9. Абразивное изнашивание газопромыслового оборудования/В.И.Бирюков, В.М.Виноградов, М.М.Мартиросян, В.Н.Михайлов.-М.:Недра, 1977. - 207 с.
10. Перельман Р.Г., Денисов Ю.Д. Статистические модели эрозионного износа.- В сб.:Исследование прочности вибрации и конструкции ДЛА. М.:МАИ, 1974, вып. 289, с. 94-104.
11. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин.-М.:Машгиз, 1963.- 140 с.
12. Костецкий Б.И. и др. Поверхностная прочность материалов при трении.-Киев:Техника, 1976. - 192 с.
13. Полежаев Ю.В. Процесс установления эрозионного разрушения материала преграды при многократном соударении с частицами.-ИФЖ, 1979, XXXVII, № 3, с.389-394.
14. Бодрышев В.В. Удельная энергия разрушения как определяющий параметр эрозионной стойкости материала.-ИВУЗ. Машиностроение, 1978, № 2, с. 133-137.
15. Иванов В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов.-М.:Металлургия, 1975.-356 с.
16. Erosion Treaties of materials science and technology. Volume Edited by Carolyne Press, Academic Press, New Jork-San-Francisko-London, 1979.
17. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения.-М.:Наука, 1974.- 640 с.
18. Перельман Р.Г., Баулин В.И. Волны Релея как один из ведущих факторов в капельно-ударном разрушении деталей.-Проблемы прочности, 1974, № 4, с.70-74.
19. Перельман Р.Г., Фрейшист Н.М. Исследование напряжений при высокоскоростном каплеударном воздействии.-Проблемы прочности, 1979, № 5, с.50-55.
20. ГОСТ 23.219-84. Обеспечение износостойкости изделий. 1985.

УДК 621.01:539.4

В.К.Семенычев

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Для оценки степени усталостного повреждения, внесенного в конструкцию в течение заданного промежутка времени, необходимо знать действительные изменения во времени напряжений или их обобщенные интегральные характеристики, достаточные для расчета надежности конструкций /1,2/.

С приемлемой для практики точностью можно предположить линейную зависимость между напряжением $\sigma(t)$ в конструкции, прямая оценка которого обычно невозможна, и измеряемым достаточно просто технически вибрационным процессом $\xi(t)$:

$$\sigma(t)=\alpha_0\xi(t), \tag{I}$$

где коэффициент α_0 учитывает суммарно влияние характеристик материала и системы, например жесткостей и демпфирования, а также влияние геометрии применительно к данной конкретной точке измерения /I/.

Для описания энергетических структурных характеристик в общем случае случайного широкополосного нагружения широко используют дисперсию виброперемещения $\xi(t)$, его производных различных порядков и их отношения /I,2/. Учитывая известное соотношение между дисперсией m -й производной $\xi(t)$(m -й производной корреляционной функции $K^{(m)}(\tau)$ в нуле $\tau=0$) и спектральной плотностью $S(\omega)$ виброперемещения $\lambda_m=K^{(m)}(0)=\int_0^\infty\omega^m S(\omega)d\omega$, видим, что параметр λ_m и отношение $\lambda_{m,q}=\lambda_m/\lambda_q$ являются характеристиками структуры спектра нагружения. Так, например, $\lambda_{2,0}$ определяет среднее число пересечений нулевого уровня нагружения, $\lambda_{4,2}$ - среднее число экстремумов, $\lambda_{6,4}$ - среднее число точек перегиба. По ним и λ_0 определяется параметр сложности структуры нагружения, схематизируется нагружение, производится оценка величины повреждаемости, корректируются сроки службы и профилактического осмотра при переходе на эксплуатацию конструкций не по назначенному ресурсу, а по фактическому состоянию /I, 2,3/.

