

данными при обработке на ЭВМ результатов научного эксперимента // Автоматика и вычислительная техника. 1977. № 2. С. 54-58.

2. Автоматизация проектирования АСУ с использованием пакетов прикладных программ /Ю.М.Черкасов, В.А.Тригштейн, Ю.Б.Радашевич и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 328 с.

3. Технология системного моделирования /Е.Ф.Аврамчук, А.А.Вавилов, С.В.Емельянов и др. М.: Машиностроение. Берлин: Техник, 1988. 520 с.

4. Фути К., Судзуки Н. Языки программирования и схемотехника СЕИС. М.: Мир, 1988. 224 с.

5. Андрианов А.И., Вычков С.П., Хорошилов А.И. Программирование на языке Симула-67. М.: Наука, 1985. 288 с.

6. *Wilson R. Object-oriented languages reorient programming techniques // Computer Design. 1987. November 1. P.52-62.*

7. Вирт Н. Программирование на языке Модула-2. М.: Мир, 1987. 224 с.

УДК 681.518.2:620.16

Ш.У.Исмаилов, М.И.Рева, О.В.Шакирова

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ КВАНТОВАНИЯ
В ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
ДЛЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

(г. Ленинград)

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию измерительно-вычислительных систем (ИВС) для измерения накопленных усталостных повреждений (НУП) сложных машиностроительных конструкций в процессе их эксплуатации. Внедрение систем данного класса должно способствовать существенному снижению аварийности и повышению ресурса эксплуатируемой техники, например в авиации до 45-60тыс. летных часов /1/.

В работе рассматриваются вопросы, связанные с построением вычислительной подсистемы многоканальной ИВС, реализующей группу так

называемых "счетных" методов измерения НУП, обобщенные математические модели которых представимы в виде следующих выражений: $F_7[x(t)] = F_3 F_d F_w F_c F_e F_m[x(t)]$ при измерении НУП в реальном масштабе времени, и $F_2[x(t)] = F_3 F_d F_w F_c F_e F_m[x(t)]$ при измерении НУП со сдвигом во времени.

Здесь $x(t)$ - процесс изменения механического напряжения контролируемого элемента конструкции от времени; F_m - оператор измерительного преобразования $x(t)$; F_e - оператор выделения локальных экстремумов $x(t)$; F_c - оператор схематизации, в результате выполнения которого случайный процесс $x(t)$ приводится к эквивалентному по вносимому усталостному повреждению схематизированному процессу, для которого определено понятие цикла нагружения; F_w - оператор приведения в общем случае несимметричных циклов нагружения схематизированного процесса к эквивалентным по вносимому усталостному повреждению симметричным циклам, для которых известна зависимость величины усталостных повреждений от амплитуды цикла; F_d и F_s - соответственно оператор вычисления и оператор суммирования усталостных повреждений, вносимых симметричными циклами нагружения; F_a - оператор формирования гистограммы распределения минимального x_{min} и максимального x_{max} амплитудных значений циклов схематизированного процесса.

Известно не менее 10 различных видов операторов F_c , F_w и F_d , выбор которых для измерения НУП определяется объектом исследования. Реализация оператора F_c заключается в выполнении логических операций над упорядоченным множеством локальных экстремумов $x(t)$, а реализация операторов F_w и F_d - в вычислении значений в общем случае нелинейных (степенных) функций /2, 3/.

Анализ возможных структур рассматриваемой ИВС показывает, что к функциям ее вычислительной подсистемы целесообразно относить реализацию операторов F_c , F_w , F_d , F_s и F_a , причем наибольшей пропускной способностью при инвариантности к виду операторов F_c , F_w и F_d обладает вычислительная подсистема с аппаратно-программным преобразованием измерительной информации. Суть преобразования заключается в следующем.

При измерении НУП в реальном масштабе времени оператор F_c выполняет программно, а операторы F_w и F_d - аппаратно-программно, путем обращения к запоминающему устройству, ячейки памяти которого хранят коды усталостных повреждений $D_0 = F_d F_w[x_{max}, x_{min}]$,

соответствующих выделяемым циклам схематизированного процесса. При измерении НУП со сдвигом во времени операторы F_a, F_{2a}, F_d выполняются программно, а оператор F_a - аппаратно-программно, с использованием запоминающего устройства, ячейки памяти которого хранят содержимое столбцов гистограммы распределения параметров x_{max}, x_{min} циклов схематизированного процесса.

Практическая реализация такой вычислительной подсистемы требует оценки погрешности измерения НУП, обусловленной квантованием входного сигнала вычислительной подсистемы; погрешностей квантования параметров x_{max}, x_{min} и величин D_0 , возникающих из-за конечного количества и конечной разреженности ячеек памяти запоминающего устройства.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования, в качестве математической модели $x(t)$ в большинстве случаев может быть принят непрерывный стационарный эргодический нормальный случайный процесс /4, 5/. Исходя из этого, для оценки указанных погрешностей может быть использована следующая методика.

