

М. Е. ЛЕВИТ, В. М. РЫЖЕНКОВ

Балансировка

ДЕТАЛЕЙ
И УЗЛОВ



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1986

ББК 34.686
Л36
УДК 621.755-251

Рецензет инж. В.Л. Аэроп

Л36 **Левит М.Е., Рыженков В.М.**
 Балансировка деталей и узлов. — М.: Машино-
 строение, 1986. — 248с., ил.
 В пер.: 1 р. 10 к.

Изложены основные вопросы балансировочной техники, необходимые для практической балансировки деталей и узлов изделий различных отраслей машиностроения.

Для рабочих машиностроительных предприятий, получающих или повышающих квалификацию по профессии балансировщика деталей и узлов; может быть полезна рабочим других профессий, занимающихся ремонтом, техническим обслуживанием и эксплуатацией машин и механизмов.

Л 2704090000-277
 038 (01)-86 277-86

ББК 34.686
6П5.4

ОГЛАВЛЕНИЕ

От авторов	5
Введение	6
Термины и определения	7
Обозначения основных физических величин и их размерности	10
Г л а в а 1. Основы балансировочной техники	12
1.1. Некоторые сведения из механики	12
1.2. Неуравновешенность и дисбаланс	24
1.3. Точность балансировки	31
1.4. Методы и средства балансировки	36
Г л а в а 2. Статическая балансировка	49
2.1. Основы статической балансировки при помощи сил тяжести	49
2.2. Погрешности статической балансировки	53
2.3. Станки для статической балансировки	57
2.4. Контроль остаточных дисбалансов	63
2.5. Определение моментов инерции тел	65
Г л а в а 3. Динамическая балансировка	69
3.1. Основы динамической балансировки	69
3.2. Низкочастотная балансировка	70
3.3. Высокочастотная балансировка	88
3.4. Конструктивно-технологические особенности балансировки	91
3.5. Погрешности динамической балансировки	94
3.6. Контроль остаточных дисбалансов	95
Г л а в а 4. Станки для динамической балансировки	101
4.1. Устройство и принцип действия балансировочных станков	101
4.2. Конструкция балансировочных станков	113
4.3. Типы балансировочных станков	121
4.4. Нормы точности	127
Г л а в а 5. Средства балансировки	131
5.1. Приспособления для балансировки станков	131
5.2. Слесарно-сборочный инструмент и приспособления	142
5.3. Средства измерений	146
5.4. Режущие инструменты	151
Г л а в а 6. Эксплуатация станков для динамической балансировки	154
6.1. Подготовка станка к эксплуатации	154
6.2. Настройка балансировочного станка	157
6.3. Балансировка партии роторов	167
6.4. Техническое обслуживание	168
6.5. Техника безопасности	172

Г л а в а 7. Корректировка масс	174
7.1. Способы корректировки масс	174
7.2. Корректирующие устройства	176
7.3. Расчет корректирующих масс	179
7.4. Приемы выполнения работ	189
Г л а в а 8. Технология балансировки	200
8.1. Основные понятия о технологическом процессе балансировки	200
8.2. Организация работ	202
8.3. Нормирование и тарификация работ	205
8.4. Технологическая подготовка производства	209
8.5. Технологическая документация	219
Г л а в а 9. Типовые рабочие технологические процессы балансировки деталей и узлов в машиностроении и приборостроении	223
9.1. Технологический процесс статической балансировки диска	224
9.2. Технологический процесс динамической балансировки ротора средней электрической машины	226
9.3. Технологический процесс статико-моментной балансировки маховика инерционного гиростабилизатора	229
9.4. Технологический процесс низкочастотной многоплоскостной балансировки ротора центробежного насоса	234
9.5. Технологический процесс высокочастотной балансировки ротора турбоагрегата на месте установки	238
М етод ические ука зания	242
С писок нормативной литературы	247

О Т А В Т О Р О В

Данная книга предназначена для рабочих машиностроительных предприятий, получающих или повышающих квалификацию по профессии балансировщик деталей и узлов. Она также полезна рабочим других профессий, производящим ремонт, техническое обслуживание и эксплуатацию машин и механизмов.

При изложении материала авторы придерживались перечня работ по профессии балансировщик деталей и узлов, содержащегося в Едином тарифно-квалификационном справочнике, использовали передовой опыт и прогрессивную технологию балансировки, а также опыт обучения рабочих предприятий различных отраслей машиностроения. Все рекомендации, которые даются в книге, проверены на практике и освоены балансировщиками в серийном производстве.

Наличие в книге рисунков, примеров решения задач, прикладных программ для расчетов на микроЭВМ, типовых технологических процессов балансировки различных изделий и справочных материалов будет полезно для повседневной работы балансировщика.

Настоящая книга является первой попыткой систематического изложения вопросов балансировки для работников различных отраслей народного хозяйства.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей современного технического прогресса является систематический рост рабочих скоростей вращения роторов машин, приборов и механизмов. Например, частота вращения роторов центрифуг доходит до 500 тыс. об/мин, а некоторых деталей текстильных машин — до 1 млн. об/мин. Вполне естественно, что с увеличением скоростей вращения возникают и повышенные вибрации.

Вибрации, возникающие при работе машин и механизмов, создают дополнительные нагрузки на детали, увеличивают их износ, снижают срок службы изделий, оказывают неблагоприятное физиологическое воздействие на организм человека. Разрушение опор и фундаментов машин, повышенный износ автомобильных шин, некачественное воспроизведение магнитофонной записи — все это и многое другое в большинстве случаев связано с высоким уровнем вибрации. Поэтому борьба с вредными вибрациями — актуальная проблема современного машиностроения и приборостроения. В то же время, вибрации, используемые при работе формовочных и литейных машин, при погружении свай и труб в грунт, при уплотнении бетона и во многих других производственных процессах, являются полезными.

В процессе проектирования машин и механизмов стремятся уменьшить вредные вибрации, выбирая наиболее правильные решения в отношении конструкции и технологии изготовления, добиваются весовой симметрии всех движущихся частей путем уравновешивания. Однако, в процессе изготовления и эксплуатации деталей и узлов возникают условия, нарушающие симметрию и приводящие к неуравновешенности. Для уменьшения неуравновешенности при изготовлении, ремонте, эксплуатации производят балансировку тел вращения путем изменения их массы или геометрии.

Надлежащая балансировка деталей автомобиля удлиняет срок службы на 25 ... 100%, повышает полезную мощность двигателя на 10%. Балансировка увеличивает в 3 раза стойкость алмазных кругов, снижает в 4 раза волнистость обрабатываемой поверхности. Подобные примеры можно привести для изделий и других отраслей машиностроения.

Первоначально уравновешивание вращающихся масс проводилось лишь расчетным путем при конструировании. Необходимость в динамической балансировке как операции техноло-

гического процесса изготовления возникла в связи с внедрением высокооборотных паровых турбин. Первые балансировочные станки появились в России, Швейцарии и Германии в конце XIX начале XX вв.

Бурное развитие машиностроения и приборостроения в середине нашего века потребовало решения многих вопросов балансировочной техники. Была начата разработка вопросов теории балансировки роторов, уравновешивания механизмов; созданы станки для балансировки деталей массой от нескольких граммов до сотен тонн, высокопроизводительные балансировочные автоматы и автоматические линии. Балансировка космических летательных аппаратов производится с минимальной скоростью вращения до 30 об/мин, а центрифуг — при скорости вращения 12 000 об/мин.

Решения XXVII съезда КПСС нацелили промышленность на резкое повышение качества выпускаемой продукции. В связи с этим в последние годы значительно возрос объем балансировочных работ, внедряются в производство принципиально новое балансировочное оборудование и методы уравновешивания. Широкое внедрение микропроцессоров, лазерной техники позволяет современному балансировщику деталей и узлов достигать высокой точности балансировки.

О том, как и на чем балансируют детали и узлы, роторы и агрегаты в сборе на месте установки, авторы и хотят рассказать в этой книге.

По своему содержанию и изложению материала книга существенно отличается от изданной ранее литературы. В ней рассмотрены все вопросы балансировочной техники, начиная с теоретических основ уравновешивания и кончая практическими приемами выполнения работ.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В балансировочной технике применяются термины из различных областей науки, техники и производства. Единая терминология способствует правильному пониманию решаемых задач при балансировке и уменьшению ошибок в работе. Приводимые ниже определения терминов могут быть при необходимости изменены по форме, но при этом не должен нарушаться смысл понятия.

Механика.

Механическое движение — изменение положения тела относительно других тел. Механическое движение определяется траекторией, пройденным путем, скоростью и ускорением.

Скалярная величина — величина, каждое значение которой может быть выражено одним числом.

Векторная величина — величина, которая кроме численного значения имеет направление.

Инерция — явление сохранения скорости движения тела или состояния покоя при отсутствии действия других каких-либо сил.

Масса — мера инертности и гравитационных свойств тела.

Сила — векторная величина, служащая мерой механического взаимодействия тел. В природе и технике действуют силы тяжести, упругости, трения и другие силы.

Момент силы — механическая величина, равная произведению силы на расстояние от точки приложения силы до заданной точки (полюса) или оси.

Колебания — процесс поочередного возрастания и убывания, обычно во времени, какой-либо величины.

Механические колебания — колебания значения кинематической или динамической величины. Механические колебания определяются временем, амплитудой, фазой, угловой частотой. Механические колебания бывают свободные, вынужденные, резонансные и др.

Вибрация — движение точки или тела, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин. Вибрация характеризуется виброперемещением, виброскоростью, виброподъемом, виброперегрузкой.

Вращательное движение вокруг оси — движение, при котором все точки, двигаясь в параллельных плоскостях тела, описывают окружности с центрами, лежащими на одной прямой, перпендикулярной к плоскости этих окружностей и называемой осью вращения. Вращение определяется углом поворота, угловой скоростью, угловым ускорением.

Момент инерции тела относительно оси — величина, являющаяся мерой инертности тела во вращательном движении вокруг этой оси.

Ротор — тело, которое при вращении удерживается своими несущими поверхностями в опорах. В балансировочной технике роторы делят на классы: жесткие, упругодеформируемые, гибкие и др. (см. гл. 1, п. 2).

Несущая поверхность ротора — поверхности цапф или поверхности, их заменяющие. Несущая поверхность ротора передает нагрузки на опоры через подшипники скольжения или качения.

Неуравновешенность и дисбаланс.

Неуравновешенность — состояние ротора, характеризующееся таким распределением масс, которое во время вращения вызывает переменные нагрузки на опорах ротора и его изгиб. Неуравновешенность жесткого ротора бывает статическая, моментная, динамическая, квазистатическая. Неуравновешенность гибкого ротора бывает по *n*-й форме изгиба.

Эксцентриситет массы — радиус-вектор центра рассматриваемой массы относительно оси ротора.

Точечная неуравновешенная масса — условная точечная масса с

заданным эксцентрикитетом, вызывающая во время вращения ротора переменные нагрузки на опорах и его изгиб.

Дисбаланс — векторная величина, равная произведению неуравновешенной массы на ее эксцентрикитет. Дисбаланс полностью определяется значением и углом.

Корректирующая масса — масса, используемая для уменьшения дисбалансов ротора.

Плоскость коррекции, приведения, измерения — плоскость, перпендикулярная оси ротора, в которой расположен центр корректирующих масс, задают дисбаланс, измеряют дисбаланс. **Начальный и остаточный дисбаланс** — дисбаланс в рассматриваемой плоскости, перпендикулярной оси ротора, до и после корректировки масс.

Допустимый дисбаланс — наибольший остаточный дисбаланс в рассматриваемой плоскости жесткого ротора или дисбаланс по n -й форме изгиба гибкого ротора, который считается приемлемым.

