УДК 621.822

Д.Ю.ЕРШОВ, *канд. техн. наук, доцент, fetcat@mail.ru, (812)328-89-36*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

D.Y.ERSHOV, *Phd in eng. sc., associate professor, fetcat@mail.ru, (812)328-89-36*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint-Petersburg

ОЦЕНКА ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Статья посвящена методам диагностирования технического состояния механической системы, позволяющим оценивать влияние технологических погрешностей изготовления и сборки элементов системы, влияние неуравновешенности вращающихся масс системы на неравномерность износа поверхностей деталей в ней на этапе проектирования системы. Рассмотрено математическое моделирование суммарного вибрационного воздействия на механическую систему. Предложен вариант наглядного представления суммарного вибрационного воздействия в виде фазового портрета вектора суммарного вибрационного воздействия от угла поворота элемента механической системы.

***Ключевые слова*:** вибрация, фазовый портрет, амплитудная модуляция.

EVALUATION OF THE VIBRATION PROCESSES OF MECHANICAL SYSTEMS AT THE STAGE OF THEIR DESIGN IN MECHANICAL ENGINEERING

This article is devoted to the methods of diagnostics of a technical condition of a mechanical system, allowing to evaluate the impact of technological errors of manufacturing and assembling elements of the system, the impact of unbalanced rotating mass of the system for uneven wear surfaces of parts in the system design stage. Considered mathematical modeling of the total vibration effect on mechanical system. A variant of visual presentation of the total vibration impacts in the form of a phase portrait of a vector of the total vibration effect of the angle of rotation of the element of mechanical system.

***Key words*:** vibration, phase portrait, amplitude modulation.

Современное диагностирование сложных многороторных механических систем в области машиностроения связано с решением двух основных задач: обеспечение надежности функционирования в заданных условиях эксплуатации и повышение их работоспособности. Для решения этих задач существует большое количество методов исследования вибрационных процессов, происходящих при функционировании механических систем и влияющих на работоспособность системы в целом. Практически все методы диагностирования связаны со своевременным обнаружением и установлением характера развития дефекта в элементах системы, прогнозированием момента возникновения постепенного функционального отказа всей контролируемой системы и определением условий возникновения внезапного отказа элемента системы.

Оценка текущего состояния элементов механической системы и системы в целом осуществляется с помощью различных технических средств диагностики, содержащих

в своей основе устройства микропроцессорной техники и определенного программного обеспечения, что позволяет обрабатывать огромное количество информационных сигналов за короткий промежуток времени и таким образом существенно повышать надежность функционирования технических средств диагностики и получаемых с их помощью результатов.

В настоящее время существует большое количество методов, способов и методик технической диагностики, которые позволяют решать задачи контроля текущего технического состояния различных видов машин и оборудования и устанавливать моменты зарождения и развития дефектов в их элементах.

В используемой на предприятиях машиностроительной отрасли практике технического контроля существенное значение приобретает диагностика качества функционирования механических систем, которая базируется на основе разработанных диагностических моделей и диагностических критериев, выбираемых для оценки технического состояния системы. Существенный недостаток всех существующих методов и способов диагностирования технического состояния контролируемой системы и ее элементов состоит в том, что осуществляется диагностирование уже появившихся дефектов, а не условий их возникновения.

Наиболее актуальным в настоящее время является ознакомление с существующими и создание новых методов и способов диагностирования технического состояния механических систем и их элементов, основанных на изучении колебательных (вибрационных) процессов, а также прогнозирование поведения механической системы в условиях эксплуатации еще на этапе проектирования.

Существует небольшое количество методов диагностирования технического состояния механической системы, с помощью которых можно оценить влияние технологических погрешностей изготовления и сборки элементов системы, влияние неуравновешенности вращающихся масс системы на неравномерность износа поверхностей деталей в ней. В таких методах первоначально выявляется физическая природа вибрационных факторов в элементах системы, существенным образом влияющая на виброактивность всей системы в целом перед запуском ее в эксплуатацию. Рассматривается возможность изменения параметров виброактивности системы за счет активного изменения характеристик динамических процессов в ней путем предварительного математического моделирования вибрационных факторов. Решается задача оптимизации по получению минимальных значений суммарного вибрационного воздействия за счет изменения амплитуд и фазовых сдвигов его составляющих при учете широкого диапазона соотношений амплитуд вибрационных факторов от отдельных источников вибрации. Делается предположение о том, что вибрационные процессы в элементах механической системы порождают колебание основания, на котором они установлены, а колебания основания являются условиями существенного ускорения процессов износа элементов системы при определенных условиях эксплуатации.

Параметры вибрационных процессов основания системы позволяют установить характер изменения величины суммарного вибрационного воздействия и его положение в плоскости и пространстве, а также выявить основные места концентрации вибрационных воздействий в виде динамических реакций на элементы системы, которые и создают условия формирования неравномерности износа на отдельных участках контактирующих поверхностей вращающихся элементов системы. Такой подход к анализу вибрационных процессов контролируемой механической системы в условиях производства перед запуском в эксплуатацию позволяет более целенаправленно осуществлять выбор модели контролируемого технического состояния системы. Также имеется возможность теоретического обоснования выбора допустимых уровней виброактивности отдельных источников вибрации, рационального выбора передаточных чисел зубчатых и ременных передач, комбинаций направлений вращения роторов и соотношений амплитуд и фазовых сдвигов вибрационных факторов.

Современные методы диагностирования вибрационных процессов в механических системах позволяют контролировать техническое состояние элементов системы как в процессе эксплуатации, так и перед запуском системы в эксплуатацию, в процессе ее производства и проектирования.

В качестве примера рассмотрим математическое моделирование физической природы условий возникновения вибрационных воздействий в многороторной механической системе.

В таких системах возможно различное расположение валов вращающихся элементов конструкции. Валы могут быть расположены вертикально или горизонтально, параллельно, перпендикулярно или скрещено относительно друг друга. Вращение роторов механических систем может быть однонаправленным и разнонаправленным. Однонаправленному вращению соответствуют передачи с гибкой связью и механические передачи с внутренним зацеплением зубчатых колес, а разнонаправленному – зубчатые передачи с внешним зацеплением колес.

Обычному механическому приводу, состоящему из двух элементов вращения, соответствует динамический процесс с двумя источниками вибрации.

Составляющие суммарного вибрационного воздействия по осям симметрии контролируемого изделия X и Y при равных амплитудах суммируемых гармоник можно представить в следующем виде (вес системы и ее элементов не учитывается, предполагается, что валы системы расположены вертикально):

$$F_x(\varphi) = F_r(\varphi)\sin\varphi,$$

$$F_y(\varphi) = F_r(\varphi)\cos\varphi, \qquad (1)$$

где $\varphi = 2\pi f$ – угол поворота контролируемого изделия механической системы; f – минимальная частота вращения элементов системы; $F_r(\varphi)$ – суммарное вибрационное воздействие, обусловленное неравномерностью вращающихся масс роторов системы (дисбалансом), технологическими погрешностями и локальными дефектами элементов системы, направлением вращения роторов системы, соотношением передаточных чисел элементов системы и т.д.

Суммарное вибрационное воздействие при математическом моделировании составляющих вибрационного воздействия вычисляется с помощью выражения

$$F_r(\varphi) = \sqrt{F_x^2(\varphi) + F_y^2(\varphi)}. \qquad (2)$$

Анализируя основные вибрационные воздействия механической системы, суммарное вибрационное воздействие можно определить с помощью выражения

$$F_r(\varphi) = \sum_{l=1}^{k} F_l + \sum_{i=2}^{n} F_i \sin(i\varphi + \Delta\varphi_i) + \sum_{j=q}^{m} F_{0j}\left[1 - \cos j(\varphi - \Delta\varphi_j)\right], \qquad (3)$$

где $\sum_{l=1}^{k} F_l$ – моделирует дисбаланс механической системы и ее неуравновешенность вращающихся масс роторов; $\sum_{i=2}^{n} F_i \sin(i\varphi + \Delta\varphi_i)$ – технологические погрешности изготовления и сборки элементов системы; $\sum_{j=q}^{m} F_{0j}\left[1 - \cos j(\varphi - \Delta\varphi_j)\right]$ – условия возникновения и развития локальных дефектов элементов системы.

Угол, характеризующий направление действия суммарного вибрационного воздействия $F_r(\varphi)$ системы, отсчитываемый от направления оси Y, определяется выражением

$$\varphi_в(\varphi) = \operatorname{arctg}\frac{F_x(\varphi)}{F_y(\varphi)}. \qquad (4)$$

Результаты математического моделирования условий возникновения различного рода вибрационных воздействий на механическую систему наглядно можно представить на фазовой плоскости в зависимости суммарного вибрационного воздействия от угла поворота элемента механической системы $F_r(\varphi_в)$, в виде фазового портрета.

В зависимости от направления вращения роторов в механических системах, неуравновешенности вращающихся масс элементов системы, технологических погрешностей изготовления и сборки деталей

конструкции, возникновения различных локальных дефектов в процессе эксплуатации системы существенно меняется характер динамического процесса.

С помощью предложенного метода диагностирования вибрационных воздействий возможно моделирование динамических процессов, происходящих в механических системах на этапе их проектирования и в процессе эксплуатации, а также прогнозирование возможного влияния на виброактивность многороторной механической системы различных вибрационных факторов. Существует возможность теоретического обоснования выбора допустимых уровней виброактивности отдельных источников вибрации, таких как технологические погрешности изготовления и сборки элементов системы, неуравновешенность вращающихся масс многороторной механической системы, рациональный выбор передаточных чисел зубчатых и ременных передач, комбинации направлений вращения роторов и соотношения амплитуд и фазовых сдвигов вибрационных воздействий, а также их математическое моделирование.