

Обмен опытом

МЕТОД КОМПАКТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Статья поступила 30 октября 2015 г.

Развитие экспериментальной базы для исследования прочностных характеристик образцов материалов, элементов механических конструкций, а также конструкций в целом позволило реализовать программы испытаний, носящие квазислучайный характер изменения нагрузок, прикладываемых к испытываемому объекту. При такого рода испытаниях, приближенных к реальным условиям, достигается более точное определение фактического уровня усталостной прочности исследуемого образца.

Поскольку основной объем экспериментальных данных по сопротивлению усталости получают из испытаний при регулярном нагружении, необходимы методы схематизации процесса квазислучайного нагружения, позволяющие представить задаваемые нагрузки в виде набора циклов с постоянными параметрами. Существуют разные методы схематизации (ГОСТ 25.101–83) [1], различающиеся по количеству параметров, которыми характеризуется регулярный цикл. В большинстве отраслей промышленности наибольшее распространение получили метод полных циклов и метод «дождя».

Каждый метод схематизации предполагает построение соответствующей корреляционной таблицы. Данные о параметрах нагружения, измеренные по однопараметрическим методам, записывают в одномерные таблицы (столбцы), а по двухпараметрическим методам — в двумерные таблицы, содержащие столбцы и строки. В общем случае для регистрации параметров различных условий нагружения в зависимости от числа условий могут составляться n -мерные таблицы.

Например, при испытаниях образцов из композитных материалов, особенно стеклопластиков, требуется учитывать скорость нагружения, однозначно связанную с длительностью полупериода и его размахом, т.е. появляется дополнительный параметр, который необходимо регистрировать для более точного определения нагруженности конструкции.

Для пояснения преимуществ предлагаемого способа регистрации параметров условий нагружения, т.е. построения корреляционной таблицы, выберем способ регистрации, основанный на методе «дождя». При схематизации по методу «дождя» измеряют параметры условий нагружения и заполняют заранее составленную двухпараметрическую корреляционную таблицу, состоящую из пустых ячеек, центры которых определяются величинами максимума и размаха полу-

циклов, а границы задаются допусками на идентичность.

По мере определения параметров условий нагружения их сравнивают с параметрами ячеек таблицы и записывают в ту ячейку, с которой произошло совпадение. Число параметров условий нагружения, попавших в конкретную ячейку, фиксируют.

Этот способ табличной регистрации параметров условий нагружения обладает рядом недостатков. Во избежание потери информации таблица создается заранее и получается избыточной из-за высокой степени дискретизации параметров, что требует для ее создания большого запаса памяти, а также серьезных ограничений как по количеству регистрируемых параметров, так и по степени дискретности таблицы. Кроме того, не происходит фактического осреднения параметров условий нагружения, попавших в одну ячейку, так как в качестве среднего назначаются параметры центральной точки ячейки. Это приводит к погрешности в определении средней величины параметров, попавших в одну ячейку, а следовательно, к уменьшению точности вычислений нагруженности конструкции и расхода запаса ее прочности.

Для примера рассмотрим формирование корреляционной таблицы для определения расхода ресурса по методу «дождя» при нагружении по квазислучайной программе TWIST крыла транспортного самолета, которую широко используют во всем мире для проведения испытаний с целью исследования закономерностей усталостного разрушения элементов конструкций в условиях нагружения, типичных для эксплуатации пассажирских и транспортных самолетов.

Зададим пределы измерения параметров нагружения: максимальных напряжений — от 12,22 до 26,0 кг/мм², размаха (размах равен удвоенной амплитуде) — от 4,44 до 31,0 кг/мм².

Для априорного формирования обычной двухпараметрической таблицы (ГОСТ 25.101–83) в указанных пределах изменения параметров с дискретностью 0,01 кг/мм² потребуется $[(26,0 - 12,22)/0,01 + 1][(31,0 - 4,44) \cdot 0,01 + 1] = 3\,662\,624$ ячейки, из которых в силу повторяемости параметров нагруженности будет заполнена только 61 ячейка, причем в каждую из них будет занесена цифра, определяющая число идентичных параметров квазислучайной программы нагружения TWIST.