Нетрудно видеть, что погрешности квантования γ_1 и γ' , соответственно имеющие место при измерении НУП со сдвигом во времени и в реальном масштабе времени, в случае непрерывного по уровню входного сигнала вычислительной подсистемы предствавимы в виде

$$\gamma_1 = (D^* - D) / D = \left(\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} D_{0ij} \int_{\varphi_{1i}}^{\varphi_{1i+1}} \int_{\varphi_{2j}}^{\varphi_{2j+1}} w_c(y_1, y_2) dy_1 dy_2 - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} D_0(y_1, y_2) w_c(y_1, y_2) dy_1 dy_2 \right) / \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} D_0(y_1, y_2) w_c(y_1, y_2) dy_1 dy_2, \quad (1)$$

$$\gamma_2 = (D^{**} - D) / D = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_1 \gamma_2,$$

где

$$\gamma_2 = (D^{**} - D^*) / D^* = \left(\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} (D_{0ij}^* - D_{0ij}) \int_{\varphi_{1i}}^{\varphi_{1i+1}} \int_{\varphi_{2j}}^{\varphi_{2j+1}} w_c(y_1, y_2) x dy_1 dy_2 \right) / \left(\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} D_{0ij} \int_{\varphi_{1i}}^{\varphi_{1i+1}} \int_{\varphi_{2j}}^{\varphi_{2j+1}} w_c(y_1, y_2) dy_1 dy_2 \right). \quad (2)$$

Здесь D - истинное значение НУП; D^* и D^{**} - результаты измерения НУП со сдвигом во времени и в реальном масштабе времени; $\varphi_{1i}, \varphi_{2j}, w_c(y_1, y_2)$ - K_1 уровней квантования и плотность вероятности величин x_{max}, x_{min} соответственно; D_{0ij} - усталостное повреждение от цикла с параметрами $x_{max} \in [\varphi_{1i}, \varphi_{1i+1}), x_{min} \in [\varphi_{2j}, \varphi_{2j+1}),$

D_{0ij}^r - квантованное по K_2 уровням значение D_{0ij} ;

$$D_{0ij}^r = \max\{D_{0ij}\} \cdot \text{ent}(D_{0ij}^r / \max\{D_{0ij}\}) / (\log_2 K_2 - 1),$$

где $\log_2 K_2$ - разрядность ячейки памяти запоминающего устройства вычислительной подсистемы при измерении НУП в реальном масштабе во времени.

Влияние погрешности квантования входного сигнала вычислительной подсистемы γ_3 на результат измерения НУП может быть оценено следующим образом:

$$\gamma_3 = \frac{D^{***}}{D^*} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_1} D_{0ij} \int_{\varphi_{1i}}^{\varphi_{2i+1}} \int_{\varphi_{2j}}^{\varphi_{2j+1}} w_1(\varphi_1, \varphi_2) d\varphi_1 d\varphi_2 \right)}{\left(\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_1} D_{0ij} \int_{\varphi_{1i}}^{\varphi_{1i+1}} \int_{\varphi_{2j}}^{\varphi_{2j+1}} w_2(\varphi_1, \varphi_2) d\varphi_1 d\varphi_2 \right)}, \quad (3)$$

где D^{***} - доля НУП, вносимая циклами нагружения, которые остаются невыделенными при схематизации квантованного по K_2 уровням в результате аналого-цифрового преобразования процесса $x(t)$, $w_1(\varphi_1, \varphi_2)$ - плотность вероятности величин x_{max} , x_{min} для невыделенных циклов.

Очевидно, что величины погрешностей $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ зависят как от вида операторов F_0, F_w, F_d и способов квантования величин x_{max}, x_{min} и D_0 , так и от корреляционно-спектральных характеристик и соотношения случайной и детерминированной составляющих принятой модели процесса нагружения.

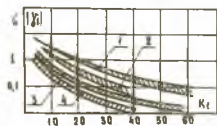
Одной из основных характеристик процессов нагружения при исследовании усталости является показатель широкополосности ν [4]. Так как для реальных процессов $\nu \in (0, 1)$, при оценке погрешностей $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ целесообразно рассматривать модели $x(t)$ с корреляционными функциями:

$$R_1(\tau) = e^{-\omega_0 |\tau|} (1 + \omega_0 |\tau|),$$

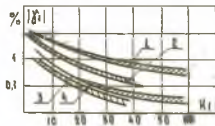
$$R_2(\tau) = e^{-\omega_0 |\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\omega_1}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right), \quad \omega_0 = 10 \omega_1,$$

которым соответствуют показатели широкополосности $\nu_1 \approx 0,1$ и $\nu_2 \approx 0,85$.

