

УДК 629.7.05:534.647

ВИБРАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ

Ю.А. Бритова, В.Я. Андросов, В.С. Дмитриев*

ОАО «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск

*Томский политехнический университет

E-mail: polus@online.tomsk.net

Проводится анализ вибрации двигателей-маховиков в частотной и временной области. Представлена структура стенда для проведения испытаний посредством многоканальной системы анализа PULSE. Рассмотрены дефекты двигателей-маховиков и метод их идентификации.

Ключевые слова:

Двигатель-маховик, вибрационный анализ, многоканальная система анализа PULSE, шарикоподшипник, виброизмерительный преобразователь.

Key words:

Motor-flywheels, vibration analysis, multichannel analysis system PULSE, ball-bearing, vibration-survey converter.

Международный космический рынок переживает значительные изменения в объеме, структуре и уровне конкуренции вследствие развития малых космических аппаратов (МКА). Из-за относительной дешевизны, доступности технологий, небольших сроков реализации проектов, небольшого риска в случае неудачного запуска, низкой стоимости средств выведения их на орбиту как дополнительной нагрузки к большим аппаратам такие аппараты — наиболее развивающийся сектор этого рынка.

В связи с интенсивным применением миниспутников для решения различных научно-производственных задач космонавтики интерес к двигателям-маховикам (ДМ), регулирующим положение космического аппарата в околоземном пространстве, резко возрос. Благодаря своим функциональным возможностям, простоте конструкции и высокой надежности эти исполнительные устройства конкурентоспособны с другими типами исполнительных органов.

В Научно-производственном центре «Полус» разработаны ДМ различных конфигураций, для которых не сформулированы определенные нормы уровней шума и вибрации. С целью определения и подтверждения динамической модели конструкции ДМ на предприятии проводятся работы по определению виброхарактеристик на режимах разгона и выбега. На сегодняшний день с появлением современного оборудования вибрационной диагностики стало возможным получить общую вибрационную характеристику, составить нормы вибрационных уровней, согласно которым можно будет определять ресурс работы ДМ.

ДМ представляет собой быстровращающийся ротор, расположенный на подшипниках в раме и приводимый во вращение электроприводом. Здесь, испытывая взаимное влияние, одновременно протекают электрические, магнитные, тепловые и механические процессы.

При совершенствовании конструкции и технологии изготовления ДМ на первый план встала за-

дача стабилизации положения центра масс, что связано с оптимизацией жесткостных и тепловых характеристик. С этой целью разработаны симметричные, равножесткие конструкции, имеющие минимальное количество деталей, изготовленные из материалов с близкими коэффициентами линейного расширения, применены герметичные гидрокамеры, заполненные газовой средой с оптимальными тепловыми и газодинамическими характеристиками; значительно усовершенствованы узлы скоростных опор и методы динамической балансировки [1].

Особенно актуальна проблема отрицательных воздействий на ДМ, вызванных погрешностями изготовления и сборки шарикоподшипниковых опор, неуравновешенностью маховика, электромагнитными факторами, что нарушает стабилизацию кинетического момента, который определяет- ся соотношением

$$H = I_z \Omega,$$

где I_z — суммарный момент инерции вращающихся частей ДМ относительно оси вращения маховика, кг·м²; Ω — угловая скорость вращения маховика, с⁻¹.

Основное свойство ДМ — стабильность положения главной оси в пространстве. Для его выполнения необходимо, чтобы значение момента инерции было постоянным.

В свою очередь,

$$I_z = mal,$$

где m — масса вращающегося элемента, кг; a — ускорение элемента, м/с²; l — радиус вращения элемента вокруг оси вращения маховика, м.

В настоящее время на предприятии проводится поиск конструкторских решений с целью минимизации массы ДМ с одновременным увеличением частоты вращения. Для улучшения динамических характеристик, как на этапе отработки конструкции, так и при испытаниях изделий «Агат-15», «Агат-9», ДМ-1-10 проводится определение их ви-

брационных характеристик по специальной методике и на специализированном стенде, имитирующем факторы открытого космического пространства [2, 3].

Источники вибрации ДМ – электропривод, ротор, обладающий остаточной неуравновешенностью, и подшипники главной оси.

Диагностика роторных машин, в том числе силовых гироскопов, по вибрационному состоянию включает в себя несколько направлений, развивающихся различными темпами.

Большинство современных методов вибрационной диагностики базируется на анализе вибрации работающих машин и оборудования. Эти методы составляют основу функциональной (рабочей) диагностики. Режимы работы оборудования могут быть самыми разными – от установившихся (номинальных или специальных) до переходных, в том числе пусковых, импульсных и т. д.

В функциональной диагностике машин и оборудования по вибрации используется информация, содержащаяся в характеристиках колебательных сил и свойствах колебательных систем.

Самые сложные задачи исследования вибрационного состояния решаются с помощью модульной многоканальной системы анализа PULSE, выпускаемой фирмой Briel&Kjaer. В ней удачно сочетаются одновременно мощь современного анализатора, использующего специализированное про-

граммное обеспечение, и широкие вычислительные возможности персональной ЭВМ. Система предназначена для сбора данных с метками времени, измерений общего уровня шума и вибрации, базового и расширенного акустического анализа, анализа динамических характеристик конструкций, диагностики механических устройств, электроакустических испытаний.

В качестве входных устройств компания Briel&Kjaer предлагает широкий спектр виброизмерительных преобразователей (акселерометров), датчиков силы, микрофонов и т. д.

Блок-схема стенда для проведения испытаний по определению вибрационных характеристик ДМ состоит из вакуумной камеры, пульта разгона ДМ, трехкомпонентного виброизмерительного преобразователя (ВИП), амперметра, частотомера, многоканальной системы для анализа PULSE, электронно-вычислительной машины (ЭВМ), рис. 1.

Для создания пониженного до 0,026 Па давления при испытаниях ДМ в режимах разгона и выбега применяется вакуумная камера. Состояние свободного подвеса ДМ обеспечивается подвешиванием его в вакуумной камере на упругий резиновый подвес с собственной частотой колебаний не более 3 Гц.

В качестве входных средств измерения используются ВИП (рис. 2, а), лазерный фотоэлектрический тахометр ММ 0024 (рис. 2, б), конденсаторный микрофон типа 4190 (рис. 2, в).

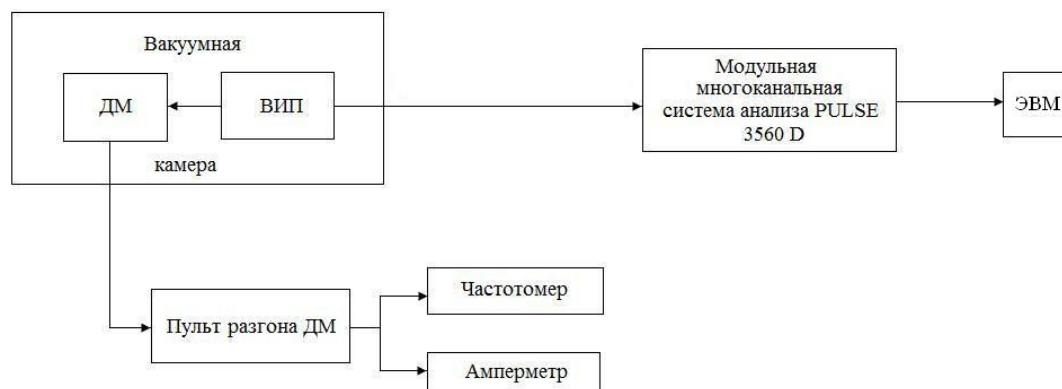


Рис. 1. Блок-схема стенда для проведения испытаний по определению вибрационных характеристик ДМ



Рис. 2. Входные средства измерения: а) ВИП; б) лазерный фотоэлектрический тахометр ММ 0024; в) конденсаторный микрофон типа 4190

Технические характеристики ВИП: чувствительность 10 мВ/г; частотный диапазон по трём ортогональным осям X , Y , Z от 1 до 12000 Гц, погрешность измерения не более 3 %.

Лазерный фотоэлектрический тахометр ММ 0024 предназначен для бесконтактного запуска измерений, а также для определения скорости и смещения без нагружения испытываемой конструкции. Его частотный диапазон составляет от 3,3 до 333,3 Гц; диапазон частоты вращения 200...200 000 об/мин; рабочее расстояние — от 50 до 800 мм.

Для определения акустической характеристики ДМ служит конденсаторный микрофон типа 4190 с частотным диапазоном от 3,15 до $2 \cdot 10^4$ Гц, чувствительностью 50 мВ/Па, неравномерностью амплитудно-частотной характеристики ± 1 дБ.

ВИП устанавливается в районе шарикоподшипникового узла ДМ на специальную мастику. Посредством герметично выведенных через заднюю стенку вакуумной камеры кабелей его выходные каналы подключаются к входным каналам системы PULSE типа 3560-D (рис. 3), которая осуществляет измерение и обработку данных и имеет следующие технические характеристики: частотный диапазон от 0 до $25,6 \cdot 10^4$ Гц; динамический — 130 дБ; погрешность измерений $\pm 0,1$ дБ; 25 входных и 5 выходных каналов.



Рис. 3. Модульная многоканальная система анализа PULSE типа 3560-D

Она представляет собой платформу сбора и обработки данных, в ее корпусе установлено до семи модулей (до 65 входных и/или 10 выходных каналов генератора), два из которых служат для питания постоянным током и управления, а остальные являются измерительными (ввод/вывод) и выбираются в зависимости от решаемых задач.

Применяемая в НПП «Полюс» система анализа PULSE в качестве измерительных модулей содержит два модуля типа 3109 и один типа 3038, каналы которых предназначены для подключения микрофонов и акселерометров, зарядовых преобразователей, преобразователей CCLD и других, работающих как источники напряжения [4].

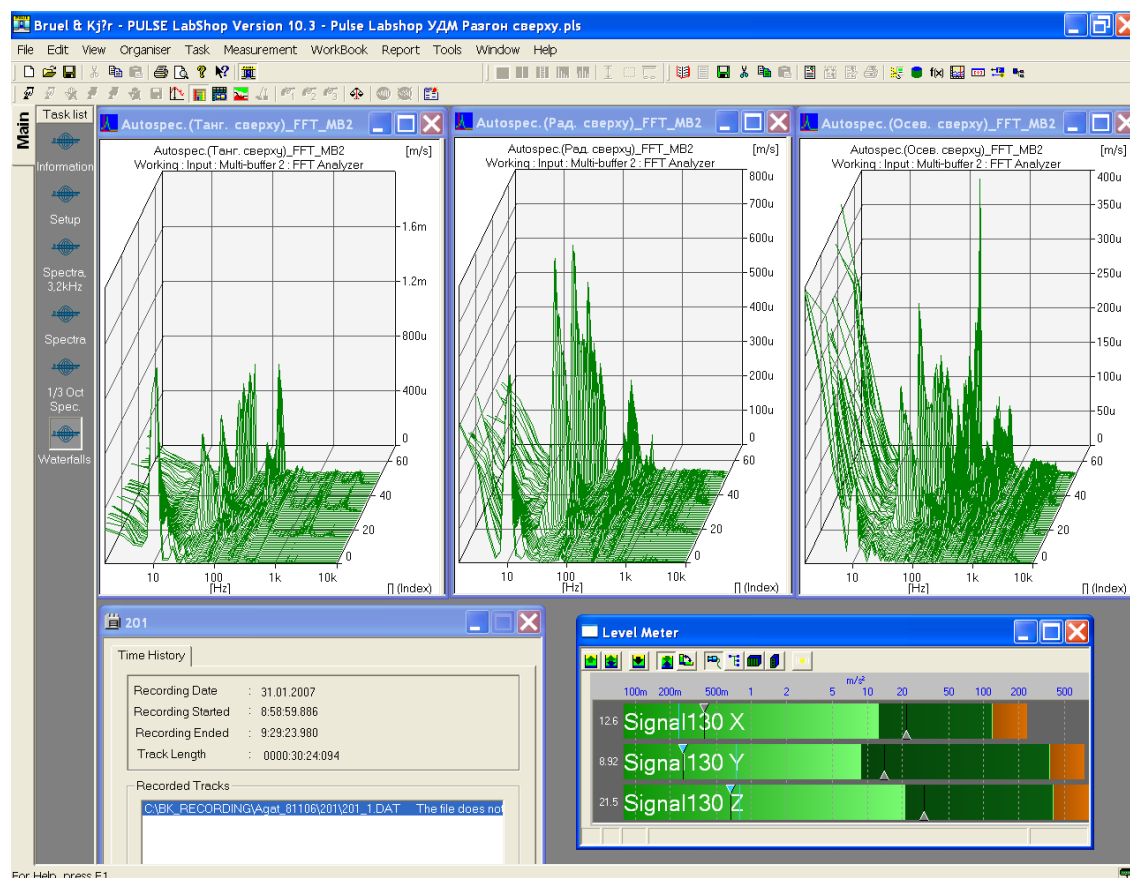


Рис. 4. Рабочее пространство программы PULSE Lab Shop

Функционирует система с помощью программного обеспечения, работающего в среде Microsoft Windows. Программа PULSE Lab Shop создает рабочее пространство для применения системы анализа. Это программное обеспечение включает в себя пакет прикладных программ для анализа шума и вибраций 7700. Выполнение измерений осуществляется анализаторами следующих типов: быстро-го преобразования Фурье (БПФ), с постоянной относительной шириной полосы ($1/n$ -октавный) и суммарных уровней. Настройки анализаторов позволяют установить параметры (количество линий, частотный диапазон, режим усреднения, параметра триггера записи), выбрать собственные и наложенные спектры, которые должны быть измерены, измерить временные сигналы и получить матрицу с ячейками, соответствующими их группам [4].