Технологический дисбаланс — разность значений остаточных дисбалансов в одних и тех же плоскостях ротора, измеренных для изделия в сборе и для сборочной единицы ротора.

Эксплуатационный дисбаланс — разность значений остаточных дисбалансов в одних и тех же плоскостях ротора, измеренных на изделии в сборе до начала его эксплуатации и после того, как оно выработало весь заданный технический ресурс или ресурс до ремонта, предусматривающего балансировку.

Балансировка.

Балансировка — процесс определения значений и углов дисбалансов ротора и уменьшения их корректировкой масс.

Низкочастотная балансировка — балансировка на такой частоте вращения, при которой балансируемый ротор еще можно рассматривать как жесткий.

Высокочастотная балансировка — балансировка на такой частоте вращения, при которой балансируемый ротор уже не может рассматриваться как жесткий.

Балансировка на месте — балансировка ротора в собственных подшипниках и опорах без установки на балансировочный станок.

Статическая балансировка — балансировка, при которой определяется и уменьшается главный вектор дисбалансов ротора, характеризующий его статическую неуравновешенность.

Моментная балансировка — балансировка, при которой определяется и уменьшается главный момент дисбалансов ротора, характеризующий его моментную неуравновешенность.

Динамическая балансировка — балансировка, при которой определяются и уменьшаются дисбалансы ротора, характеризующие его динамическую неуравновешенность.

Балансировка по n -й форме изгиба — балансировка гибких роторов в заданном диапазоне частот вращения для уменьшения

переменных нагрузок на опорах ротора и его изгиба, вызванных неуравновешенностью по *n*-й форме изгиба.

Средства балансировки.

Балансировочный станок — станок, определяющий дисбалансы ротора для уменьшения их корректировкой масс.

Станок для статической балансировки — балансировочный станок, определяющий главный вектор дисбалансов при помощи сил тяжести на невращающемся роторе или на вращающем роторе.

Станок для динамической балансировки — балансировочный станок, определяющий дисбалансы на вращающем им роторе.

Разгонно-балансировочный стенд — балансировочный станок, определяющий нагрузки на опорах ротора и изгиб его оси на вращающем им гибком роторе при высокочастотной балансировке.

Балансировочный комплект — измерительные приборы, позволяющие получить информацию о дисбалансах ротора при его балансировке на месте.

Балансировочная оправка — сбалансированный вал, на который монтируют подлежащее балансировке изделие.

Балансировочная рамка — приспособление для балансировочного станка, на которое устанавливают подлежащее балансировке изделие.

Контрольный ротор — ротор, применяемый для проверки балансировочного станка.

Тарировочный ротор — один из серийных роторов, используемый для тарирования балансировочного станка.

Настройка балансировочного станка — процесс, включающий механическую регулировку привода ротора, установку приспособлений, разделение плоскостей коррекции, тарирование измерительного устройства.

Порог чувствительности балансировочного станка по значению и углы дисбаланса — наименьшее изменение значения и угла дисбаланса, которое может выявить и показать балансировочный станок в заданных условиях.

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

И ИХ РАЗМЕРНОСТИ

\vec{D} — дисбаланс, $\text{г} \cdot \text{мм}$;

\vec{F} — неуравновешенная сила, Н ;

J — момент инерции тела, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

L — расстояние между серединами опор ротора, мм ;

M — крутящий момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

\vec{M}_D — главный момент дисбалансов ротора, $\text{г} \cdot \text{мм}^2$;

R — радиус окружности, мм ;

S — перемещение, мкм , статический момент, $\text{г} \cdot \text{мм}$;

T — период, с^{-1} ;

U — динамическое перемещение, мкм ;

v — скорость, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;
 a — ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$;
 d — диаметр, мм;
 e — эксцентриситет, мкм; удельный дисбаланс, $\text{г} \cdot \text{мм}/\text{кг}$;
 f — частота, Гц;
 g — ускорение свободного падения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ ($g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$);
 h — плечо, мм;
 k — коэффициент жесткости, Н/м;
 l — расстояние между плоскостями коррекции, мм;
 m — масса, кг или г;
 n — частота вращения, с^{-1} ;
 r — радиус, мм;
 y — прогиб ротора, мкм;
 α (альфа) — коэффициент балансировочной чувствительности, $\text{мкм}/\text{г} \cdot \text{мм}$;
 φ (фи) — угол дисбаланса, угол коррекции, $^\circ$;
 ω (омега) — угловая скорость ротора, рад/с

Индексы

$i = 1, 2, 3, \dots$ — порядковый номер;
 A, B — обозначение опор ротора;
ст — статический;
м — моментный;
к — корректирующий;
т — технологический;
э — эксплуатационный;
 x, y, z — координатные направления

Некоторые математические обозначения

\cong приблизительно равно;
 $>$ больше;
 $<$ меньше;
 $\sqrt[n]{\cdot}$ корень n -й степени;
const постоянная величина;
 Σ сумма;
 $\pi \cong 3,14$ отношение длины окружности к диаметру;
 \sin синус;
 \cos косинус;
 \arcsin арксинус;
 \arccos арккосинус

ОСНОВЫ БАЛАНСИРОВОЧНОЙ ТЕХНИКИ

Даны основные понятия балансировочной техники; введены понятия неуравновешенности и дисбаланса; освещены вопросы балансировки жестких и гибких роторов, правила выбора норм точности балансировки роторов различных классов; кратко описано балансировочное оборудование, приспособления и инструменты, применяемые при выполнении работ.

1.1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МЕХАНИКИ

В основе балансировочной техники лежат законы механического движения и взаимодействия тел. Механическим движением тела называют изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени. Геометрические свойства движений называют кинематикой; учение о движении тел под действием сил — динамикой; учение о равновесии тел под действием сил — статикой. Кинематика. Чтобы задать положение тела в пространстве, нужно провести через него три взаимно перпендикулярные оси координат: OX , OY и OZ . Соответственно этому положение тела или точки в пространстве определяется тремя координатами: x , y , z .

При движении всякая точка тела описывает некоторую линию — траекторию точки. По характеру траектории движение точки может быть прямолинейным и криволинейным. В прямолинейном движении точки ее траектория есть прямая, а в криволинейном — кривая линия.

Перемещения тел происходят по разным направлениям. Чтобы полностью определить движение тела, условились приписывать направление перемещению. Его изображают направленным отрезком, снабженным стрелкой, указывающей, в какую сторону происходит движение по этому направлению. Величины, определяемые не только своим числовым значением, но и направлением в пространстве, называют векторными величинами, или векторами. Векторные величины обозначают буквами со стрелкой над ними. Например \vec{S} — вектор перемещения. Модуль (или длина) вектора перемещения — число, показывающее, скольким единицам длины (метрам, миллиметрам и т. п.) равно перемещение. Модуль вектора будем обозначать той же

буквой, что и сам вектор, но без стрелки над ней. Например, S — модуль вектора перемещения \vec{s} . Итак, вектор определяется своим модулем и направлением в пространстве.

Перемещения S могут происходить с различной скоростью. В балансировочной технике скорость обозначают буквой \vec{v} . Единица измерения скорости — м/с (мм/с). Характеристикой изменения скорости со временем служит ускорение. Ускорение обозначают буквой \vec{a} и измеряют в м/с².

Основными случаями прямолинейного и криволинейного движения, изучаемыми в балансировочной технике, являются колебательное движение и равномерное движение точки по окружности. При колебаниях тело поочередно смещается то в одну, то в другую сторону, например, колебания маятника или грузика на пружине. Характерный признак колебаний — повторяемость движения. Минимальный промежуток времени T , через который движение тела полностью повторяется, называют периодом колебаний, а величину, обратную периоду, — частотой колебаний $f = 1/T$.

Единицу частоты обозначают Гц.

Простейшим случаем колебательного движения являются гармонические колебания. Закон гармонических колебаний можно записать в виде формулы

$$S = S_0 \sin \omega t.$$

Скорость точки при гармонических колебаниях

$$v = S_0 \omega \cos \omega t;$$

ускорение

$$a = -S_0 \omega^2 \sin \omega t.$$

Величину S_0 — наибольшее отклонение движущейся точки от начала отсчета — называют амплитудой колебаний, а величину ω — круговой частотой колебаний. Круговая частота ω связана с частотой колебаний f выражением $\omega = 2\pi f$, где $\pi \approx 3.141$. Единица круговой частоты — радиан в секунду (рад/с).

Кривой перемещения гармонических колебаний является синусоида, кривой скоростей — косинусоида, а кривой ускорений — также синусоида, но сдвинутая относительно графика движения на π .

При мер. Маятник совершает гармонические колебания с амплитудой $S_0 = 0,02$ мм и частотой $f = 20$ Гц. Определить максимальное значение скорости v .

Находим значение круговой частоты $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 20$ 1/с = 125,6 рад/с. Максимальное значение скорости маятника при гармонических колебаниях будет в момент времени $t = 0$, так как $\cos \omega t = \cos 125,6 \times 0 = 1$. Максимальная скорость равна $v = S_0 \omega = 0,02$ мм · 256 1/с = 5,12 мм/с.

Для вычисления амплитуд перемещений, скоростей и ускорений при гармонических колебаниях на практике пользуются

$V, \text{мм/с}$

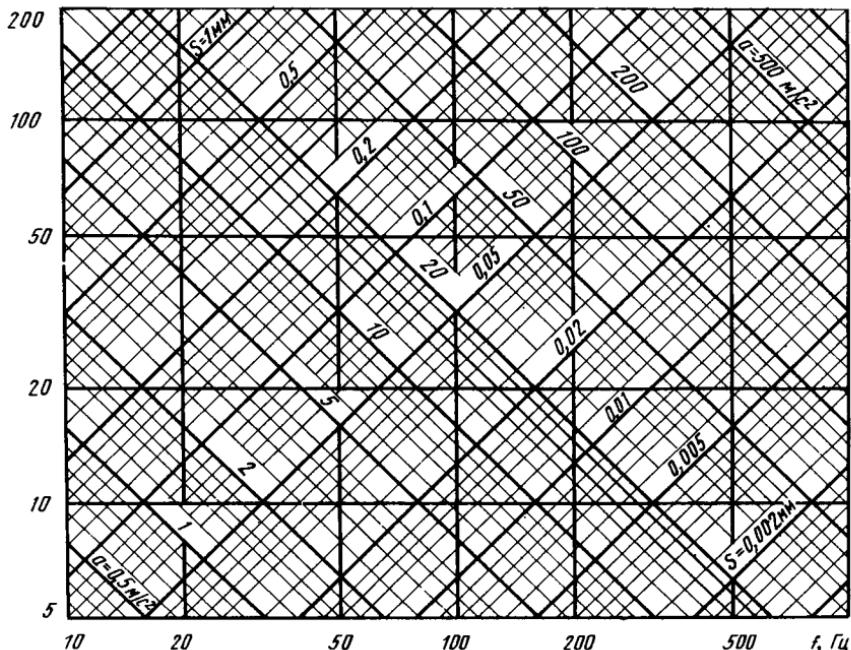


Рис. 1.1. Номограмма скорости, ускорения и перемещения при гармонических колебаниях

номограммой (рис. 1.1). По оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложена частота колебаний в герцах. По оси ординат также в логарифмическом масштабе отложена амплитуда скорости в миллиметрах в секунду (мм/с). Ускорения и перемещения даны на графике наклонными прямыми. Для нахождения всех параметров гармонических колебаний достаточно знать два параметра, например, частоту и перемещение. С помощью этой номограммы определяют остальные параметры.