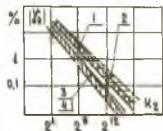
На рисунке приведены графики расчетных и экспериментальных за-



а)



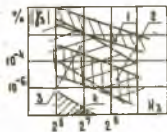
б)



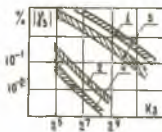
в)



г)



д)



е)

Р и с. Экспериментальные и расчетные зависимости

$|\sigma_1| = f(\kappa_1); |\sigma_2| = f(\kappa_2), \kappa_1 = 32;$

$|\sigma_3| = f(\kappa_3), \kappa_1 = 32$

зависимостей $|r_1|=f(k_1)$; $|r_2|=f(k_2)$, $k_1=const$; $|r_3|=f(k_3)$, $k_3=const$, имеющих место в случае схематизации по максимумам процессов нагружения с корреляционными функциями $R_1(\tau)$ (зависимости а, в, д) и $R_2(\tau)$ (зависимости б, г, е), когда осуществляется равномерное квантование величин x_{max} , x_{min} и D_0 , причем случайная составляющая входного сигнала вычислительной подсистемы ограничена на интервале $[-3\sigma; 3\sigma]$ (σ - среднеквадратическое отклонение процесса нагружения), среднее значение процесса нагружения принадлежит интервалу $[0, 3\sigma]$ а в качестве операторов F_w и F_d используется выражение вида [3/

$$F_w [x_{max}, x_{min}] = x_w = (x_{max} - x_{min})/2 + \psi(x_{max} + x_{min})/2,$$

$$F_d [x_w] = A(x_w)^m,$$

где ψ , m и A - постоянные коэффициенты, зависящие от материала и конструктивных особенностей деталей машин и механизмов:

$m = 2$ для зависимостей 1, 2 и $m = 10$ для зависимостей 3, 4 при $\psi \in [0,1; 0,3]$.

Экспериментальные оценки погрешностей r_1, r_2, r_3 получены в результате статистического имитационного цифрового математического моделирования преобразования измерительной информации в рассматриваемой вычислительной подсистеме.

Приведенные зависимости позволяют сделать вывод о том, что при указанных условиях преобразование измерительной информации с погрешностью, не превышающей по абсолютной величине 1%, с наименьшими аппаратными затратами обеспечивает в общем случае вычислительная подсистема, в которой количество уровней квантования величин x_{max} , x_{min} (т.е. для данного способа схематизации - количество ячеек памяти запоминающего устройства) равно 32; разрядность ячеек памяти запоминающего устройства, хранящего коды D_0 , равна 16, а квантование входного сигнала вычислительной подсистемы осуществляется 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем.

Очевидно, что при использовании соотношений (1), (2), (3) можно оценить зависимости $|r_1|=f(k_1)$, $|r_2|=f(k_2)$, $k_1=const$, $|r_3|=f(k_3)$, $k_3=const$ либо численными методами, либо с привлечением имитационного моделирования для любого возможного вида операторов F_c, F_w, F_d , при различных интервалах ограничения входного сигнала вычислительной подсистемы и при различных способах квантования величин x_{max}

x_{min} и D_0 .

Получаемые таким образом оценки погрешностей измерения НУП позволяют разработать совокупность аппаратных и программных модулей быстродействующей вычислительной подсистемы ИВС, реализующей "счетные" методы с требуемой на практике точностью, а также определить принципы рационального комплексирования вычислительных подсистем ИВС данного класса.

Библиографический список

1. Селихов А.Ф. Обеспечение ресурса конструкций (опыт самолетостроения) // *Машиноведение*. 1986. № 5. С. 11-18.
2. Методы схематизации процессов нагружения /С.С.Дмитриченко и др. // *Труды НАТИ*. М., 1978. Вып. 195. С. 46-64.
3. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность /Серенсен С.В., Кобаев В.П., Шнейдерович Р.М. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
4. О выборе модели случайного процесса для описания нагруженности элементов машин /Гусев А.С., Найшут А.Я., Рошин И.М. // *Статистические методы расчетов на прочность*. Свердловск, 1971. Вып.6. С. 3-7.
5. *Kikukawa Makoto, Jono Masaniko, Mizoguchi Takao. The effects of power spectrum of the fatigue life under random loading // Bull. JSME, 1971. 14. N72. P. 601-602.*

УДК 681.325:681.34

Э.И.Цветков, М.М.Лубочкин

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОРРЕКЦИИ
НЕИДЕАЛЬНОСТИ АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

(г. Ленинград)

Рост алгоритмических возможностей процессорных измерительных средств (ПриС) сопровождается не только введением новых методов повышения их метрологического уровня, но и использованием извест-