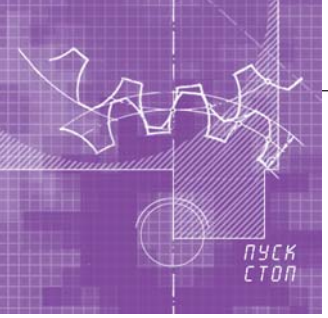

Автоматизированная система балансировки роторов

Дмитрий Егоров, Любовь Глазырина, Петр Жиганов, Александр Ключников, Александр Пелевин

В статье описывается автоматизированная система для выполнения работ по динамической балансировке роторов на вертикальном балансировочном стенде с газостатическими подшипниками.

Введение

Современная техника предъявляет всё возрастающие требования к точности балансировки и определению масс-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ) жёстких межопорных роторов, в частности, главных моментов инерции, смещения центра масс, угла отклонения главной продольной центральной оси инерции ротора от оси вращения и других.

Мерой неуравновешенности тела является дисбаланс — векторная величина, равная произведению неуравновешенной массы на ее эксцентриситет. Дисбаланс полностью определяется значением и углом в системе координат, связанной с осью ротора. Процесс определения значения и угла дисбаланса ротора и уменьшения их величин корректировкой масс называют балансировкой ротора. При статической балансировке определяют и уменьшают главный вектор дисбалансов обычно в одной плоскости. Статическую неуравновешенность можно определить без вращения ротора с помощью силы тяжести. При этом статическая балансировка не позволяет выявить и устранить динамическую неуравновешенность ротора [1].

Однако в процессе эксплуатации для функционирования ротора с заданной точностью его ось вращения должна совпадать с его главной продольной центральной осью инерции. Решение этой задачи может быть выполнено только методом моментного уравновешивания ротора после его сборки. Динамическая балансировка уменьшает как главный вектор, так и момент дисбалансов ротора. Она требует вращения ротора и обязательно двух плоскостей коррекции. Для устранения действия нагрузок от массы тела балансировка ротора выполняется при вертикальном положении оси вращения. Использование газостатических подшипников обеспечивает отсутствие механического контакта между поверхностью ротора и поверхностями подшипников и исключает износ поверхности ротора в процессе его балансировки (что может быть полезно, например, при балансировке роторов летательных аппаратов и в ряде других ответственных приложений).

Объект балансировки

Объект представляет собой тело вращения (жёсткий ротор) с двумя плоскостями коррекции. В каждой плоскости имеются равномерно расположенные по окружности резьбовые отверстия, угловые положения которых известны и связаны с системой координат ротора, для установки контрольных и балансировочных грузов.

Описание конструкции стенда

Работы по динамической балансировке роторов и определению их МЦИХ выполняются на вертикальном низкочастотном балансировочном стенде с «жесткими» измерительными опорами в виде двух конических газостатических подшипников. Стенд также оборудован пневмо-распределительной системой (ПРС), предназначенной для очистки воздуха и стабилизации его давления.

Конструктивно балансировочный стенд (рис. 1) выполнен в виде массивного фундамента, на вертикальной стойке которого закреплены верхняя и нижняя измерительные опоры. Опоры представляют собой плоскопараллельные подвески, к упругим пластинам которых крепятся соответственно верхний и нижний конические газостатические подшипники. Нижняя опора с помощью механизма регулировки радиальных зазоров имеет возможность продольного (вдоль оси ротора) перемещения. Установочные базы подшипников соответствуют установочным базам ротора. Подшипники оборудованы пневматическими приводами для разгона и торможения ротора, воздух в которые от пневмосети после очистки и осушки поступает через электромагнитные пневмораспределители (клапаны), входящие в состав ПРС стенда.

В упругих подвесках каждого из подшипников установлены включенные по дифференциальной схеме датчики силы, измеряющие реакции опор на проявления динамической неуравновешенности ротора при его вращении. На рис. 1 показаны только датчики верхнего подшипника, датчики в подвесках нижнего подшипника установлены аналогично.

Для определения частоты вращения ротора используется световодный фотодатчик. Светоотражающее зеркало на цилиндрической части боковой поверхности ротора с помощью клея закрепляется на уровне свободного торца световода, и его угловое положение однозначно связано с системой координат ротора.