Движение точки по окружности можно характеризовать углом φ поворота радиуса r . При равномерном движении точки A по окружности углы поворота радиуса за любые равные промежутки времени будут одинаковы. Разделив угол поворота φ на время t , за которое совершен поворот, получим угловую скорость вращения $\omega = \varphi/t$. Если угол φ выражен в радианах, а время t — в секундах, то угловая скорость ω измеряется в радианах в секунду (рад/с).

В отличие от угловой скорости ω , скорость, измеряемую отношением длины пути l ко времени t , называют линейной скоростью v . Между этими скоростями имеется простая зависимость

$$v = \omega r.$$

Скорость движения тела по окружности часто выражают числом оборотов в единицу времени. Угловая скорость ω и число оборотов n (об/с) связаны выражением $\omega = 2\pi n$. Число оборотов в единицу времени называют частотой вращения.

При равномерном движении тела по окружности ускорение в любой ее точке перпендикулярно скорости движения и направлено к центру окружности. Ускорение a равно $a = \omega^2 r$.

Пример. Маховик радиусом $r = 20$ см совершает 50 об · с⁻¹. Определить скорость точки на ободе маховика. Угловая скорость точки равна $\omega = 2\pi n = 2 \cdot 3,14 \cdot 50$ об · с⁻¹ = 314 рад/с. Линейная скорость будет $v = \omega r = 314$ рад · с⁻¹ 0,2 м = 62,8 м · с⁻¹.

Динамика. Опыт и наблюдения показывают, что причиной изменения движения тел является воздействие на них других тел. Без такого воздействия движение тела не может измениться и не может появиться ускорение. Явление, при котором тело сохраняет свою скорость или состояние покоя при компенсации внешних воздействий на тело, называют инерцией (законом инерции). Каждое тело обладает особым свойством, определяющим отношение его ускорения к ускорению того тела, с которым оно взаимодействует. Это свойство — инертность тела. Величиной инертности является масса. Более инертное тело имеет большую массу. Единица измерения массы — килограмм (кг).

Тело массой m_1 получит ускорение \vec{a}_1 , когда на него действует другое тело массой m_2 . Оно в свою очередь тоже получит ускорение \vec{a}_2 . Обычно вычисляют ускорение лишь одного тела, поэтому влияние другого тела, вызывающего ускорение, называют силой, действующей на ускоряемое тело. Так как ускорение — величина векторная, а вызывается оно силой, приложенной к телу, то и сила — величина векторная. Если обозначить силу, действующую на тело, через \vec{F} , ускорение тела через \vec{a} , а его массу через m , то можно записать

$$\vec{F} = m \vec{a}.$$

Эта формула выражает математически основной закон механики: сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение. Единицу силы называют ньютоном (Н).

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Взаимный характер действия первого тела на второе показывает закон равенства действия и противодействия: тела действуют друг на друга с силами, равными по абсолютному значению и противоположными по направлению.

При рассмотрении механического движения тел приходится иметь дело с тремя видами сил: с силой упругости, силой трения и силой тяжести.

Взаимодействие тел сопровождается изменением формы и объема тел, т. е. деформациями. Например, нить растягивается,

пружина сжимается, балка прогибается. Способность деформироваться является одним из основных свойств всех тел. При деформации тела внутри его возникают силы упругости. В зависимости от величины деформации и состояния тела после действия силы тела разделяются на жесткие, упругие (гибкие) и пластические. У жестких тел деформации очень малы. Деформации упругих тел возникают вследствие движения одних его частей относительно других. Сила упругости пропорциональна перемещению и определяется уравнением (закон Гука)

$$F = kx.$$

Коэффициент пропорциональности k называют коэффициентом жесткости, или жесткостью, а величину, обратную жесткости, — податливостью. После прекращения действия силы упругие тела восстанавливают свою первоначальную форму и объем. В отличие от упругих пластические тела не восстанавливают прежней формы.

Все тела независимо от их массы в данной точке Земли падают с одинаковым ускорением: Величина ускорения обозначается буквой g и приближенно равна $9,81 \text{ м/с}^2$. Сила притяжения тел к Земле вблизи ее поверхности равна mg и может считаться постоянной. Отсюда следует, что отношение масс тел равно отношению их весов. Используя в качестве одного тела гирь, производят взвешивание другого тела. Когда весы уравновешены, можно утверждать, что вес тела равен весу гирь. Но если равны веса тел, то равны и их массы.

Сила трения возникает при непосредственном соприкоснении тел и всегда направлена вдоль поверхности соприкоснения. Если тело находится в покое, то возникает сила трения покоя. При движении тела действует сила трения скольжения или трения качения.

Статика. Для практики важно знать условия, при которых тела находятся в состоянии равновесия. Всякое тело может находиться в состоянии покоя или двигаться поступательно, вращаться или поворачиваться вокруг какой-нибудь оси. Рассмотрим условия равновесия для этих видов движений.

Невращающееся тело будет находиться в равновесии, если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю. Если силы действуют одновременно и направлены по одной и той же прямой, то равнодействующая равна алгебраической сумме этих сил и направлена по той же прямой (рис. 1.2, a). Для того чтобы тело находилось в состоянии равновесия, если равнодействующая сила не равна нулю, к нему должна быть приложена добавочная сила, равная по модулю равнодействующей, но противоположная ей по направлению.

Равнодействующая двух сил, направленных под углом друг к другу, будет диагональю параллелограмма, построенного на этих силах. Силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 складываются геометрически по пра-

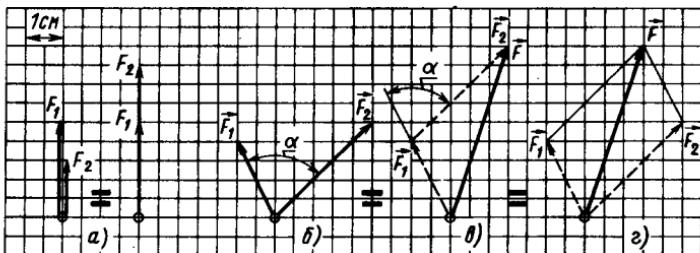


Рис. 1.2. Построения равнодействующей силы

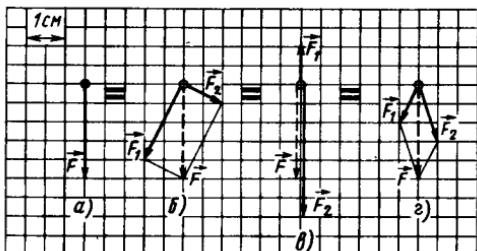


Рис. 1.3. Разложение силы на составляющие по заданным направлениям

вилу параллелограмма или треугольника. Равнодействующая $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Сложение двух сил, приложенных в разных точках тела, производят следующим образом. Переносят эти силы в точку пересечения направлений этих сил (рис. 1.2, б). Затем, считая, что расположенные таким образом силы образуют две стороны параллелограмма, достраивают параллелограмм и проводят диагональ из точки, где совмещены начала обоих векторов. Эта диагональ и есть равнодействующая сила \vec{F} (рис. 1.2, г).

Другой способ сложения двух сил состоит в том, что складываемые силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 располагают так, чтобы конец одной из них примыкал к началу другой. Сумма обеих сил — это вектор, направленный от начала первого вектора к концу второго (рис. 1.2, в).

Разложение силы F на составляющие F_1, F_2 по заданным направлениям показано на рис. 1.3, а—г.

Равновесие тела с закрепленной осью вращения основывается на равновесии рычагов. Условие равновесия рычага сводится к тому, что произведение силы на расстояние от точки приложения до оси вращения должно быть одинаково для обеих приложенных сил (рис. 1.4, а):

$$F_1 OA = F_2 OB.$$

Произведение силы на расстояние называют моментом силы.

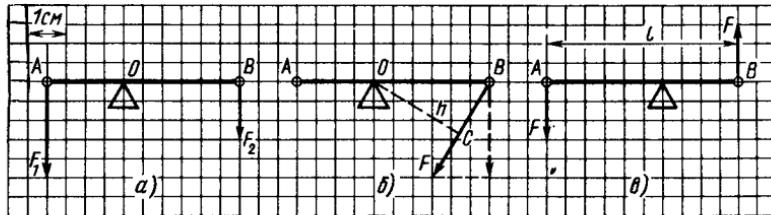


Рис. 1.4. Равновесие тела с закрепленной осью вращения

Момент силы положителен, если сила должна была бы вращать тело по часовой стрелке и наоборот.

Если сила не перпендикулярна к радиусу (рис. 1.4, б), то длину перпендикуляра OC , опущенного из оси на направление силы, называют плечом силы h . Таким образом, момент силы есть произведение величины силы на плечо, т. е.

$$M = Fh = FO\dot{C} = F_1OB.$$

При наличии многих сил моменты этих сил заменяют одним — результирующим моментом, который равен сумме составляющих моментов сил.

Вращение тела может возникнуть при наличии двух равных сил, противоположно направленных и не лежащих на одной прямой. Эти силы называют парой сил. Вращающий момент пары сил равен произведению одной из сил на расстояние между направлениями сил (рис. 1.4, в).

$$M = Fl.$$

Следовательно, тело, способное вращаться вокруг закрепленной оси, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов приложенных к нему сил относительно этой оси равна нулю.

За единицу измерения вращающего момента принимают момент силы в 1 Н, линия действия которого отстоит от оси вращения на 1 м. Эту единицу называют ньютон-метром ($\text{Н} \cdot \text{м}$).

Свободное тело находится в равновесии под действием трех параллельных сил в том случае, когда третья сила направлена в сторону, противоположную первым двум, ее величина равна их сумме и приложена в точке, делящей расстояние между точками их приложения в отношении, обратном отношению сил (рис. 1.5). Условие равновесия имеет вид

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2; F_2 : F_1 = OA : OB.$$

Точку приложения равнодействующей сил тяжести называют центром тяжести тела.

Любое тело можно разбить на отдельные малые частицы (массы). Распределение малых масс в объеме, занимаемом телом, определяет положение центра масс. Понятие о центре масс

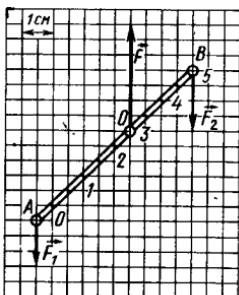


Рис. 1.5. Равновесие свободного тела

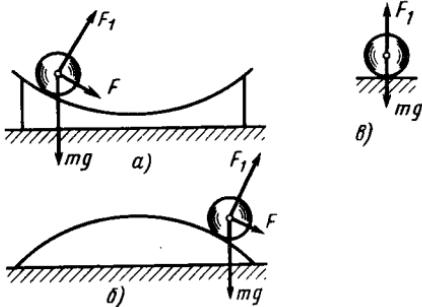


Рис. 1.6. Виды равновесия

является более общим, чем понятие о центре тяжести. Оно относится к любым телам и не связано с гравитационным взаимодействием. При наличии сил тяжести положения центра масс и центра тяжести тел совпадают.

Сформулируем общее условие равновесия тела: для того чтобы тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы были равны нуль равнодействующая приложенных к телу сил и сумма моментов этих сил относительно оси вращения.

Не всякое равновесие тела практически осуществимо. Существуют три вида равновесия: устойчивое (рис. 1.6, а), неустойчивое (рис. 1.6, б) и безразличное (рис. 1.6, в). Равновесие тела устойчиво, когда центр тяжести тела занимает наименее возможное положение. Тогда при отклонении в любую сторону от этого положения центр тяжести будет подниматься, а равнодействующая сила — возвращать тело обратно. В противном случае (см. рис. 1.6, б) равнодействующая сила удаляет тело от этого положения.

Механические колебания. Группу тел, движение которых изучают, называют в механике системой тел, или просто системой. Силы, действующие между телами системы называют внутренними силами. Внешними силами называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее.