По предлагаемому методу корреляционную таблицу формируют в режиме реального времени (ячейку за ячейкой), а число ячеек не превосходит числа параметров условий нагружения разной идентичности. В каждую ячейку записывают несколько величин, а именно: первые параметры условий нагружения, изначально определяющие координаты центра этой ячейки; суммы разностей между величинами первых параметров, образовавших ячейку, и идентичных параметров, в режиме реального времени входящих в ячейку; число этих идентичных параметров. В рассматриваемом случае в ячейку войдут величины первых максимумов и размахов, суммы разностей между величинами первых максимумов и размахов и идентичными им параметрами, а также число идентичных максимумов и размахов, т.е. пять величин.

При реализации предлагаемого метода последовательно выполняют следующие операции: непрерывно измеряют параметры условий нагружения в процессе испытаний; проводят выборку характерного периода испытаний исследуемой конструкции; разбивают диапазон изменения нагрузок в указанный период на классы. Соседние экстремумы нагрузок, образующие размах меньше ширины класса, в расчет не принимают. Далее выполняют дискретизацию процесса нагружения по методу случайных ординат. Корреляционную таблицу составляют в режиме реального времени последовательно ячейку за ячейкой. Для этого задают допуски на идентичность параметров условий нагружения, т.е. границы ячеек. Первые измеренные параметры условий нагружения с учетом заданных границ записывают в качестве первой ячейки таблицы. Следующие измеренные параметры условий нагружения сравнивают со значениями первых и определяют их разности. Если эти разности не выходят за допуски на идентичность, их суммируют, сумму запоминают, а число идентичных величин параметров условий нагружения, вошедших в ячейку, регистрируют. Если разности выходят за допуски на идентичность, образуют новую ячейку таблицы, границы ячеек могут набегать одна на другую. Измеряют следующие параметры условий нагружения, сравнивают их с параметрами предыдущих и записывают в ту ячейку, с параметрами которой произошло первое совпадение с учетом установленных допусков на идентичность. Если таковой ячейки не находят, то образуют новую ячейку. Описанную процедуру повторяют до окончания измерений и записи всех величин параметров условий нагружения. Для каждой ячейки, как и для первой, разности между первыми величинами параметров условий нагружения, образовавших эту ячейку, и параметрами последующих, входящих в нее, суммируют, а число идентичных параметров условий нагружения, вошедших в конкретную ячейку, запоминают. Далее вычисляют среднее значение j параметра условий на-

гружения, вошедшего в конкретную ячейку корреляционной таблицы:

$$X_{jcp} = X_{j1} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{j1} - X_{ji},$$

где i и n — текущий номер и число идентичных параметров условий нагружения, вошедших в конкретную ячейку корреляционной таблицы.

По предлагаемому способу для данного примера надо заполнить память размером $61 \cdot 5 = 305$ слов. Объем необходимой памяти при этом в 12 000 раз меньше, чем при использовании традиционного способа; последний требует, как было вычислено выше, 3 662 624 ячейки.

Предлагаемый метод регистрации параметров условий нагружения сокращает время и вычислительные ресурсы, необходимые для определения нагруженности механических конструкций при ресурсных испытаниях, а также повышает точность регистрации фактической нагруженности конструкции, что позволяет строго учитывать степень исчерпания ресурса в зависимости от условий нагружения. Следует отметить, что число циклов до разрушения конструкции находится в степенной зависимости от эквивалентных механических напряжений в конструкции, возникающих в процессе нагружения. Поскольку типичные значения показателя степени в этой зависимости для металлических конструкций лежат в диапазоне 4 – 8, а для конструкций из полимерных композиционных материалов — в диапазоне 20 – 40, то очевидно, что параметры напряжений в экстремальных точках нагружения необходимо получать с высокой точностью.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет за счет последовательного формирования ячеек в режиме реального времени создать оптимальную таблицу, имеющую число ячеек, равное числу идентичных параметров условий нагружения, выявленных в результате схематизации переменной нагрузки, действующей на конструкцию за характерный промежуток времени. Такой подход экономит вычислительные ресурсы, а за счет фактического осреднения параметров условия нагружения, входящих в одну ячейку, повышает точность определения фактической нагруженности конструкции. Одной из наиболее перспективных областей применения предлагаемого метода, кроме стендовых испытаний, является регистрация нагруженности конструкций в процессе эксплуатации, особенно для получающих все большее распространение в настоящее время систем мониторинга «здоровья» конструкции (health monitoring systems).

© Ю. А. Свирский, А. Я. Стерлин
Центральный аэрогидродинамический институт
имени профессора Н. Е. Жуковского,
г. Жуковский Московской обл., Россия;
e-mail: Andrey.sterlin@tsagi.ru