Задачи, решаемые автоматизированной системой

Автоматизированная система контроля и управления (СКУ) процессом

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

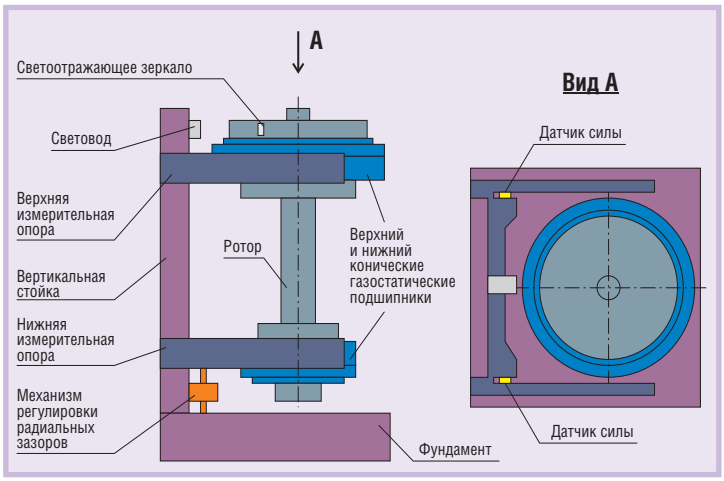

Рис. 1. Конструкция балансировочного стенда

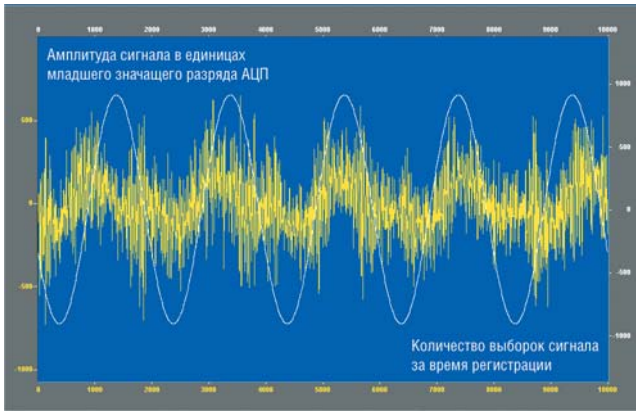

Рис. 2. Вид типового сигнала с датчика силы (жёлтый цвет) и того же сигнала после усиления, фильтрации и цифровой обработки (белый цвет)

балансировки роторов создана на базе персонального компьютера и модулей аналогового и дискретного ввода-вывода производства фирмы Advantech. СКУ предназначена для

- контроля сетевого давления воздуха на входе в ПРС с помощью реле давления;
- управления исполнительными механизмами (клапанами);
- измерения скорости вращения ротора;
- ввода аналоговых сигналов от датчиков силы;
- выделения полезной информации из смеси сигнала и помехи, вызываемой в основном движениями воздуха, электромагнитными наводками, неравномерностью воздушных зазоров и другими причинами (на рис. 2 показаны типовой сигнал, снимаемый с датчика силы при вращении ротора в подшипниках стенда, и тот же сигнал после его усиления, фильтрации и цифровой обработки);
- определения значений и углов дисбалансов в системе координат, связанной с осью ротора;
- расчета массы и мест установки балансировочных грузов в плоскостях коррекции ротора.

Структурная схема СКУ

СКУ представляет собой одноуровневую систему на базе IBM PC совместимого персонального компьютера. Структурная схема системы показана на рис. 3. Система содержит:

- датчики силы AC20 с блоками согласования аналоговых сигналов (усилителями) AB02;
- двухканальное устройство связи с измерительными усилителями и фильтрами низких частот в каждом канале;
- световодный фотодатчик;
- тактовый генератор с частотой 10 кГц;
- модуль дискретного ввода-вывода PCL-725 для управления клапанами разгона, торможения и ввода сигналов от фотодатчика и аварийного реле давления;
- модуль ввода аналоговых сигналов PCL-818L, один из счетчиков-таймеров которого используется также для счета количества импульсов, поступающих на его вход от тактового генератора за время одного полного оборота ротора;
- источник питания NFS80-7602K, предназначенный для обеспечения питающими напряжениями постоянного тока +5, +12, –12 и +24 В фотодатчика, устройства связи, а также клапанов и реле давления. Питание тактового генератора осуществляется непосредственно от модуля PCL-818L;
- программное обеспечение.