Под действием внутренних сил после того, как система была выведена из положения равновесия, возникают свободные колебания. Примеры свободных колебаний — колебания груза, повешенного на нити или прикрепленного к пружине. Вынужденные колебания совершаются под действием внешних периодически изменяющихся сил.

Свободные колебания шарика (рис. 1.7) массой m вдоль горизонтали под действием пружины с жесткостью k относительно нейтрального положения (точка O) описываются уравнением

$$ma = -kx.$$

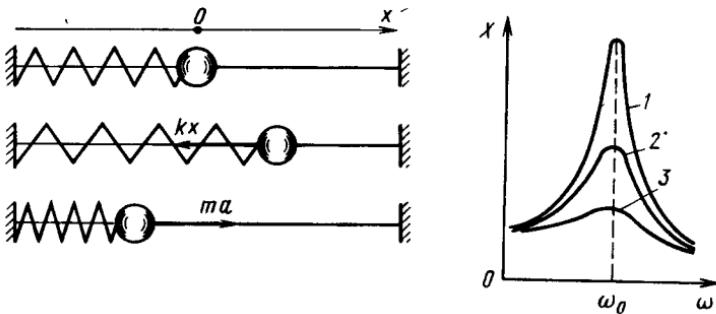


Рис. 1.7. Свободные колебания шарика под действием пружины

Рис. 1.8. Амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний с демпфированием:
1 – малое; 2 – среднее; 3 – большое

Разделив левую и правую части уравнения на m , получим
 $a = -kx/m$.

Постоянную величину $\sqrt{k/m}$, зависящую от свойств системы, обозначают через ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}$$

и называют собственной угловой скоростью тела на пружине. С течением времени, под действием сил трения, свободные колебания затухают.

Вынужденные колебания происходят с частотой действия внешней периодической силы. Амплитуда вынужденных колебаний со временем не изменяется. Колебания имеют установившийся характер. Если изменять частоту вынужденных колебаний, то при совпадении частоты внешней силы с частотой свободных колебаний резко возрастет амплитуда колебаний тела. Такое состояние называют резонансом. Существенное влияние на резонанс оказывает трение в системе. Чем меньше коэффициент трения или говорят "демпфирование", тем больше амплитуда вынужденных колебаний при резонансе. На рис. 1.8 резонансной кривой 1 соответствует малое, а кривой 3 – большое демпфирование.

Вращение тел. Вращение тела с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной оси можно рассматривать как движение тела, при котором две его точки A и B неподвижно закреплены (рис. 1.9), т. е. связаны с основанием. Связь, осуществляющая двумя неподвижными точками A и B , эквивалентна двум реакциям, приложенным в этих точках. Обозначим эти реакции через \vec{F}_A и \vec{F}_B .

В жестком теле центр масс сечения массой m_i , в общем случае, смещен относительно оси вращения на расстояние \vec{OC}

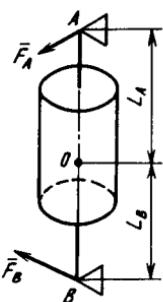


Рис. 1.9. Вращение тела вокруг неподвижной оси

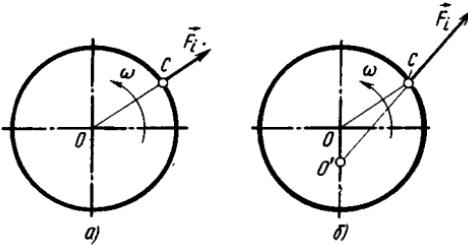


Рис. 1.10. Движение центра масс:
а – жесткое тело; б – упругое тело

(рис. 1.10, а). Точка C движется по окружности радиусом $\vec{r} = \vec{OC}$ с угловой скоростью ω и угловым ускорением $\vec{a} = \vec{r}\omega^2$. Считая массу m_i сосредоточенной в точке C , по основному закону динамики получим уравнение центробежной силы

$$\vec{F}_i = m_i\omega^2 \vec{OC}.$$

При вращении упругого тела с угловой скоростью ω возникнет изгиб оси AB (рис. 1.9). Центробежная сила в поперечном сечении упругого тела (рис. 1.10, б).

$$\vec{F}_i = m_i\omega^2 (\vec{OC} + \vec{O}O') = m_i\omega^2 \vec{OC}.$$

Расстояние OO' называют прогибом тела в i -м сечении.

Сила \vec{F}_i относительно центра масс тела O создает момент силы \vec{M}_i , равный произведению силы на расстояние от точки приложения силы до центра масс тела:

$$\vec{M}_i = \vec{F}_i l_i.$$

Равнодействующую всех сил, приложенную к центру масс тела, называют главным вектором сил (\vec{F}_Σ). Результирующий момент называют главным моментом сил (\vec{M}_Σ).

Условие равновесия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси с постоянной угловой скоростью, определяется следующими уравнениями:

$$\vec{F}_\Sigma = \vec{F}_A + \vec{F}_B; \quad \vec{M}_\Sigma = \vec{F}_A L_A + \vec{F}_B L_B.$$

В динамике твердого тела играют большую роль величины, характеризующие распределение масс в теле, которые носят названия моментов. Различают моменты первой, второй и более высоких степеней.

Момент первой степени называют статическим моментом. Статический момент S относительно центра O равен произведению массы тела на радиус-вектор центра масс \vec{r} :

$$\vec{S} = m\vec{r}.$$

Если центр O совпадает с центром масс, то статический момент обращается в нуль. Единица измерения статического момента — 1 кг · м.

Из моментов второй степени наиболее часто используют в практике осевые моменты инерции. Момент инерции обозначают буквой J с индексом, указывающим, относительно какой оси он определяется. Например, J_x — момент инерции относительно оси x . Единица измерения момента инерции — 1 кг · м².

Для тел вращения, симметричных относительно продольной оси OZ , момент инерции J_z называют аксиальным моментом инерции, а момент инерции J_x равен J_y — экваториальным моментом инерции.

Моменты инерции простых тел (цилиндр, стержень и т. п.) достаточно точно определяют расчетным путем. Например, аксиальный момент инерции диска $J_z = mR^2/2$, где m — масса диска, R — его радиус.

В каждом теле можно выделить три взаимно перпендикулярные оси, проходящие через центр масс, относительно которых осевые моменты инерции имеют наименьшие значения. Эти оси называют главными центральными осями инерции тела. Моменты инерции сложных тел находят опытным путем.

Если ось вращения является главной центральной осью инерции тела, то отсутствует динамическое давление на ось вращения и реакции $F_A = F_B = 0$. В этом случае говорят, что вращающееся тело уравновешено.

Свободное тело совершает вращательное движение вокруг одной из главных центральных осей инерции.

При вращении неуравновешенного тела возможны три случая: 1. Центр масс тела не лежит на оси вращения, но ось вращения — главная ось. Динамические реакции представляют собой параллельные силы \vec{F}_A и \vec{F}_B , уравновешивающиеся с главным вектором сил, который можно представить в виде

$$\vec{F}_{\Sigma} = m\omega^2 \vec{OC},$$

здесь m — масса тела; \vec{OC} — радиус-вектор центра массы, значение которого равно расстоянию от оси вращения AB до центра масс.

2. Центр масс тела лежит на оси вращения, но ось вращения не является главной осью и составляет с этой осью вектор-угол θ . Динамические реакции приводятся к паре сил $F_A = -F_B$ и уравновешиваются с главным моментом сил. Главный момент сил определяется уравнением

$$\vec{M}_{\Sigma} = \frac{1}{2} (J_x - J_z) \omega^2 \sin 2\theta \vec{r}.$$

3. В общем случае реакции опор A и B приводятся к главному вектору и паре сил.

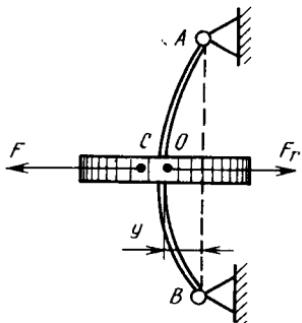


Рис. 1.11. Прогиб вала с диском под действием силы F

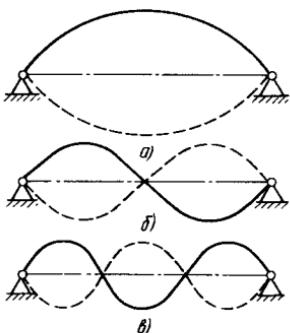


Рис. 1.12. Собственные формы изгиба вала:
а – первая; б – вторая; в – третья

Определение и устранение радиуса-вектора OC и вектора-угла θ составляет задачу уравновешивания твердых тел вращения.

Динамику упругого тела рассмотрим на простом примере. Тонкий вал с диском массой m , расположенным посередине вала между опорами A и B (рис. 1.11), вращается с постоянной угловой скоростью ω . Под действием центробежной силы $F = m\omega^2(OC + y)$ вал прогибается на величину y . Возникнет сила упругости F_r , пропорциональная величине деформации y : $F_r = ky$. Сила F_r , направлена от центра диска O в сторону прямой AB . Диск и вал действуют друг на друга с силами, равными по абсолютному значению и противоположными по направлению, следовательно,

$$m\omega^2(OC + y) = ky.$$

Отсюда находим прогиб вала в сечении диска:

$$y = m\omega^2 OC / (k - m\omega^2).$$

Угловую скорость, при которой знаменатель обращается в нуль, а прогиб делается бесконечно большим, называют критической угловой скоростью и обозначают ω_{kp} :

$$\omega_{kp} = \sqrt{k/m}.$$

Критическая угловая скорость вращения совпадает с круговой частотой собственных колебаний вала с диском, т. е. $\omega_{kp} = \omega_0$. Форма изгиба вала на критической скорости соответствует форме изгиба при резонансе.

В общем случае упругие тела имеют несколько критических угловых скоростей вращения. Каждая критическая скорость имеет свою собственную форму изгиба. Собственная форма может быть первой, второй, ... n -й (рис. 1.12).

При вращении упругих тел вокруг неподвижной оси возни-

кают значительные реакции опор и прогибы вала, превышающие реакции аналогичного жесткого тела.

Определение и устранение реакций опор и прогибов вала составляют задачу уравновешивания упругих тел вращения.

1.2. НЕУРАВНОВЕШЕННОСТЬ И ДИСБАЛАНС

В балансировочной технике все тела, которые при вращении удерживаются своими несущими поверхностями в опорах, называют *роторами*.

Под несущими поверхностями имеют в виду поверхности цапф или заменяющие их поверхности. Прямую, соединяющую центры цапф, называют *осью ротора*, или *геометрической осью*. Несущие поверхности ротора передают нагрузки на опоры через подшипники качения или скольжения. В технике используют подшипники скольжения с твердой, жидкой, консистентной и другими видами смазок, а также шариковые и роликовые подшипники, в которых имеет место в основном трение качения.

Подшипники скольжения состоят из вкладыша и корпуса, который опирается на фундамент или корпус машины. Подшипники качения устанавливают в подшипниковом узле, а сам узел закрепляют на фундаментной стойке или в корпусе машины. Роторы опираются на две, три и более опор.

В зависимости от соотношения между максимальной эксплуатационной частотой вращения и критической частотой, значения прогибов ротора на рабочих частотах роторы делят на классы: *жесткие, квазигибкие и гибкие*.

У жестких роторов эксплуатационная частота вращения намного ниже критической частоты, а изгиб оси незначительный. Гибкие и квазигибкие роторы работают вблизи критических частот и имеют на рабочей частоте вращения существенные деформации. Деформации возникают как от действия центробежных сил и моментов, так и от сил тяжести. Такие роторы теряют свойства жестких тел — становятся упругодеформируемыми.