Проект для определения вибрационных характеристик ДМ создается добавлением анализатора БПФ и его настройкой (установкой параметров). Рабочий частотный диапазон анализатора 10^4 Гц, количество линий – 6400, временной промежуток между измерениями 640 мс.

Анализатор спектра в реальном масштабе времени реализует временные и частотные спектры сигналов датчиков через определенный промежуток времени. Для оператора, проводящего испытания, эти промежутки определяются показаниями частотомера в диапазоне от 200 до 5500 об/мин с шагом 100 об/мин. Указанный диапазон фиксируется анализатором спектра в виде порядкового номера отсчета: $n_1, n_2, \dots, n_{54}$. Временные спектры измерений сохраняются в мультибуфере анализатора,

а частотные – выводятся в рабочее пространство программы PULSE Lab Shop в виде графиков трех переменных: частоты сканирования, уровня виброскорости, частоты вращения ДМ. При проведении испытаний в том же рабочем пространстве отображаются общее время испытаний, трехмерные графики по трем направлениям ВИП и сигналы датчиков, рис. 4.

В программу Microsoft Office Excel можно экспортировать из организатора функций или организатора экранов любые данные системы PULSE.

Данные, скопированные из организатора функций, экспортируются в основных единицах или в действительных и комплексных единицах измерения для сложных функций. Этот метод удобен, когда данные подлежат заключительной обработке. Возможно экспортирование как одной, так и группы функций.

Данные, скопированные из организатора экранов, экспортируются в единицах измерения, которые аналогичны изображенным на экране. Это удобно для создания таблиц данных.

Используя копирование из организатора функций и заменяя номера отсчетов $n_1, n_2, \dots, n_{54}$ на частоты вращения ДМ получаем двумерные графики зависимости виброскорости по общему уровню от частоты вращения в режимах разгона и выбега по трем направлениям, рис. 5.

На рис. 6 представлен спектр измерения в точке n_{20} (частота вращения ДМ 2600 об/мин).

Полученная информация позволяет определить резонансные частоты конструкции ДМ и уровни

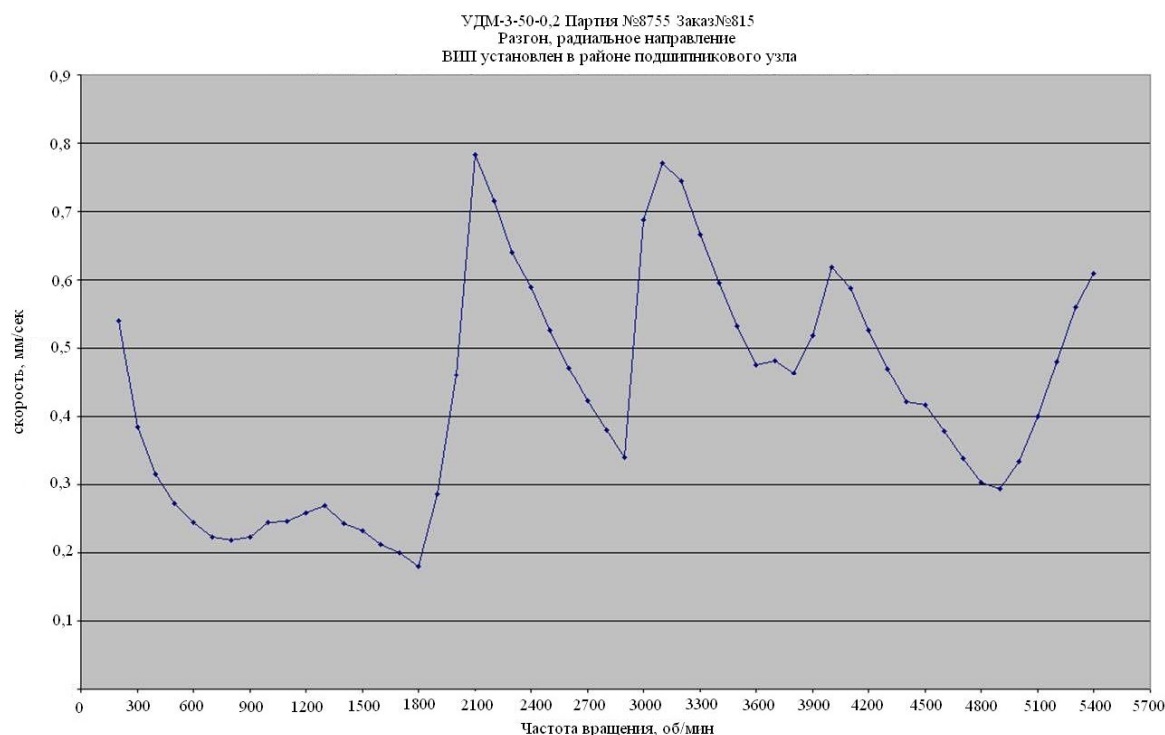


Рис. 5. График зависимости виброскорости от частоты вращения

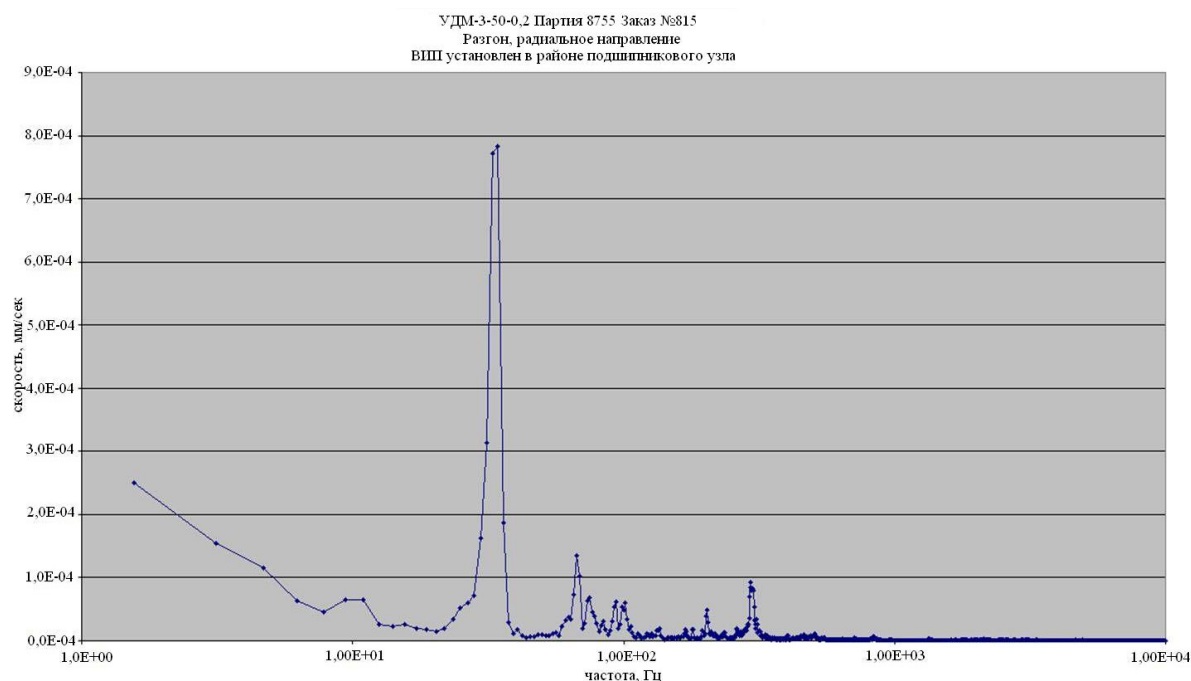


Рис. 6. Спектр измерения в точке n_{20}

виброскорости на номинальных оборотах и в режимах разгона и выбега.

Основная задача анализа динамической характеристики ДМ состоит в определении собственных частот конструкции и её дефектации [5].

В процессе разгона или выбега при совпадении частоты вращения ДМ с собственной частотой конструкции происходит резкое увеличение значения виброскорости. Это явление можно идентифицировать как проявившийся собственный конструкционный резонанс. Также рост значения виброскорости может свидетельствовать о наличии дефекта конструкции. Предполагается, что силы, действующие на частоте вращения ДМ, достаточны для возбуждения конструкции и, как следствие, проявления резонансных явлений.

С целью выявления совпадений аналитически и экспериментально полученных дефектных частот проводится узкополосный анализ. Совпадение в пределах 10 % позволяет утверждать о наличии определенного типа дефекта:

- технологического в виде статического, динамического дисбаланса, несоосности и изгиба вала и т. д.;
- механического в виде термического изгиба ротора, эксцентриситета ротора, разболтанности вращающегося элемента и т. д.;
- электрической природы (наведенная вибрация) (сетевой помехи, колебаний, возбуждаемых электромагнитным полем, магнитострикции и т. д.).

Самым критичным звеном в традиционной конструкции гиромотора является шарикоподшипниковый узел (и непосредственно шарикоподшипник) как основной источник смещения центра

масс и вибрации. Спектр вибрации шарикоподшипников состоит из многочисленных гармоник, причем некоторые из них имеют высокие уровни по амплитуде. Вибрация подшипников определяется случайными взаимодействиями геометрически неидеальных поверхностей дорожек качения и шариков. Возможны выбросы энергии, обусловленные внезапными проскальзываниями шариков и их резким проворачиванием под действием гироскопических моментов, что оказывает влияние на колебание момента инерции и, вследствие этого, колебание кинетического момента и отклонение главной оси гироскопа [6].

Одной из важных задач анализа является рассмотрение норм уровней виброскоростей в рабочих диапазонах частот подшипников высокого класса точности (Ш8), применяемых в конструкциях ДМ [7].

Вибрация вращающихся подшипников качения — их важнейшая рабочая характеристика. Ее определение позволит сформировать предельные уровни виброскоростей во всем рабочем диапазоне частот вращения ДМ.

В шарикоподшипнике вероятны следующие неисправности: неровность сепаратора, некруглость дорожек качения колец, дефекты шарика и т. д.

Пример аналитического расчета дефектной частоты, Гц, шарикоподшипникового узла при равномерном чередовании в подшипнике шариков большого и малого размера:

$$f = \frac{r_H}{r_H + r_B} \cdot \frac{n_{ш}}{2} \cdot \frac{f_{об}}{60},$$

где r_v и r_n — радиусы дорожек качения внутреннего и наружного колец, мм; $n_{ш}$ — количество тел качения (шариков), шт.; $f_{об}$ — относительная частота вращения внутренней и внешней обоймы (оборотная частота), Гц.

Большое количество элементов конструкции ДМ (маховик, вал, корпус, крышка, шарикоподшипник и т. д.) осложняет вибрационный анализ, так как основные элементы имеют собственные спектры вибрации (конструкционные резонансы, гармоники и субгармоники), а в процессе вращения проявляются модулированные частоты. Поэтому при вибрационном анализе очень важно статистическое описание результатов ряда измерений, выполненных в одних и тех же точках большого количества идентичных объектов, работающих в одинаковых условиях.

Для проведения статистического анализа используется наработанная база данных, что позволяет сформировать закон распределения динамической

характеристики ДМ каждого типа изделия, выделить частотные поддиапазоны, в которых виброскорость имеет наибольшее значение, определить максимальные уровни вибрации в каждом поддиапазоне.

Динамическая характеристика ДМ дает возможность обнаруживать технологические и производственные дефекты конструкции и проводить качественную классификацию изделий.

Выводы

1. Предложен метод вибрационной диагностики двигателей-маховиков на режимах разгона и выбега с использованием многоканальной системы анализа PULSE, в частотной и временной областях произведен анализ вибрации двигателей-маховиков.
2. Метод позволяет сформировать закон распределения динамической характеристики двигателей-маховиков, идентифицировать возможные дефекты его конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гирокоспические системы: Элементы гирокоспических приборов / Е.А. Никитин, С.А. Шестов, В.А. Матвеев; Под ред. Д.С. Пельпора. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1988. — 432 с.
2. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. — Л.: Энергия, 1973. — 200 с.
3. Определение динамических характеристик конструкции управляемых двигателей-маховиков / В.Я. Андросов, С.В. Фишко, А.В. Плотников, И.В. Петш // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. — Новосибирск: Наука, 2007. — С. 430–434.
4. Универсальная многофункциональная система анализа PULSE 3560: Bruel & Kjaer. — 2006. — 250 с.
5. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 156 с.
6. Журавлев В.Ф., Бальмонт В.Б. Механика шарикоподшипников гирокоспов / Под ред. Д.М. Климова. — М.: Машиностроение, 1985. — 272 с.
7. ГОСТ Р (ИСО 15242-1: 2004) Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 1. Основные положения.

Поступила 09.09.2009 г.