Модули PCL-725 и PCL-818L производятся фирмой Advantech, источник питания NFS80 — фирмой Artesyn Technologies; датчики силы AC20 и усилители AB02 также являются покупными изделиями.

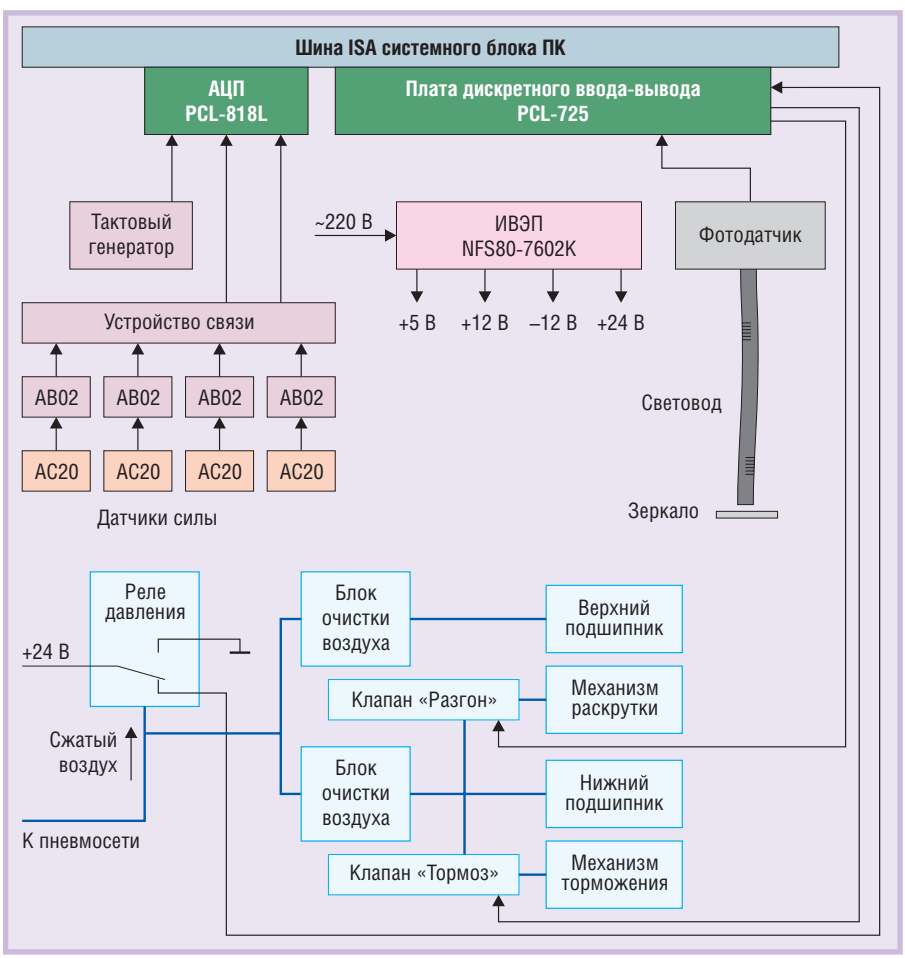

Рис. 3. Структурная схема системы

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

Модули PCL-725 и PCL-818L установлены в системном блоке компьютера. Фотодатчик, содержащий в своем составе генератор инфракрасного излучения, световод и фотоприемник, выполнен в виде отдельного блока. Для прохождения по световоду прямого и отраженного пучков света стеклянные волокна на одном конце световода разделены на два отдельных световода, закрепленных в корпусе фотодатчика. Тактовый генератор, устройство связи, усилители, а также источник питания смонтированы в металлическом корпусе, имеющем габариты 270×270×85 мм и расположенном рядом с системным блоком компьютера на рабочем месте оператора.

Программное обеспечение

В процессе функционирования системы участвует оператор. Для удобства восприятия информация о процессе балансировки ротора представляется графически в виде нескольких кадров, позволяющих оператору вводить начальные данные, управлять исполнительными механизмами, корректировать диапазоны измерения АЦП, просматривать промежуточные результаты измерений, а также содержащих средства визуализации процессов раскрутки и торможения ротора, регистрации сигналов от датчиков силы.