По характеру распределения масс роторы делят на *межопорные* (рис. 1.13, а), *консольные* (рис. 1.13, б) и *двухконсольные* (рис. 1.13, в).

Неуравновешенность. Изготовление цапф, деталей ротора и сборка ротора всегда выполняются с погрешностями относительно геометрической оси. В общем случае центры масс деталей не лежат на этой оси, главная центральная ось инерции не совпадает с осью ротора. В жестких опорах ротор вращается вокруг своей геометрической оси. Возникают динамические нагрузки на опорах и изгиб ротора. Такое состояние ротора называют *неуравновешенностью ротора*.

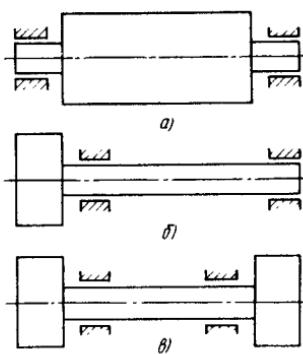


Рис. 1.13. Типы роторов

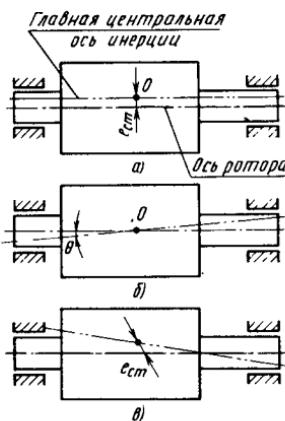


Рис. 1.14. Виды неуравновешенности роторов

Неуравновешенность жесткого ротора бывает *статическая, моментная, динамическая и квазистатическая*.

Статическая неуравновешенность (рис. 1.14, а) определяется параллельным смещением оси ротора относительно его главной центральной оси инерции. Центр масс ротора отстоит от оси на расстоянии $e_{ст}$. Этот радиус-вектор называют *экскентризитетом массы* ротора. Экскентризитет принято измерять в микрометрах (мкм).

Моментная неуравновешенность будет при пересечении осей в центре масс ротора (рис. 1.14, б). Пересекающиеся оси образуют вектор-угол θ . Значение угла θ для неуравновешенных роторов не превышает 1° . Направление вектора-угла определяет плоскость, в которой лежат пересекающиеся оси. Для векторов малых углов с достаточной точностью можно применять правила векторной алгебры (сложение векторов, умножение вектора на скаляр и т. п.).

Динамическая неуравновешенность возникает, когда ось ротора и его главная центральная ось инерции перекрещиваются (рис. 1.14, в).

Пересечение осей не в центре масс образует квазистатическую неуравновешенность.

Состояние гибкого ротора, характеризующееся таким расположением масс, которое во время вращения вызывает деформации ротора, характерные для n -й собственной формы, называют *неуравновешенностью по n -й форме изгиба*.

Дисбаланс. При вращении неуравновешенного ротора с постоянной угловой скоростью ω в каждом поперечном сечении массой m_i возникает центробежная сила

$$\vec{F}_i = m_i \vec{e}_i \omega^2.$$

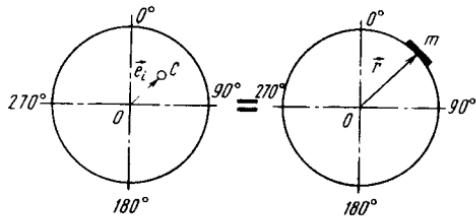


Рис. 1.15. Движение центра масс неуравновешенного ротора

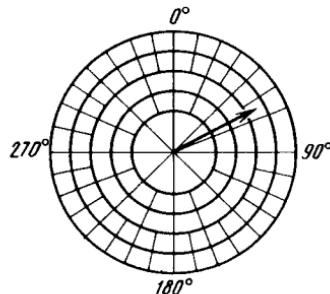


Рис. 1.16. Вектор дисбаланса в полярных координатах

Рассматриваемой массой может являться масса ротора или любая другая локально расположенная масса m , находящаяся на расстоянии r от оси вращения (рис. 1.15).

Все роторы с равными произведениями $m_i e_i$ (или $m \vec{r}$) при одинаковой угловой скорости вращения имеют одинаковую центробежную силу, а выражение

$$m \vec{r} = \vec{D}$$

называют *дисбалансом*. Единицей дисбаланса служит грамм-миллиметр ($\text{г} \cdot \text{мм}$).

Пример. Определить дисбаланс и центробежную силу шлифовального круга массой 10 кг и эксцентриситетом 0,1 мм при 3000 об/мин. Дисбаланс

$$D = me = 10 \cdot 1000 \text{ г} \cdot 0,1 \text{ мм} = 1000 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

Центробежная сила

$$F = me\omega^2 = 10 \text{ кг} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \left(\frac{3000}{9,55} \right)^2 \frac{1}{c^2} \approx 100 \text{ Н.}$$

Как всякий вектор, дисбаланс определяется числовым значением и углом, определяющим положение вектора дисбаланса в системе координат, связанной с ротором. Угол дисбаланса обозначают буквой φ . Для наблюдателя центробежная сила и дисбаланс врачаются. Для ротора они неподвижны и являются для него статической нагрузкой. Это сводит проблему к решению задач статики.

Дисбаланс изображают как вектор в полярных координатах (рис. 1.16). Координатную систему можно представить как проекцию полярных координат на торце ротора. Центр находится на оси вращения (геометрической оси). Нуевую точку угловой системы координат выбирают произвольно. Длина вектора пропорциональна значению дисбаланса, а угол — направлению.

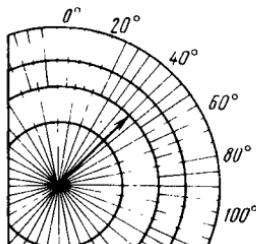


Рис. 1.17. Векторы дисбаланса 3000 г·мм под углом 45°

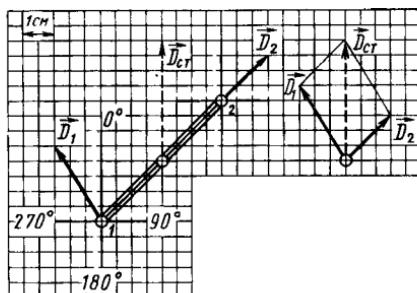


Рис. 1.18. Пример построения главного вектора дисбалансов ротора

Пример. Построить вектор дисбаланса шлифовального круга массой 10 кг и эксцентриситетом 0,3 мм, направленный под углом 45°. Значение дисбаланса

$$D = me = 10 \cdot 1000 \text{ г} \cdot \text{мм} = 3000 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

Угол дисбаланса равен 45°. Примем масштаб: 1000 г · мм в 1 см. Длина вектора дисбаланса равна

$$3000 \text{ г} \cdot \text{мм} / 1000 \text{ г} \cdot \text{мм/см} = 3 \text{ см.}$$

В полярных координатах отложим отрезок длиной 3 см под углом 45° и получим вектор дисбаланса (рис. 1.17).

В плоскости, в которой задают или измеряют значение и угол дисбаланса, дисбаланс можно раскладывать на составляющие по выбранным направлениям или находить результирующее значение, если в этой плоскости находится несколько неуравновешенных масс.

Сумму всех векторов дисбалансов, расположенных в различных плоскостях, перпендикулярных оси ротора, называют **главным вектором дисбалансов** и обозначают \vec{D}_{ct} . Главный вектор дисбалансов ротора

$$\vec{D}_{ct} = \vec{D}_1 + \vec{D}_2 + \dots + \vec{D}_n.$$

Вектор \vec{D}_{ct} перпендикулярен оси ротора, проходит через его центр масс и равен произведению массы ротора m_0 на ее эксцентриситет e_{ct} , т. е.

$$\vec{D}_{ct} = m_0 \vec{e}_{ct}$$

Отношение модуля главного вектора к массе ротора называют **удельным дисбалансом** (e_{ct}). Единица измерения удельного дисбаланса — грамм-миллиметр на килограмм ($\text{г} \cdot \text{мм}/\text{кг}$). Главный вектор дисбалансов полностью определяет статическую неуравновешенность жесткого ротора.

Пример построения главного вектора дисбалансов ротора, имеющего дисбалансы в плоскостях 1 и 2, приведен на рис. 1.18.

Дисбаланс в плоскости 1 равен $540 \text{ г} \cdot \text{мм}$ и направлен под углом 330° . Дисбаланс в плоскости 2 равен $340 \text{ г} \cdot \text{мм}$ и направлен под углом 45° . Построение $\vec{D}_{\text{ст}}$ выполнено по правилу параллелограмма в масштабе $-200 \text{ г} \cdot \text{мм}$ в 1 см. За нулевую точку угловой системы координат принята верхняя точка. В результате получено значение $D_{\text{ст}} = 700 \text{ г} \cdot \text{мм}$ и угол $\varphi_{\text{ст}} = 0^\circ$.

Главный вектор дисбалансов по правилам статики можно разложить на два параллельных вектора, лежащих в параллельных плоскостях, перпендикулярных оси ротора, т. е. заменить его составляющими $\vec{D}_{\text{ст}1}$ и $\vec{D}_{\text{ст}2}$, которые находятся по формулам:

$$\vec{D}_{\text{ст}1} = \frac{l_2}{l} \vec{D}_{\text{ст}}, \quad \vec{D}_{\text{ст}2} = \frac{l_1}{l} \vec{D}_{\text{ст}},$$

здесь l_1 и l_2 — расстояние от центра масс до плоскостей 1 и 2, в которые разлагается $\vec{D}_{\text{ст}}$, а l — расстояние между этими плоскостями.

Геометрическую сумму моментов всех дисбалансов ротора относительно его центра масс называют **главным моментом дисбалансов** и обозначают \vec{M}_D . Главный момент дисбалансов ротора

$$\vec{M}_D = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \dots + \vec{M}_n.$$

Вектор \vec{M}_D перпендикулярен оси ротора, проходит через его центр масс и равен центробежному моменту инерции жесткого ротора, т. е.

$$\vec{M}_D = \frac{1}{2} (J_x - J_z) \sin 2\theta.$$

Единица измерения главного момента дисбалансов — грамм-миллиметр в квадрате ($\text{г} \cdot \text{мм}^2$).

Главный момент дисбалансов полностью определяет моментную неуравновешенность жесткого ротора.

В качестве примера построим главный момент дисбалансов ротора, изображенного на рис. 1.18. Длина ротора 800 мм. По правилам статики момент дисбаланса равен произведению дисбаланса на расстояние от точки приложения дисбаланса до центра масс. Момент $M_1 = D_1 l_1 = 540 \text{ г} \cdot \text{мм} \cdot 400 \text{ мм} = 216 \times 10^3 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$ положителен, перпендикулярен плоскости, проходящей через ось ротора и вектор \vec{D}_1 , и направлен под углом 240° . Момент $M_2 = D_2 l_2 = 340 \text{ г} \cdot \text{мм} \cdot 400 \text{ мм} = 136 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$ отрицателен, перпендикулярен плоскости, проходящей через ось ротора и вектор \vec{D}_2 , и направлен под углом 135° . Построение главного момента дисбалансов выполнено по правилу тре-

Рис. 1.19. Пример построения главного момента дисбалансов ротора

угольника в масштабе $50 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$ в 1 см (рис. 1.19). В результате получено значение $M_D = 220 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$ и угол $\varphi_M = 204^\circ$.

