УДК [622.73:62-192.002.5].001.57

В.В.Смирнов

МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Этапы формирования надежности и проблемы ее повышения

Надежность технологического оборудования, в частности его привода, с хронологической точки зрения закладывается на этапе проектирования, реализуется качественными изготовлением и монтажем, сохраняется и поддерживается в эксплуатационный период.

Основные проблемы на первом этапе сводятся к необходимости учета динамического характера нагрузок. При этом активным и решающим фактором является принятие мер по снижению виброактивности путем гашения вынужденных колебаний и подавления источников их возбуждения. Надежность на этапе изготовления обеспечивают высокий уровень машиностроения, а также применение систем технологического и приемочного контроля. Проблемы качества монтажа связаны с его недостаточным техническим и методологическим обеспечением. Узким местом на этапе эксплуатации является слабо развитая система организации планово-предупредительных ремонтов и технической диагностики.

Общие проблемы этапов формирования надежности оборудования сводятся к разработке научных основ, а также способов и систем автоматического контроля и технической диагностики, использующих объективные и высокоинформативные параметры. Опыт теоретических и экспериментальных исследований показывает [1], что таким параметром является вибросигнал: с одной стороны, обусловленный определяющим надежность фактором - динамическими процессами, а с другой стороны, объективно отражающий техническое состояние технологического оборудования.

Обоснование применения и выбор метода исследования

Математическое описание динамических процессов, происходящих в приводе технологического оборудования, обычно приводит к неоднородным дифференциальным уравнениям второго порядка с периодическими коэффициентами. В настоящее время отсутствуют формализованные методы решения подобных уравнений. Для исследования периодических решений разработаны приближенные методы: функционально-аналитические, численно-аналитические и численные. Наиболее удобным средством для получения полной картины динамического процесса: перемещения, скорости, ускорения и соответствующих им спектров частот является один из численных методов - метод коллокации. Он имеет аналог - операционное исчисление. Решение находится в виде линейной комбинации базисных функций, коэффициенты которой определяются из условия точного удовлетворения исследуемому дифференциальному уравнению в определенных точках - узлах коллокации.

Различают метод алгебраической коллокации, если базисными функциями являются алгебраические полиномы, и метод тригонометрической коллокации - при тригонометрическом виде полинома. Сравнив модификации метода коллокации, можно сказать, что построение именно периодических решений естественнее и целесообразнее выполнить методом тригонометрической коллокации (МТК).

Идея, понятия, рациональная схема и пример использования МТК

Согласно общей идее МТК приближение к решению ищут в виде

$$x_m(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{m}\left(a_j \cdot \cos jwt + b_j \cdot \sin jwt\right), \qquad (1)$$

где $w = 2\pi/T$; T - период решения; m - наивысшая степень полинома приближения [2].

Обозначим через x^{Γ} вектор коэффициентов, упорядочив их следующим образом,

$$x^{\Gamma} = \left(a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots, a_m, b_m\right), \qquad (2)$$

Эти коэффициенты определяются из условия, чтобы невязка обращалась в нуль в узлах коллокации $t_0, t_1, t_2, \ldots, t_{N-1}$, выбираемых равноотстоящими на отрезке, равном периоду решения:

$$t_i = i\frac{t}{N};\ i = 0,\ 1,\ 2, \ldots, N-1;\ N = 2m+1. \qquad (3)$$

Дискретные значения тригонометрического полинома (1) в упорядоченном виде образуют вектор значений

$$x^{\Gamma} = \left(x_m(t_0), x_m(t_1), x_m(t_2), \ldots, x_m(t_{2m})\right). \qquad (4)$$

Коэффициенты полинома и его значения в узлах коллокации связаны взаимно однозначными соответствиями

$$x^{м} = Mx^{г}, \quad (5)$$

$$x^{г} = \Gamma x^{м}, \quad (6)$$

где М и Г - специальные матрицы взаимного перехода.

Вектор коэффициентов первой производной $dx_m(t)/dt$ имеет вид

$$x_{(1)}^{г} = w(0, b_1, -a_1, 2b_2, -2a_2, \ldots, mb_m, -ma_m). \quad (7)$$

Он связан с вектором значений первой производной $x_{(1)}^{м}$ уравнением

$$x_{(1)}^{м} = Mx_{(1)}^{г}, \quad (8)$$

а также с вектором значений - уравнением

$$x_{(1)}^{м} = D^{1}x^{м}, \quad (9)$$

где D^1 - матрица дифференцирования 1-го порядка.

Аналогично, для вектора значений производной s-ого порядка

$$x_{(s)}^{м} = D^{s}x^{м}, \quad (10)$$

где D^s - матрица дифференцирования s-ого порядка.

Анализ уравнений (2)...(10) показывает, что дифференциальное уравнение можно преобразовать к системе алгебраических уравнений по двум схемам : относительно вектора коэффициентов $x^{г}$ и относительно вектора значений $x^{м}$ тригонометрического полинома. Последняя из схем наиболее эффективна. Во-первых, для практических целей важен не столько аналитический вид приближения, сколько его численные значения, легко отображаемые в виде графиков динамических процессов. А в ходе имитационного моделирования на ЭВМ проявляется второе преимущество преобразования относительно вектора значений $x^{м}$. Оно заключается в существенной экономии памяти ЭВМ ($(N-1)^2$ ячеек памяти) и уменьшении времени решения задачи.

Дифференциальное уравнение, описывающее поперечные колебания зубчатого привода, имеет вид [3]

$$(m\ddot{\alpha} + k(w)\dot{\alpha} + c(t)\alpha = \sum F, \quad (11)$$

где $m = \dfrac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ - приведенная масса зубчатых колес; $k(w)$ - коэффициент демпфирования; $c(t)$ - жесткость зацепления; $\sum F$ - суммарная возмущающая сила.

Используя МТК, преобразуем дифференциальное уравнение (11) к системе алгебраических уравнений вида

$$\left(mD^2 + k(w)D^1 + diag\left[c(t_i)\right]\right)\alpha^{\text{м}} = \sum F^{\text{м}}, \qquad (12)$$

где $diag\left[c(t_i)\right]$ - диагональная матрица периодически изменяющейся жесткости зацепления, $\alpha^{\text{м}}$ и $\sum F^{\text{м}}$ - векторы значений соответственно перемещения и суммарной возмущающей силы.

Полученная система (12) представляет собой систему линейных уравнений, численная реализация решения которой хорошо стандартизована.

Алгоритм применения МТК и его программная реализация

Обобщенный алгоритм применения МТК для имитационного моделирования динамических процессов в приводе технологического оборудования включает следующие блоки:

- формирование специальных матриц МТК (Γ, M и D^s);
- преобразование дифференциального уравнения в систему алгебраических уравнений относительно вектора значений;
- решение системы алгебраических уравнений (получение вектора значений перемещения $\alpha^{\text{м}}$);
- расчет вектора скорости $\alpha^{\text{м}}_{(1)}$ по формуле (9);
- вычисление вектора ускорений $\alpha^{\text{м}}_{(2)}$ по формуле (10);
- переход по формуле (6) от векторов значений $\alpha^{\text{м}}$, $\alpha^{\text{м}}_{(1)}$, и $\alpha^{\text{м}}_{(2)}$ и к соответствующим векторам коэффициентов $\alpha^{\text{г}}$, $\alpha^{\text{г}}_{(1)}$ и $\alpha^{\text{г}}_{(2)}$ для анализа спектрального состава вибросигнала перемещения, скорости и ускорения.

Отдельные блоки алгоритма реализованы в виде процедур на алгоритмическом языке Паскаль в инструментальной среде системы программирования Turbo-Pascal 7.0 .

Стратегия проведения имитационного моделирования

Приоритет отдельных разделов имитационного моделирования определяется хронологической последовательностью этапов формирования надежности технологического оборудования. Каждому этапу соответствует свой набор источников вынужденных колебаний: естественные причины, погрешности изготовления и ошибки монтажа. Декомпозиция общей задачи исследования преследует цель получить качественную и количественную картину динамических процессов в отдельной области рассматриваемой подзадачи. Специальная стратегия имитационного моделирования предусматривает исследование как отдельных источников возбуждения колебаний, так и их совместного воздействия на динамический процесс.

Последовательность имитационного моделирования для наглядности может быть описана ориентированным графом, приведенным на рис.1. Практическая реализация предложенной стратегии моделирования и анализ его результатов позволяет выявить информационные параметры и их частотные диапазоны.

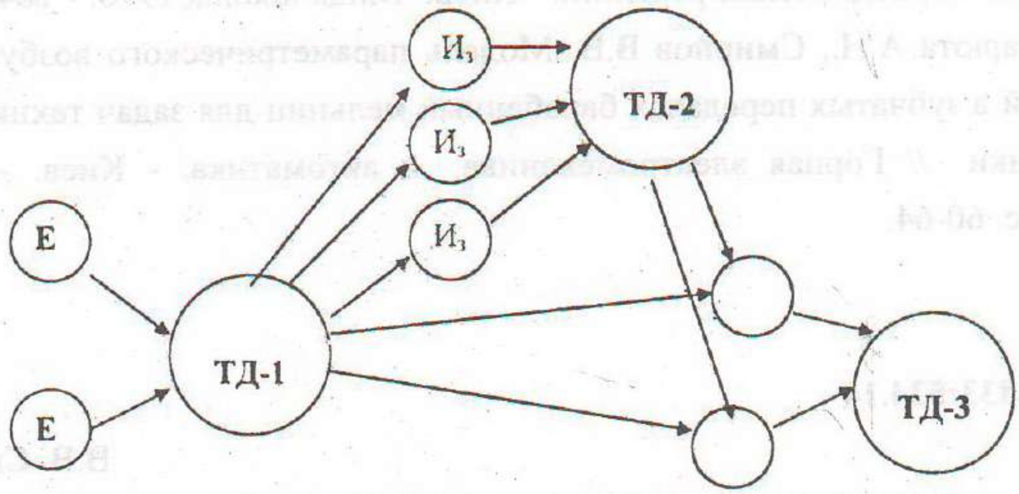

Рис.1. Ориентированный граф имитационного моделирования:

ТД-1, ТД-2 и ТД-3 - математические модели вибросигнала для задач технической диагностики соответственно на этапах изготовления, монтажа и эксплуатации; Е, $И_з$ и М - источники возбуждения колебаний.

Заключение

Таким образом, предлагаемая методика имитационного моделирования динамических процессов отличается тем, что обеспечивает системный подход и включает следующие взаимосвязанные этапы:

1) разработку математических моделей для задач технической диагностики технологического оборудования;

2) обоснование применения и выбор метода исследования;

3) разработку алгоритма, проектирование и реализацию программного обеспечения МТК;

4) определение стратегии проведения имитационного моделирования;

5) собственно моделирование и анализ результатов.

Ее практическое применение позволяет выработать комплекс мероприятий по решению проблемы повышения надежности технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий. - М.: Недра, 1966. - 171 с.

2. Самойленко А.М., Ронто Н.И. Численно-аналитические методы исследования периодических решений. - Киев: Вища школа, 1976. - 184 с.

3. Марюта А.Н., Смирнов В.В. Модель параметрического возбуждения колебаний в зубчатых передачах барабанных мельниц для задач технической диагностики // Горная электромеханика и автоматика. - Киев. - 1981.- вып.38. - с. 60-64.

УДК 621.833:534.14

В.В. Смирнов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ В ПРИВОДЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Зубчатая передача является составной и наименее надежной частью привода технологического оборудования на обогатительных фабриках ГОКов. С одной стороны, она представляет собой объект технической диагностики (ТД), а с другой – элемент канала передачи технологической информации, используемой в АСУ процессом измельчения.