Пилотная версия функционального программного обеспечения СКУ написана на языке Pascal и исполняется под управлением операционной системы Windows NT. Программа контролирует рабочее давление воздуха и частоту вращения ротора, обеспечивает раскрутку и торможение ротора, ввод, цифровую обработку и графическое представление данных в режимах реального времени и их накопление на жестком диске, определяет значения и углы дисбалансов в двух плоскостях измерения, выводит на монитор промежуточные результаты измерения и обработки сигналов, рассчитывает массы и места установки балансировочных грузов в двух плоскостях коррекции, рассчитывает величину смещения центра масс ротора и угол отклонения главной продольной центральной оси инерции, печатает протокол балансировки ротора.

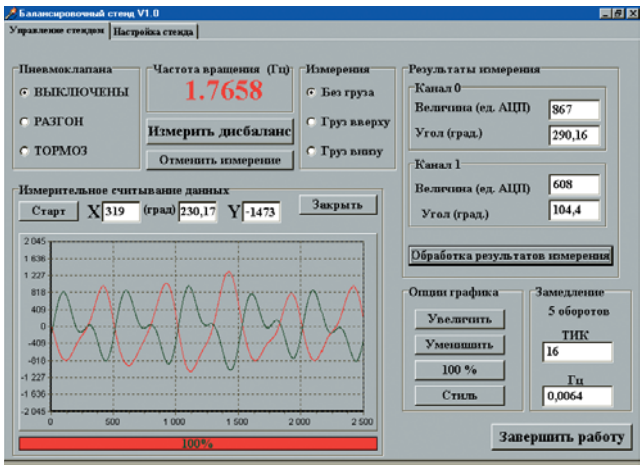

Рис. 4. Вид экрана оператора после регистрации вибросигналов

Методика балансировки ротора

После подачи в газостатические подшипники рабочего давления воздуха и установки ротора на рабочие поверхности подшипников с воздушным зазором выполняется регулировка этих зазоров между ротором и рабочими поверхностями подшипников перемещением нижнего подшипника вдоль оси ротора. В программу вводятся начальные данные, необходимые для последующих расчетов МЦИХ ротора (масса ротора, массы балансировочных грузов и элементов крепления, радиусы установки грузов в плоскостях коррекции и др.).

Пуск ротора включает в себя следующие фазы: разгон, свободное вращение под действием сил инерции и сил трения (выбег), регистрация сигналов от датчиков силы, установленных в верхней и нижней измерительных плоскостях стенда, торможение до полного останова ротора.

При неизменности в процессе балансировки давления сжатого воздуха, а также таких параметров ротора и опор, как расстояния от плоскостей коррекции до опор, массы, жесткости и т.п., балансировочная чувствительность зависит от частоты вращения ротора. Поэтому при каждом пуске запись сигналов от датчиков силы проводится в процессе выбега ротора на постоянной частоте вращения.

После регистрации сигналов начального неизвестного дисбаланса ротора выполняются несколько дополнительных пусков для определения балансировочной чувствительности стенда по массе и углу в верхней и нижней плоскостях коррекции ротора. Для этого контрольные грузы известной массы устанавливаются в соответствующие известным углам резьбовые отверстия обеих плоскостей коррекции. В каждом пуске после усиления и фильтрации, выполняемой с целью устранения шума производственного характера, сигналы оцифровываются и регистрируются в памяти компьютера в течение заданного времени. Начало регистрации осуществляется по сигналу от фотодатчика при достижении ротором заданной частоты вращения. На рис. 4 показан вид экрана оператора с графиками сигналов по окончании их регистрации: красный цвет соответствует сигналу от датчиков, установленных в верхней измерительной плоскости, зеленый — сигналу от датчиков в нижней измерительной плоскости; по оси абсцисс отложено время регистрации в секундах, по оси ординат — амплитуда сигналов в единицах младшего значащего разряда АЦП. Спектр типового регистрируемого сигнала приведен на рис. 5.

Как видно из рис. 4 и 5, зарегистрированные процессы изменения силы в опорах подшипников представляют собой сумму нескольких гармонических составляющих. Кроме дисбалансов, вибрации на кратных частотах могут вызывать несоосность подшипников, овальность ротора в плоскостях подшипников и другие причины.