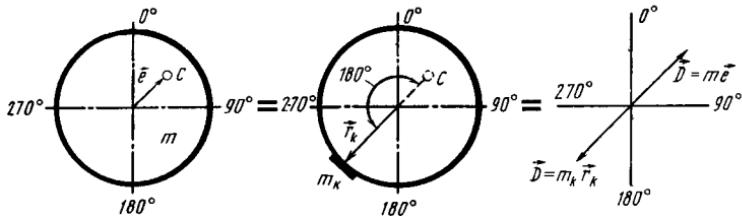
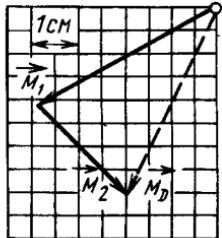


Рис. 1.20. Корректировка масс

Главный момент дисбалансов ротора может быть заменен моментом пары равных по значению антипараллельных дисбалансов D_M , расположенных в двух произвольных плоскостях, перпендикулярных оси ротора. Момент пары равен произведению одного из дисбалансов указанной пары на плечо этой пары:

$$M_D = D_M l.$$

Вектор D_M перпендикулярен плоскости, проходящей через ось ротора и вектор M_D .

В практике трудоемкие и малоточные графические построения заменяют расчетом на аналоговых или электронно-вычислительных машинах.

Для уменьшения дисбалансов ротора производят корректировку масс. Например, на линии действия дисбаланса на радиусе r_k под углом 180° к дисбалансу (рис. 1.20) устанавливают такую корректирующую массу m_k , чтобы произведение этой массы на радиус ее постановки было равно значению дисбаланса, т. е.

$$D = m_k r_k.$$

Корректировку масс проводят в одной или нескольких точках одной плоскости коррекции либо в нескольких параллельных плоскостях коррекции одновременно или последовательно

в каждой плоскости. Корректировку масс осуществляют удалением, добавлением или перемещением масс ротора.

Пример. Дисбаланс неуравновешенного ротора в плоскости коррекции составляет 1500 г · мм.

Определить значение корректирующей массы при $r_k = 200$ мм. Значение корректирующей массы определяем по формуле

$$m_k = \frac{D}{r_k} = \frac{1500 \text{ г} \cdot \text{мм}}{200 \text{ мм}} = 7,5 \text{ г.}$$

Дисбалансы ротора до корректировки масс называют начальными дисбалансами, а дисбалансы, которые остаются после корректировки масс, называют остаточными дисбалансами ротора.

При сборке ротора из деталей (шкивов, подшипников, вентиляторов и т. п.), которые имеют собственные дисбалансы из-за биений посадочных поверхностей, радиальных зазоров и других причин, возникают технологические дисбалансы. Например, при монтаже на сбалансированный вал шкива массой 3 кг с зазором в посадке 0,03 мм возникает технологический дисбаланс $D_t = 3 \cdot 1000 \text{ г} \cdot 0,015 \text{ мм} = 45 \text{ г} \cdot \text{мм}$.

Во время эксплуатации машины возникают эксплуатационные дисбалансы. Эти дисбалансы обусловлены упругими и пластическими деформациями ротора, износом деталей, действием гидродинамических, газовых или электромагнитных сил на ротор и другими причинами. Наиболее интенсивное увеличение дисбалансов происходит в процессе приработки машины и в конце технического ресурса ротора.

Сумму остаточных, технологических и эксплуатационных дисбалансов в плоскостях коррекции ротора в конце технического ресурса машины или перед ее капитальным ремонтом называют функциональными дисбалансами. Значение функциональных дисбалансов, при которых не нарушается работоспособность изделия, устанавливают при проектировании и доводке вновь разрабатываемых изделий.

Балансировка. Процесс определения значений и углов дисбалансов ротора и уменьшения их корректировкой масс называют балансировкой ротора. Балансировка бывает статическая, моментная и динамическая.

При статической балансировке определяют и уменьшают главный вектор дисбалансов обычно в одной плоскости коррекции, проходящей через центр масс. Статическую неуравновешенность можно определить без вращения детали с помощью сил тяжести. Моментная балансировка уменьшает главный момент дисбалансов ротора. Она требует вращения детали и обязательно двух плоскостей коррекции. Динамическую неуравновешенность устраняют динамической балансировкой в двух плоскостях коррекции на низких или высоких частотах вращения.

Жесткий ротор можно полностью сбалансировать в двух

произвольных плоскостях коррекции на любой частоте вращения.

Квазигибкие роторы балансируют на низких частотах вращения, значительно меньше эксплуатационных. На такой частоте балансируемый ротор еще можно рассматривать как жесткий.

Низкочастотную балансировку проводят обычно более чем в двух плоскостях коррекции.

Гибкие роторы балансируют на высоких частотах вращения, при которых ротор становится упругодеформируемым. Выбор частот вращения для балансировки, количества плоскостей коррекции зависит от многих факторов, в числе которых в первую очередь — наличие критических скоростей в рабочем диапазоне частот вращения.

Балансировке подвергают детали, роторы, роторы в собственных подшипниках и опорах, роторы в сборе на месте установки.

1.3. ТОЧНОСТЬ БАЛАНСИРОВКИ

Основным источником вибраций машин является неуравновешенность роторов. Кроме дисбалансов вибрации могут вызывать: а) подшипники качения; б) несоосность соединяемых роторов; в) процессы горения, движения жидкости и газа, электромагнитные явления, происходящие в работающей машине, и другие причины.

С целью обеспечения высокого технического ресурса, надежности, уменьшения шума и вибраций устанавливают предельно допустимые вибрации для машин и механизмов различных классов. Например, допустимое эффективное значение виброскорости электродвигателя мощностью до 15 кВт составляет $1,12 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, а стационарной газовой турбины равно $4,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$.

Уровни вибраций машин в эксплуатационных условиях служат критерием сбалансированности роторов. Чем ниже вибрации машины, тем выше точность балансировки роторов.

Точность балансировки жестких роторов. Точность балансировки жестких роторов характеризуется произведением удельного дисбаланса на наибольшую частоту вращения ротора в эксплуатационных условиях. Весь диапазон точности балансировки ГОСТ 22061—76 "Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения" разделяет на 11 классов точности (таб. 1.1). Расположение полей классов точности балансировки показано на рис. 1.21, где границы классов показаны сплошными линиями. По оси ординат отложены значения удельного дисбаланса в $\text{г} \cdot \text{мм}/\text{кг}$ (e_{ct} в $\mu\text{мм}$). По оси абсцисс отложены значения максимальной эксплуатационной частоты вращения ротора в $\text{об} \cdot \text{мин}^{-1}$ ($\text{об} \cdot \text{с}^{-1}$).

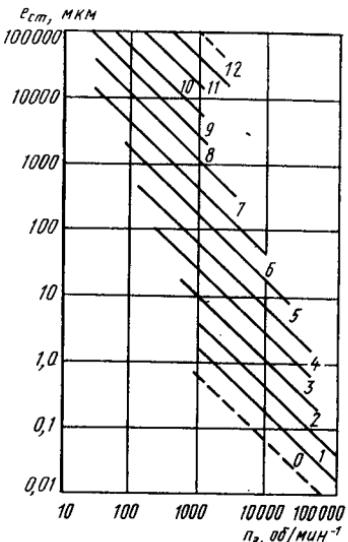


Рис. 1.21. Расположение полей классов точности балансировки для жестких роторов изделий

Стандарт устанавливает верхнее и нижнее значения главного вектора допустимых дисбалансов. Расчет значений главного вектора допустимых дисбалансов проводят по формулам:

$$D_{\text{стдоп}} = m_0 e_{\text{сттабл}} - D_{\text{стэ}}$$

для ротора, балансируемого в изделии в сборе с учетом эксплуатационного дисбаланса $D_{\text{стэ}}$;

$$D_{\text{стдоп}} = m_0 e_{\text{сттабл}} - D_{\text{стт}} - D_{\text{стэ}}$$

для ротора, балансируемого в виде отдельной детали с учетом технологического $D_{\text{стт}}$ и эксплуатационного $D_{\text{стэ}}$ дисбалансов.

Табличное значение удельного дисбаланса $e_{\text{сттабл}}$ определяют для данного собранного изделия по верхней и нижней границе установленного класса точности балансировки и максимальной эксплуатационной частоте вращения его ротора.

Значения главных векторов технологических и эксплуатационных дисбалансов определяют при исследовательских, предварительных и ресурсных испытаниях опытных образцов и опытных серий изделий.

При проектировании изделия класс точности для него выбирают предварительно. После экспериментальных исследований

Таблица 1.1
Система классов точности балансировки

Класс точности балансировки	Значение произведения удельного дисбаланса ($e_{\text{ст}}$) на максимальную эксплуатационную угловую скорость вращения ($\omega_{\text{эмакс}}$)		
	$e_{\text{ст}} \omega_{\text{эмакс}}, \text{мм} \cdot \text{с}$	наименьшее	наибольшее
1	0,16	0,40	
2	0,40	1,00	
3	1,00	2,50	
4	2,50	6,30	
5	6,30	16,00	
6	16,00	40,00	
7	40,00	100,00	
8	100,00	250,00	
9	250,00	630,00	
10	630,00	1600,00	
11	1600,00	4000,00	

опытных образцов устанавливают окончательно класс точности балансировки, при котором не нарушается работоспособность изделия.

Роторы изделий, отнесенные к 1-му классу точности балансировки, следует балансировать в своих подшипниках в собственном корпусе при соблюдении всех условий эксплуатации. Балансировка по 2-му классу точности допускает применение специального привода. А роторы изделий, отнесенных к 3–11-му классам точности балансировки, разрешается балансировать в виде деталей или сборочных единиц.

В системе классов точности балансировки предусмотрено, что основное действие на опоры ротора оказывает статическая неуравновешенность. Однако для некоторых типов роторов (например, абразивный круг) большие усилия на опоры создает моментная неуравновешенность. Для таких роторов проводят статическую и моментную балансировку.

Значение главного момента допустимых дисбалансов можно установить по формуле

$$M_{D \text{ доп}} = D_{\text{ст доп}} L_A,$$

где L_A — расстояние от центра масс ротора до ближайшей опоры A .

Моментную и динамическую балансировку роторов проводят в двух плоскостях коррекции. Значения допустимых дисбалансов в каждой из двух плоскостей коррекции 1 и 2 рассчитывают по правилам статики, заменяя $D_{\text{ст доп}}$ или $M_{D \text{ доп}}$ составляющими D_1 и D_2 , лежащими в заданных плоскостях коррекции.

Произведем расчет допустимых дисбалансов ротора. Ротор изделия имеет массу $m_0 = 500$ кг, максимальную эксплуатационную частоту вращения $n_{\text{эмакс}} = 50$ об · с⁻¹. Технологические дисбалансы составляют $D_{\text{стт}} = 5250$ г · мм, эксплуатационные дисбалансы за технический ресурс могут достигать 20% от табличного удельного дисбаланса.

Расстояние от опоры A до центра масс $L_A = 300$ мм, до плоскостей коррекции 1 и 2 $l_1 = 100$ мм, $l_2 = 700$ мм. Класс точности балансировки 4-й.

1. По рис. 1.21 для 4-го класса точности балансировки находим табличный допустимый удельный дисбаланс

$$e_{\text{сттабл}} = 20 \text{ мкм} = 0,02 \text{ мм.}$$

2. Ротор будем балансировать как отдельную деталь.

Для этого случая применима формула

$$D_{\text{ст доп}} = m_0 e_{\text{сттабл}} - D_{\text{стт}} - D_{\text{стэ}}.$$

Определим слагаемые этой формулы:

$$m_0 e_{\text{сттабл}} = 500 \cdot 10^3 \cdot 0,02 = 10 \cdot 10^3 \text{ г · мм};$$

$$D_{\text{стэ}} = 0,2m_0e_{\text{стабл}} = 0,2 \cdot 10 \cdot 10^3 = 2000 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

Следовательно,

$$D_{\text{стдоп}} = 10 \cdot 10^3 - 5250 - 2000 = 2750 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

3. Верхнее значение допустимых дисбалансов в плоскостях коррекции находим по формулам:

$$D_{1 \text{ допверхн}} = D_{\text{стдоп}} \frac{l_2 - L_A}{l_2 - l_1} = 2750 \frac{700 - 300}{700 - 100} = 1833 \text{ г} \cdot \text{мм};$$

$$D_{2 \text{ допверхн}} = D_{\text{стдоп}} \frac{L_A - l_1}{l_2 - l_1} = 2750 \frac{300 - 100}{700 - 100} = 917 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

Нижние значения допустимых дисбалансов в плоскостях коррекции меньше верхних значений в 2,5 раза, т. е.

$$D_{1 \text{ допнижн}} = D_{1 \text{ допверхн}} / 2,5 = 1833 / 2,5 = 733 \text{ г} \cdot \text{мм};$$

$$D_{2 \text{ допнижн}} = D_{2 \text{ допверхн}} / 2,5 = 917 / 2,5 = 367 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

Оценка качества балансировки гибких роторов. Целью балансировки гибких роторов является достижение такого значения составляющих вибраций с частотой, равной частоте вращения ротора, при которых вибрации каждой из опор подшипников агрегата при его работе на холостом ходу будут удовлетворять действующим нормативам.

Балансировка гибких роторов существенно отличается от балансировки жестких роторов. Если при балансировке жестких роторов ставится задача устранения динамических реакций на опорах, то при балансировке гибких роторов требуется дополнительно устраниить динамический прогиб ротора.

Балансировочный критерий, определяющий предельно допустимое значение выброскорости опор балансировочного станка в рабочем диапазоне частот вращения ротора v_6 , находим по формуле

$$v_6 = c_0 c_1 c_2 c_3 v_{\text{э}}.$$

Значения коэффициентов c_0, c_1, c_2, c_3 устанавливают на основании статических данных и результатов специальных вибрационных исследований на стендах и на месте установки для каждого типа ротора. Допустимое среднее квадратическое значение выброскорости опор агрегата при его эксплуатации $v_{\text{э}}$ устанавливается стандартами.

Пример. Рабочая частота вращения ротора турбины составляет $50 \text{ об} \cdot \text{с}^{-1}$. Допустимая выброскорость на месте установки $v_{\text{э}} = 2,8 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$. Места измерения вибраций — опоры станка. Поправочные коэффициенты: $c_0 = 0,64; c_1 = 0,7;$

для опор $c_2 = c_3 = 1$. Найти балансировочный критерий. Балансировочный критерий будет $v_6 = 0,64 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,8 = 1,26 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$.

При оценке допустимых дисбалансов в заданных плоскостях коррекции гибких роторов вводят понятие *эквивалентного жесткого ротора*. Эквивалентный жесткий ротор — ротор той же массы, размеров, частоты вращения и классов точности балансировки, что и жесткий ротор. Жесткость эквивалентного жесткого ротора вдвое больше жесткости подшипника, а первая критическая скорость в 1,25 раза выше рабочей скорости.

Допустимое значение дисбаланса по *n*-й форме изгиба выражается в процентах от допустимого дисбаланса, рекомендованного для эквивалентного жесткого ротора по ГОСТ 22061—76. Для роторов с неуравновешенностью по 1-й форме изгиба допустимый дисбаланс не должен превышать 60%. Для роторов с неуравновешенностью по 1-й и 2-й формам допустимый дисбаланс не должен превышать следующих пределов:

допустимое значение дисбаланса по 1-й форме изгиба не более 100%;

допустимое значение дисбаланса по 2-й форме изгиба не более 60%.

Приведенные значения допустимых дисбалансов в плоскостях коррекции гибких роторов относятся к диапазону рабочих частот вращения, отстроенному от любой критической частоты вращения на $\pm 10\%$.

Допустимые дисбалансы квазигибких роторов. Квазигибкие роторы являются упругодеформируемыми телами, но могут быть сбалансированы методами балансировки жестких роторов, если начальные дисбалансы роторов в сборе не превышают определенных пределов; в других случаях требуется высокочастотная балансировка.

Для роторов с известным распределением дисбаланса: в одном, двух или нескольких поперечных сечениях — допустимый дисбаланс не должен превышать допустимого дисбаланса эквивалентного жесткого ротора в соответствии с ГОСТ 22061—76.

Для роторов с неизвестным распределением дисбаланса дополнительно нормируют дисбалансы каждой детали и начальный дисбаланс ротора в сборе. Допустимый дисбаланс каждой детали не должен превышать меньшего из следующих параметров:

допустимого начального дисбаланса ротора в сборе, деленного на утроенное значение количества деталей (составных элементов);

допустимого дисбаланса собранного ротора, например, если ротор компрессора состоит из 6 дисков, а допустимый дисбаланс ротора в каждой из двух плоскостей коррекции не более 100 г · мм, то начальный дисбаланс собранного ротора в плоскости коррекции не должен превышать 1800 г · мм и допустимый дисбаланс каждого диска — 100 г · мм.

1.4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА БАЛАНСИРОВКИ

Методы балансировки. Методы балансировки классифицируют по ряду признаков:

по назначению — балансировка деталей, жестких, квазигибких и гибких роторов в сборе, роторов на месте установки;

по частоте вращения ротора при балансировке — без вращения детали, низкочастотная и высокочастотная балансировка;

по числу плоскостей коррекции — одно, двух- и многоплоскостная балансировка;

по измеряемому параметру при балансировке — с измерением амплитуды, фазы, амплитуды и фазы перемещения, виброскорости, виброускорения, усилия в опорах, напряжений в роторе;

по числу измеряемых параметров при балансировке — один, два, более двух параметров;

по способу корректировки масс — добавлением, уменьшением или перемещением корректирующих масс;

по способу нахождения зависимости дисбалансов в плоскостях коррекции от измеряемых параметров — экспериментальный (метод пробных пусков), расчетный, экспериментально-расчетный.

К методам балансировки деталей относится статическая балансировка без вращения детали и динамическая низкочастотная балансировка в одной или двух плоскостях коррекции.

Основными методами балансировки жестких роторов в сборе являются методы низкочастотной динамической балансировки в одной или двух плоскостях коррекции. При этом на постоянной частоте вращения в диапазоне от $7,5 \text{ c}^{-1}$ до 60 c^{-1} измеряют амплитуды и фазы виброскорости или усилия в двух опорах ротора. Зависимости дисбалансов в плоскостях коррекции от измеряемых параметров устанавливают методом пробных пусков или путем предварительного расчета.

Методы низкочастотной балансировки квазигибких роторов отличаются от методов низкочастотной балансировки жестких роторов тем, что дисбалансы в плоскостях коррекции устанавливают по определенному закону. Для роторов с известным распределением дисбалансов применяют методы балансировки по главному вектору и главному моменту. При этом используют две или три плоскости коррекции. Роторы с неизвестным распределением дисбалансов балансируют во многих плоскостях коррекции, распределяя корректирующие массы по длине ротора пропорционально смещению оси ротора относительно главной центральной оси инерции или другому закону.

Методы балансировки гибких роторов требуют высокой частоты вращения, многих плоскостей коррекции и измерения перемещений ротора в нескольких сечениях и вибраций опор. Зависимости дисбалансов в плоскостях коррекции находят экс-

периментальным и экспериментально-расчетным способами.

Для достижения 1-го и 2-го классов точности балансировки жестких и квазигибких роторов применяют метод высокочастотной балансировки роторов на месте установки. Как правило, балансировку проводят в одной или двух плоскостях коррекции методом пробных пусков по измерениям амплитуд вибраций корпуса или опорных стоек. Высокочастотную балансировку гибких роторов на месте установки выполняют экспериментально-расчетными методами.

Совершенство метода балансировки определяется значением достижимого остаточного дисбаланса в плоскости коррекции, коэффициентом уменьшения дисбаланса за одну корректировку масс и продолжительностью балансировки.

Выбор метода балансировки зависит от технических требований на балансировку, организационных и экономических условий данного производства. Метод балансировки выбирают на стадии проектирования ротора, доводочных испытаниях и технологической подготовки производства.

Средства балансировки. Средства балансировки разделяют на:

технологоческое оборудование (в том числе контрольное и испытательное);

технологоческую оснастку (в том числе инструменты и средства контроля);

средства механизации и автоматизации производственных процессов.

К технологоческому оборудованию для реализации процесса балансировки относят: балансировочные и металлорежущие станки и другое оборудование.

Балансировочный станок — станок, с помощью которого определяют и уменьшают дисбалансы ротора, их классифицируют по следующим признакам:

по назначению — для статической и динамической балансировки;

по режиму работы — дорезонансные, зарезонансные и резонансные;

по виду привода вращения балансируемого ротора — с приводным валом, приводным ремнем, собственным приводом изделия;

по оснащенности средствами корректировки масс — снабженные средствами корректировки масс, измерительные;

по уровню автоматизации — с ручным управлением, полуавтоматы, автоматы и автоматические линии станков;

по паспортному порогу чувствительности — нормальной и повышенной точности.

На станке для статической балансировки можно определить главный вектор дисбалансов ротора: 1) при помощи силы тяжести на невращающемся роторе; 2) на вращающемся роторе.

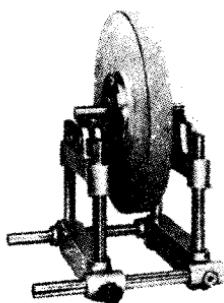


Рис. 1.22. Внешний вид станка для статической балансировки с помощью силы тяжести



Рис. 1.23. Внешний вид станка для статической балансировки в динамическом режиме

ре (в динамическом режиме). На станках первого типа ось неуравновешенного ротора под действием сил тяжести перемещается относительно неподвижной точки, оси и т. п. или ротор поворачивается вокруг своей оси (рис. 1.22). Станки для статической балансировки в динамическом режиме аналогичны станкам для динамической балансировки (рис. 1.23).

На станках для динамической балансировки неуравновешенный ротор вращается с постоянной частотой в специальных опорах (рис. 1.24). В зависимости от режима работы вращение происходит вокруг главной центральной оси инерции ротора (зарезонансный станок) или оси ротора (дорезонансный станок).

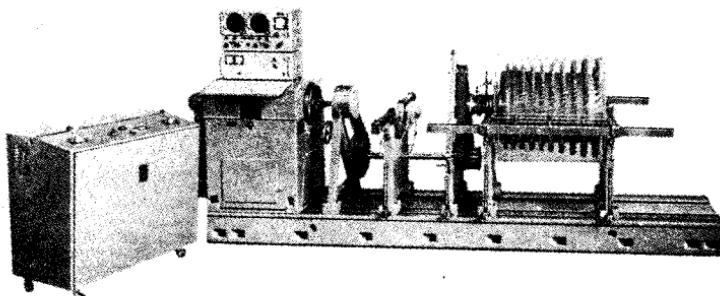


Рис. 1.24. Внешний вид станка для динамической низкочастотной балансировки

Рис. 1.25. Камера разгонно-балансировочного стенда

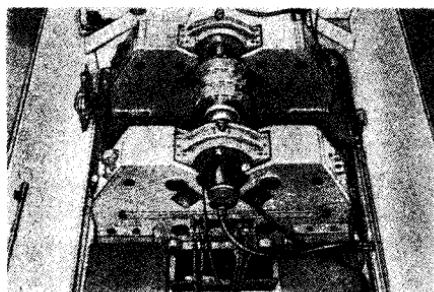
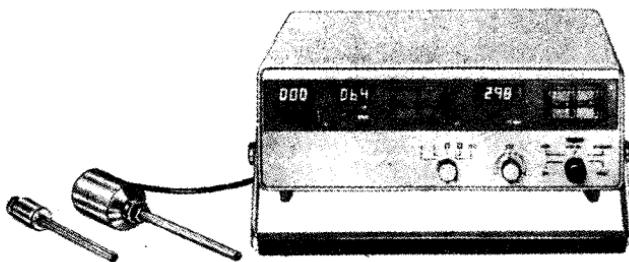


Рис. 1.26. Балансировочный комплект



На дорезонансных станках измеряют динамические усилия в опорах и по законам статики находят дисбалансы в плоскостях коррекции несбалансированного ротора. На зарезонансных станках измеряют вибрации опор и экспериментально устанавливают связь вибраций опор с дисбалансами в плоскостях коррекции ротора.