Например, известно выражение для математического ожидания уровня накопленного усталостного повреждения /I/:

$$M_{\Delta t_i}=\Delta t_i A(\theta)\{z\lambda_2\}^{\theta}\lambda_{2,4}^{\theta-1},$$

где $A(\theta)=\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\right)^{\theta}\Gamma\left(\frac{\theta}{2}+1\right)R_1^{\theta-1}$; $z=\frac{\alpha_0}{C}$; C и θ - постоянные, входящие в уравнение усталости $N(\sigma)=\left(\frac{C}{\sigma}\right)^{\theta}$; $R_1=\frac{K_\sigma(0)}{K_\sigma^{(4)}(0)}\lambda_{4,2}\simeq 1$ при принятии модели (I); $K_\sigma(\tau)$ - корреляционная функция напряжения $\sigma(t)$, представляющего на промежутке времени Δt_i стационарный процесс; $\Gamma(\theta)$ - гамма-функции.

Внедрение указанных методов расчета сдерживается тем, что обычно фиксируют массивы виброперемещений или их производных, затем рассчитывают корреляционные функции (или спектральные плотности), осуществляют аналитическое или численное дифференцирование (или интегрирование с весом ω^m для $S(\omega)$). Это ведет к практической

14-7018

невозможности работы устройства в реальном масштабе времени, большим требуемым объемам памяти для исходных массивов, сложным техническим и программным реализациям вычислений на достаточно больших ЭВМ, малой точности результатов, в частности, из-за необходимости выполнения операции дифференцирования и отсутствия мер точности измерения $\lambda_{m,q}$.

Альтернативным путем является аппроксимативный, согласно которому осуществляется разложение корреляционной функции сигнала $\xi(t)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $\tau = 0$ и использование, например, следующей меры близости:

$$\Delta = \int_0^{\infty}\left\{K(\tau) - K(0)\left[1 + \frac{\lambda_{2,0}}{2!}\tau^2 + \frac{\lambda_{4,0}}{4!}\tau^4 + \ldots\right]\right\}^2 \eta(\tau)\,d\tau, \qquad (2)$$

где $\eta(\tau) = \frac{1}{\tau^2}e^{-\beta\tau}$ – весовая функция, выбранная так, чтобы обеспечить максимальную чувствительность приближения при $\tau = 0$ и простоту технической реализации; $\beta - const$.

Заметим, что в формуле (2) отсутствуют члены с нечетным порядком дифференцирования $K(\tau)$, которые равны нулю. Минимизируя Δ на наиболее употребимых в приложениях параметрах формулы (2) $\lambda_{2,0}$, $\lambda_{4,0}$, раскрывая выражение для корреляционной функции $K(\tau) = M[\overset{\circ}{\xi}(t)\overset{\circ}{\xi}(t-\tau)]$ и выполняя ряд преобразований, приходим к соотношениям

$$\lambda_{2,0} = \frac{\beta^2 M\left[\overset{\circ}{\xi}(t)\left\{\int_0^{\infty}\overset{\circ}{\xi}(t-\tau)e^{-\beta\tau}(30\beta - \tau^2\beta^3)\,d\tau - 28\overset{\circ}{\xi}(t)\right\}\right]}{18M\left[\overset{\circ}{\xi}{}^2(t)\right]}, \qquad (3)$$

$$\lambda_{4,0} = \frac{\beta^4 M\left[\overset{\circ}{\xi}(t)\left\{\int_0^{\infty}\overset{\circ}{\xi}(t-\tau)e^{-\beta\tau}(12\beta - \tau^2\beta^3)\,d\tau - 10\overset{\circ}{\xi}(t)\right\}\right]}{18M\left[\overset{\circ}{\xi}{}^2(t)\right]}, \qquad (4)$$

где M – оператор математического ожидания; $\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - M[\xi(t)]$. В формулах (3) и (4) выражения $\int_0^{\infty}\overset{\circ}{\xi}(t-\tau)\beta e^{-\beta\tau}d\tau$, $\int_0^{\infty}\overset{\circ}{\xi}(t-\tau)\beta^3\tau^2 d\tau$ можно интерпретировать как сигналы на выходах первого и третьего последовательно включенных простейших фильтров нижних частот с постоянной времени $T = 1/\beta$ при входном сигнале $\overset{\circ}{\xi}(t)$. Таким образом, оценка $\lambda_{2,0}$ и $\lambda_{4,0}$ может быть реализована в реальном масштабе времени, оперативно по однотипной структуре: используются три одинаковых фильтра нижних частот, выходные сигналы первого и третьего вместе с $\overset{\circ}{\xi}(t)$ подаются на весовой сумматор, затем перемножаются с $\overset{\circ}{\xi}(t)$, находится математическое ожидание произведения, и оно делится с весом на оценку дисперсии входного сигнала.