Дальнейшая обработка сигналов с применением цифровой фильтрации производится с целью выделения гармонических составляющих зарегистрированных сигналов с частотой, равной частоте вращения ротора (рис. 2), то есть чувствительных к дисбалансу ротора. По значениям амплитуды этих гармонических составляющих и

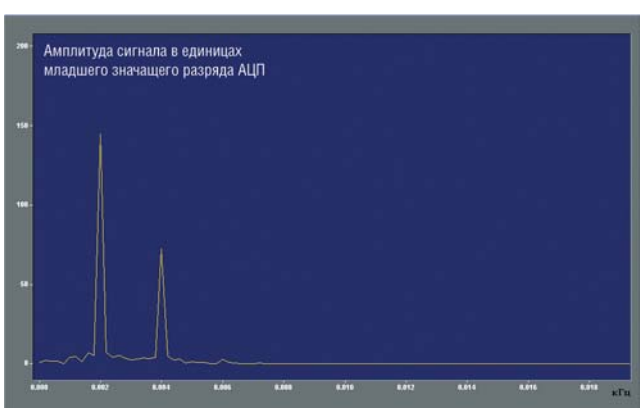

Рис. 5. Спектр зарегистрированного вибросигнала

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

значениям углов, при которых достигаются первые максимумы, определяются значения и углы дисбалансов в верхней и нижней плоскостях коррекции.

Векторно исключив влияние сигналов начального дисбаланса ротора из суммарных сигналов дисбалансов, зарегистрированных после установки контрольных грузов в плоскостях коррекции, можно вычислить коэффициенты балансировочной чувствительности системы. Затем, используя полученные коэффициенты, по ранее зарегистрированным сигналам начального неизвестного дисбаланса ротора определяются значения и углы начального дисбаланса ротора в плоскостях коррекции.

После расчета начального дисбаланса ротора и определения массы и мест установки балансировочных грузов выполняется контрольный цикл раскрутки ротора с грузами, установленными в плоскостях коррекции, для определения остаточного дисбаланса и величины смещения центра масс относительно оси ротора, а также его углового положения в связанной с ротором системе координат. Если значения параметров МЦИХ находятся в пределах допуска, то процесс балансировки завершается, в противном случае рассчитываются и устанавливаются дополнительные балансировочные грузы и повторяется контрольный цикл раскрутки ротора.

Система завершает свою работу выпуском итогового протокола, содержащего информацию о МЦИХ ротора до и после балансировки на стенде.

Надёжность и точность результатов

Надежность результатов балансировки обеспечивается следующими мерами:

- при работе системы регистрируется информация в течение нескольких оборотов ротора;
- относительное изменение частоты вращения ротора за время съёма информации не превышает 0,4% (обеспечивается автоматический контроль изменения частоты вращения);
- производится исключение внешних шумов при определении параметров дисбалансов;
- автоматически реализуются начало регистрации сигналов в каждом цикле раскрутки и измерения по достижении в процессе выбега ротора заданной частоты вращения;



После изготовления ротора балансировка на стенде с газостатическими подшипниками обеспечит полную сохранность его поверхности

- подбор оптимального диапазона измерения АЦП каждого канала осуществляется по командам оператора с консоли.

Для моделирования процесса балансировки и отработки методики использовался контрольный ротор с известным начальным дисбалансом. На этапе предварительной наладки удалось уменьшить величину суммарного начального дисбаланса за четыре итерации в 18-20 раз, при этом смещение центра масс ротора относительно оси вращения не превышало 0,005 мм и отклонение главной продольной центральной оси инерции от оси вращения ротора было меньше 30 угловых секунд.

Заключение

Проведенные работы подтвердили эффективность применяемого метода и оборудования для низкочастотной балансировки роторов с повышенными эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к качеству их поверхности. В настоящее время проводится подготовка к метрологической аттестации стенда и вводу системы в опытную эксплуатацию.

Эффект от внедрения системы заключается в повышении точности определения массо-центровочных и инерционных характеристик ротора в 2-3 раза по сравнению с устройствами, использующими метод крутильных колебаний, в сокращении капитальных затрат на изготовление технологической оснастки, а также в повышении производительности процесса балансировки. ●

Литература

1. Левит М.Е., Рыженков В.Н. Балансировка деталей и узлов. — М.: Машиностроение, 1985. — 248 с.

Авторы — сотрудники РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина
Факс: (351-72) 326-25

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru