, \dots, k \cdot P_j = \Phi(t_j)$	
$\chi^2 = \sum \frac{(n_j - NP_j)^2}{NP_j}$	
$D_k = \max \{ P_1 - P_1 , P_2 - P_2 , \dots, P_k - P_k \}$	
$\lambda = D_k \cdot \sqrt{N}$	
ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ:	
$m_1, S, L, i, \chi^2, \lambda$	
ПРИМЕЧАНИЕ	
ФОРМУЛЫ ДЛЯ m_1, t_j, L ВАЛИДНЫ И ДАЮТ СЕБЯ ДЛЯ НОРМАЛЬНОГО СЛУЧАЯ ДЛЯ НОРМАЛЬНО-ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ. ОСТАЛЬНЫЕ ФОРМУЛЫ ВАЛИДНЫ ДЛЯ ОБОИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ	

χ^2 — критерий согласия Пирсона;

D_k — максимум отклонения (по модулю) выборочного распределения от гипотетического;

λ — число, с помощью которого определяется критерий согласия Колмогорова.

Для подсчетов критерия Пирсона перед программированием на ЭВМ частоты крайних разрядов укрупняются до величины не менее 5 [5]. Перед проверкой соответствия по критерию Пирсона подсчитывается число степеней свободы $\nu = K - 3$, где K — число разрядов.

По величине ν с помощью таблицы XV [5] определяется величина χ_0^2 и производится сравнение χ^2 и χ_0^2 . Теоретическое распределение является приемлемым при условии, что $\chi^2 \leq \chi_0^2$. Величина χ_0^2 выбирается для общепринятого уровня значимости (5%), т. е. для вероятности $P(\chi^2) = 0,05$.

Величина критерия согласия Колмогорова $(1 - K(l))$ определяется по параметру l из табл. XIV [5]. Чем больше величина критерия Колмогорова, тем лучше соответствие эмпирического и теоретического распределения. Отметим, что для статистического анализа каждых 50 осциллограмм на ЭВМ требуется около часа машинного времени (после отладки программы). При выполнении вручную такого же объема вычислений, с применением клавишных счетных машин, затрачиваются сотни часов.

Алгоритм второго этапа

При расчетной оценке долговечности элементов конструкций применяются теоретические распределения, полученные при первом этапе. При использовании закона линейного суммирования повреждений для режимов с непрерывным спектром напряжений расчетные формулы имеют следующий вид [1]:

Приведенное напряжение:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt[m]{\frac{N_{\text{сум}}}{N_0} \int_{\sigma_{\text{min}}}^{\sigma_{\text{max}}} \sigma^m \Phi'(\sigma) d\sigma} \quad (1)$$

коэффициент запаса прочности по усталости

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{пр}}} \quad (2)$$

накопление повреждения

$$D_N = \frac{N_{\text{сум}}}{N_0 \sigma_{-1}^m} \int_{\sigma_{\text{min}}}^{\sigma_{\text{max}}} \sigma^m \Phi'(\sigma) d\sigma \quad (3)$$

В приведенных формулах

σ_{-1} — предел выносливости детали;

σ_{min} — нижний предел интегрирования (наименьшее повреждающее напряжение);

$N_{\text{сум}}$ — суммарное число циклов перемен напряжений, испытываемых деталью за расчетный срок службы;

N_0 — число циклов, соответствующее перелому кривой усталости;

ε — перегрузочное напряжение;

m — показатель, характеризующий наклон левой ветви кривой усталости в логарифмических координатах;

$\Phi'(\varepsilon)$ — плотность вероятности распределения напряжений нестационарного режима;

ε_{\max} — верхний предел интегрирования (максимальное напряжение, принимаемое при расчете).

Вычисление интеграла

$$\int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \varepsilon^m \Phi'(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

в формулах приведенного напряжения и накопленного повреждения весьма трудоемко, в связи с чем целесообразно привести интеграл к виду, удобному для программирования на цифровых ЭВМ. По опыту вычислений, выполненных ПАТИ, можно принять верхний предел интегрирования — $\varepsilon_{\max} = \infty$, при этом приведенное напряжение изменяется лишь на 0,1—0,3%.

Таким образом, интеграл (4) можно записать в разрядных единицах в виде

$$C^m \int_{x_{\min}}^{\infty} x^m \Phi'(x) dx, \quad (5)$$

где C — цена разряда в кг/см².

При систематизации амплитуд напряжений по размахам в качестве выравнивающего закона может быть принято нормально-логарифмическое распределение [1], [4], [5], где логарифм случайной величины — $\ln x$ распределен по нормальному закону.

Формула (5) для нормально-логарифмического закона имеет вид:

$$\int_{x_{\min}}^{\infty} x^m \Phi'(\ln x) d(\ln x). \quad (6)$$

Дифференциальная функция (плотность вероятности распределения) нормально-логарифмического закона может быть представлена как

$$\Phi'(\ln x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{-\frac{(\ln x - \overline{\ln x})^2}{2S^2}} \quad (7)$$

где $\overline{\ln x}$ — среднее значение ряда;

S — основное (среднее квадратическое) отклонение ряда.

В силу (6) и (7), получим новое выражение интеграла (4)

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \int_{x_{\min}}^{\infty} x^m e^{-\frac{(\ln x - \overline{\ln x})^2}{2S^2}} d(\ln x). \quad (8)$$

ную, установлена высокая точность вычислений и эффективность разработанных алгоритмов.

Для инженерного анализа долговечности деталей машины в дальнейшем необходима разработка такого алгоритма, который бы исключал участие расчетчика на промежуточных стадиях вычислений.

Комиссия по технологии машиностроения

АН АрмянССР

Поступило 31.X 1964

Ս. Վ. ԳՄԵՏՐԵՉՅԱՆ, Բ. Վ. ԿԵՐՍԵՅԱՆ

ՎԻՆԱՏՐՈՒԿՑԻԱՆԵՐԻ ՏԱՐԲԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾՈՒՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ
ԳՆԱՀԱՏՈՒԹՅՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԿԱՆ-ՀԱՇՎԻԶ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐՈՎ

Ա մ փ ո ւ փ ո ռ ը

Կոնստրուկցիաների հոգնածային ամրության խնդիրների լուծման վիճակագրական մոտեցումը թույլ է տալիս էականորեն բարձրացնելու նրանց շահագործական երկարակեցության նախադաշտի ման ճշգրիտ լինելու Ոչկացիկ բնույթների տակ աշխատող մեքենաների տարրերի երկարակեցության համակարգի գնահատման և հոգնածային ամրության հաշվումների համար էլեկտրոնային-հաշվիչ մեքենաների կիրառումը բավականապես նվազեցնում է հոգնածային հաշվումների աշխատատարությունը:

Էլեկտրոնային մեքենաների միջոցով կատարվող հաշվումների համար նախորդ տնհրածեշտ է կազմել այդորիքմ, որի մահրամասն մշակումը հաջող հաշվումների հիմքն է:

Հաշվիչ մեքենաների կիրառման սկզբնական շրջանում ավելի նպատակաշարմար է ձրադրել հաշվումների աշխատատար հետեկյալ փուլերը:

1. Էմպիրիկ բաշխումների վիճակագրական վերլուծումը և տեսական բերնների բնտրությունը:

2. Երկարակեցության հաշվային գնահատումը:

Այս դմվարին փուլերի մանրամասն ալգորիթմները բերված են հոգվածում:

Հետադաշում, կոնստրուկցիաների երկարակեցության ինժեներական վերլուծման համար տնհրածեշտ է միամական ալգորիթմի մշակում, որը կրացաւի հաշվողի մանակցությունը հաշվումների միջանկյալ ստացիաներում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Машигиз, 1963.
2. Усталость самолетных конструкций. Сб. переводов под ред. И. И. Эскина. Оборонгиз, 1961.
3. Fatigue Testing and Analysis of Results. Ed. by W. Weibull. Pergamon Press, New-York, 1961.
4. Дмитриченко С. С., Кугель Р. В., Филатов Э. Я., Нейченко Е. Г., Стариков В. М. Современные методы анализа напряженности конструкций при исследовании влияния скорости движения трактора. Тракторы и сельскохозяйственные машины, № 3, 1964.
5. Филатов Э. Я. Исследование эксплуатационной нагруженности и оценка долговечности рам тракторов. Институт Механики АН УССР, 1962.
6. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1961.
7. Жоголев Е. А., Трифонов И. П. Курс программирования. Изд. Наука, 1964.