Осуществив измерение $\lambda_{2,0}$ и $\lambda_{4,0}$, можно, при необходимости, найти $\lambda_{4,2}$, выполнив деление числителей в формулах (4) и (3) соответственно. Если же измеряемым первичным параметром является виброскорость, то, как легко показать, будем определять по выражению (3) $\lambda_{4,2}$, а по состношению (4) – $\lambda_{6,2}$; делением вычисляется $\lambda_{6,4}$. Измерение виброускорения дает соответственно $\lambda_{6,4}$ и, в случае необходимости, $\lambda_{8,4}$ и $\lambda_{8,6}$.

Итак, комбинируя тип используемого первичного преобразователя и применяемые формулы, можно определить весь спектр практически важных для контроля динамического нагружения и расчета конструкций параметров λ_2, $\lambda_{2,0}$, λ_4, $\lambda_{4,2}$, λ_6, $\lambda_{6,4}$ и др.

Предложенный алгоритм является наилучшим в смысле среднеквадратического (энергетического) приближения, т.е. обладает ясным физическим обоснованием, регуляризующим свойством при дифференцировании. Мера приближения определяется соотношением частотных свойств анализируемого сигнала и постоянной времени T применяемых фильтров нижних частот.

Если, например, анализируется нагружение с корреляционной функцией вида $K(\tau)=De^{-\alpha|\tau|}(1+\alpha|\tau|)$, то систематическая погрешность $\gamma_{cм}$ измерения $\lambda_{2,0}$ будет определяться соотношением

$$\gamma_{cм}=\frac{M[\lambda_{2,0}]+\alpha^2}{-\alpha^2}=\frac{1}{(1+v)^4}+\frac{29v}{6(1+v)^4}+\frac{14v^2}{9(1+v)^4}-1, \qquad (5)$$

где $(-\alpha^2)$ – идеальное значение $\lambda_{2,0}$ для нагружения $\sigma(t)$ с корреляционной функцией данного вида и дисперсией D; $v=\frac{\alpha}{\beta}$ – параметр, характеризующий соотношение частотных свойств нагружения и применяемых фильтров нижних частот.

Ширина спектра нагружения $\Delta\omega$ связана с α соотношением $\Delta\omega\simeq\frac{\pi\alpha}{4}$. Выбрав соответствующим образом β (или T), можно обеспечить при любом α величину $v\to 0$ и тем самым сколь угодно малую систематическую погрешность измерения. Так, при v = 0,1 имеем из формулы (5) $\gamma_{cм}\simeq 11\%$, а при v = 0,01 получим уже $\gamma_{cм}\simeq 1\%$, при v = 0,005 $\Rightarrow \gamma_{cм}<0,5\%$.

Наиболее часто используемые на практике аналитические выражения для корреляционных функций нагружения не имеют производных в обычном смысле, а введенные односторонние производные нечетных порядков при τ = 0 иногда не равны нулю. Указанная "недифференцируемость" связана не с физической природой таких процессов, а с математическими особенностями их описания /4/. Предложенный способ позволяет всегда находить соответствующие производные и их отношения, а выражение (5) может служить оценкой сверху погрешности измерения для процессов с формально недифференцируемыми корреляционными функциями моделей $K(\tau)=e^{-\alpha|\tau|}$, $K(\tau)=e^{-\alpha|\tau|}\cos\omega_0\tau$ и др.

Итак, предложенный способ измерения динамических параметров λ_m и $\lambda_{m,q}$ реализуется просто и аппаратурно и алгоритмически в реальном масштабе времени с высокой точностью. Если необходимостью является создание возможно простого специализированного устройства, то следует выполнять его по компенсационной структуре. Тогда, например, $\lambda_{2,0}$ в выражении (3) будет определяться как корень уравнения

$$M\left[\overset{\circ}{\xi}(t)\left\{\int_0^\infty \overset{\circ}{\xi}(t-\tau)e^{-\beta\tau}(30\beta-\tau^2\beta^3)d\tau-\overset{\circ}{\xi}(t)\left(28-\lambda_{2,0}\frac{18}{\beta^2}\right)\right\}\right]=0.$$

Здесь, в отличие от соотношения (3), необходимы весовой сумматор, блок усреднения и лишь один блок умножения, работающий в режиме индикации равенства нулю взаимокорреляционного момента поступающих на него сигналов, и, следовательно, требования к блоку умножения могут быть снижены как при аналоговой, так и при цифровой реализации. В качестве оценки параметра $\lambda_{2,0}$ принимают значение линейного преобразователя (ключа) с изменяющимся при помощи сигнала обратной связи коэффициентом преобразования, аналогично устройству, описанному в статье /5/. Здесь объектом измерения будет сразу отношение $\lambda_{2,0}$, числитель и знаменатель отдельно не измеряются.

Указанные свойства предложенного помехозащищенного оперативного способа измерения $\lambda_{m,q}$ позволяют рассчитывать на его широкое применение при ресурсных испытаниях и, главное, в эксплуатационных условиях для контроля динамического нагружения разнообразных механических конструкций, а также дают возможность перейти к эксплуатации их по техническому состоянию, а не по назначенному ресурсу.

Библиографический список

I. Кеистрис Ж.Д., Санкар Т.С., Остигай Ж.Л. Оценка надежности машин по степени усталостного повреждения, накопленного вследствие случайных вибраций.-Тр. Американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения, 1978, № 4, с.I4-2I.

2. Гусев А.С., Светлицкий В.А. Расчет конструкций при случайных возмущениях. - М.: Машиностроение, 1984. - 240 с.
3. Макеев В.П., Гриненко Н.И., Павлюк Ю.С. Статистические задачи динамики упругих конструкций. - М.:Наука, 1984. - 232 с.
4. Гусев А.С., Илинич Н.М. Использование корреляционных функций в расчетах на выносливость при случайном нагружении. - Машиноведение, 1983, № 3, с. 69-74.
5. Волков И.И., Семенычев В.К., Мотов В.В. Устройство для определения отношения энергетических характеристик двух вибрационных сигналов. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев: КуАИ, 1977, с. 131-134.

УДК 621.452.3:534

М.К.Сидоренко

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРИ ДОВОДКЕ И СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ГТД

Диагностика обычно рассматривается как метод оценки текущего состояния объектов в эксплуатации. В последнее время диагностика используется в качестве эффективного инструмента доводки и производства объектов,т.е.как средство повышения вибрационными методами качества, темпа и экономичности их создания.

Цели и задачи вибродиагностики качества определяются из системного анализа. Систему диагностирования можно рассматривать как специфическую систему управления процессами создания и эксплуатации объектов, в которой диагноз используется для выработки управляющего воздействия объект или на технологический процесс его создания. Согласно принципу единства критериев, эффективность системы должна учитываться по ее вкладу в конечный результат применения объекта. Поэтому в диагностике качества должны использоваться при создании ГТД все возможные пути повышения основных характеристик двигателей - надежности, долговечности и экономической эффективности эксплуатации (рис.1).

Конкретные задачи вибродиагностики качества вытекают из проблем создания двигателей (большая доля динамических дефектов, длительность и дороговизна доводки и т.п.) и из принципа диагностического управления процессом их создания.

1. Отработка динамики ГТД. Динамическая прочность конструкций и газодинамическая устойчивость протекания рабочих процессов в двигателях являются важнейшими условиями обеспечения