Высокочастотные станки для динамической балансировки (рис. 1.25), называемые *разгонно-балансировочными стенда*, оборудованы бесконтактными датчиками для измерения перемещений врачающегося ротора в нескольких сечениях.

Станки для динамической балансировки имеют индикаторы дисбаланса: измерительные приборы, аналоговые или цифровые вычислительные машины, позволяющие получать информацию о дисбалансах ротора. Комплект измерительных приборов с вибродатчиками, позволяющий получить информацию о дисбалансах ротора при балансировке на месте в собственных подшипниках и опорах без установки на балансировочный станок, называют *балансировочным комплектом* (рис. 1.26).

Металлорежущие станки в процессе балансировки применяют для корректировки масс снятием материала с поверхностей ротора. Для этого используют станки токарной группы, а также сверлильные, фрезерные и шлифовальные станки.

Корректировку масс ротора осуществляют и с помощью

других станков и агрегатов, например, сварочных агрегатов, лазеров, электрохимических станков и т. д.

Технологическая оснастка. К ней относят:

приспособления для балансировочных и металлорежущих станков;

средства контроля;

слесарно-сборочный, режущий инструмент и вспомогательные материалы.

Приспособления для балансировочных станков служат для установки ротора на опоры станка и привода его во вращение. Часто применяют технологические подшипники, оправки, приводные валы и другие приспособления.

Приспособления для металлорежущих станков предназначены для связывания обрабатываемой детали (ротора) при корректировке масс со станком и режущим инструментом. Для этих целей используют универсальные или специальные станочные приспособления. Наиболее распространены машинные тиски, патроны, кондукторы, планшайбы и т. п.

Выполнение подготовительных, рабочих и заключительных операций процесса балансировки сопровождается техническим контролем линейных, угловых размеров и массы. Для этих целей применяют контрольно-измерительный инструмент и приборы, обеспечивающие заданную точность измерений, высокую достоверность, малую трудоемкость. При балансировке используют как простые средства измерений (металлические линейки, щупы, технические уровни), так и более сложные — штангенинструменты, микрометры, рычажно-механические приборы (индикаторы часового типа).

В зависимости от конструкции станка, балансируемого ротора, способа корректировки масс применяют общеслесарный или специальный сборочный инструмент, резцы, фрезы, сверла и другой режущий инструмент.

В процессе технического обслуживания станков, подготовки роторов к балансировке используют смазочные масла, обтирочные противокоррозионные и другие вспомогательные материалы.

Средства механизации и автоматизации. Наряду со станками-автоматами и полуавтоматами, автоматическими линиями актуальны средства малой механизации и автоматизации.

Механизация направлена на частичную или полную замену ручного труда человека машиной с сохранением участия человека в ее управлении. Автоматизация процесса направлена на передачу машинам и приборам функций управления, ранее выполнявшихся человеком.

В настоящее время уровень механизации и автоматизации процессов балансировки на универсальных станках составляет 50...70 %. Дальнейшее повышение этого уровня идет по пути

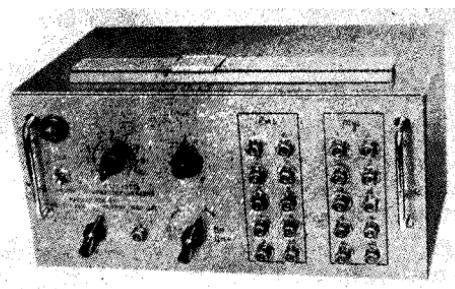


Рис. 1.27. Аналого-решающее устройство для балансировки

Рис. 1.28. МикроЭВМ



механизации расчетных работ при определении корректирующих масс, механизации и автоматизации операции.

Достаточно простым средством автоматизации являются аналоговые решающие устройства (рис. 1.27), предназначенные для определения корректирующих масс при многоплоскостной балансировке. Это устройство можно подключить к измерительному пульту балансировочного станка для реализации практических всех известных методов балансировки.

Широкое внедрение микроЭВМ индивидуального пользования служит основой механизации всех расчетных работ. Выпускаемые микрокалькуляторы, например "Электроника" Б3-34 (рис. 1.28), обладают необходимым объемом памяти для решения многих задач балансировки. Для использования прикладных программ балансировщику необходимо освоить работу на программируемом микрокалькуляторе.

Программируемый микрокалькулятор получает питание от размещенных внутри него аккумуляторов или от сети 220 В. Если на индикаторе загорится ноль с точкой, то это значит, что калькулятор готов к работе; если же загорятся запятые — аккумулятор разряжен.

На калькуляторе 30 клавиш (рис. 1.28). Если нажать на клавишу, то будет выполняться определенное действие, обозначенное в виде условного знака на самих клавишах, над ними или под ними. Например, нажимая на клавишу $+$, выполняют операцию сложения. Если же нажать сначала клавишу F (от слова Function — функция), а затем какую-то другую клавишу, то будет выполняться операция, обозначенная над клавишей.

Переключатель Р — Г в правом верхнем углу панели под индикатором служит для перехода от градусной меры угла (положение Г) к радиальной и наоборот (положение Р).

Система счисления при вводе и выводе информации в каль-

куляторе — десятичная. Все вводимые нецелые числа сначала нужно представить в виде десятичных дробей.

Калькулятор работает в режиме "Автоматическая работа" или "Программирование". Первый режим устанавливается автоматически после включения питания или после нажатия клавиш **F** и **АВТ**, если до этого калькулятор находился во втором режиме. В режим "Программирование" калькулятор переходит после нажатия клавиш **F** и **ПРГ**.

При работе калькулятора в автоматическом режиме числа, содержащие не более восьми знаков, вводят в калькулятор, набирая на клавиатуре его последовательные цифры, а при необходимости и клавишу запятая.

Если числа по абсолютной величине меньше 1 и больше 99 999 999, то их представляют в так называемом нормализованном виде (с плавающей запятой), т. е. в виде произведения двух сомножителей: один сомножитель (мантиssa) содержит те же цифры, что и исходное число (при этом ставится запятая после первой значащей цифры), а другой сомножитель (порядок) — число 10 в некоторой степени.

Порядок числа обозначается на индикаторе двумя правыми крайними цифрами со знаком перед ними (знак плюс не показывается). Если число начинается с нулей, то его порядок отрицателен и равен количеству нулей. Все, что расположено левее порядка, — мантиssa.

Ввод числа в нормализованном виде выполняют следующим образом: вводят мантиссу, нажимают клавишу ввода порядка **ВП** (появляются справа на индикаторе два нуля) и вводят порядок. Для отрицательных чисел после мантиссы и для отрицательных порядков после их ввода нажимают клавишу **/—**.

Например, нужно ввести в калькулятор число 0,00000129. Мантисса числа 1,29, порядок — 7, знак порядка -. Нажмем клавиши: **1** **,** **2** **9** **ВП** **7** **/—**, на индикаторе читаем 1.29—07.

Ввод чисел в нормализованном виде в нашей практике встречается редко в отличие от считывания с индикатора. Считывание числа начинают с его знака перед мантиссой и знака порядка. Если знак порядка отрицательный, то перед первой цифрой мантиссы нужно написать столько нулей, сколько указано в порядке, и поставить запятую после первого нуля. Если порядок задан положительным числом, то на такое число цифр переносят запятую вправо. По исчерпании цифр мантиссы добавляют нули. Например, индикатор показывает

1.29-03

мантиssa ↑ порядок
знак порядка

следует записать число 0,00129.

При выполнении любого действия используемые числа запоминаются калькулятором в отведенных для этого регистрах памяти. Десять регистров обозначаются натуральными числами от 0 до 9 включительно, четыре — буквами латинского алфавита A, B, C, и пять — X, Y, Z, T, XI. В техническом описании и инструкции по эксплуатации микрокалькуляторов указывается количество и обозначения регистров. Мы будем обозначать регистры сокращенно: П7 — занести в память (регистр 7), ИПС — извлечь из памяти.

Вводимое в калькулятор число заносится в регистр X и всегда видно на индикаторе. Вычисление функции от некоторого числа, таких, как вычисление прямых и обратных тригонометрических функций (\sin , \cos , \tg , \arcsin , \arccos , \arctg), возведение в степень чисел 10 и e (10^x , e^x), вычисление десятичного и натурального логарифма (\lg , \ln), возведение числа в квадрат (x^2), получение обратной величины от числа ($1/x$) и извлечение квадратного корня из числа (\sqrt{x}), выполняется таким образом, что в качестве аргумента берется число из регистра X и туда же помещается результат. Эти операции называются одноместными.

Например, для вычисления $\sqrt{10}$ нужно нажать клавиши: **10** **F** **✓**. На индикаторе появится значение корня 3,1622776.

Операции сложения, вычитания, умножения и деления, возведение числа x в степень y — двуместные, каждая выполняется над двумя числами. Эти числа должны находиться в двух регистрах X и Y. Первое вводимое число набирают на клавиатуре и оно попадает в регистр X. Для перевода его в регистр Y нужно нажать клавишу **↑**. Затем набирают на клавиатуре второе число, при этом первое автоматически стирается. При сложении и умножении числа можно набирать в любом порядке. В случае вычитания и деления сначала следует набрать уменьшаемое и делимое. Введя оба числа, можно нажимать клавишу требуемой операции (**+** **—** **×** **÷**). Знака = на программируемых калькуляторах нет. Результат операции появится на индикаторе. Например, для вычисления суммы двух чисел 9 и 4 следует нажать клавиши: **9** **↑** **4** **+**. Результат сложения 13 появится на индикаторе.

При выполнении цепочных операций порядок ввода чисел и операций с ними аналогичен порядку записи вычислений на бумаге. Так, для суммирования чисел 21, 22, 23, 24 достаточно после ввода первого числа и перевода его в регистр Y набирать последовательно числа и знак операции **+**. Результат сложения появляется на индикаторе после каждого нажатия клавиши **+**.

Нажимные клавиши

<input type="button" value="2"/>	<input type="button" value="1"/>	<input type="button" value="↑"/>
<input type="button" value="2"/>	<input type="button" value="2"/>	<input data-bbox="448 192 499 247" type="button" value="+"/>
<input type="button" value="2"/>	<input type="button" value="3"/>	<input data-bbox="448 287 499 342" type="button" value="+"/>
<input type="button" value="2"/>	<input type="button" value="4"/>	<input data-bbox="448 382 499 438" type="button" value="+"/>

Индикация

<input data-bbox="571 88 806 144" type="text" value="21,"/>
<input data-bbox="571 192 806 247" type="text" value="43,"/>
<input data-bbox="571 287 806 342" type="text" value="66,"/>
<input data-bbox="571 382 806 438" type="text" value="90,"/>

Например, необходимо вычислить арифметическое выражение $12000/2 \cdot 40$

Нажимаемые клавиши

<input type="button" value="1"/>	<input type="button" value="2"/>	<input type="button" value="0"/>	<input type="button" value="0"/>	<input type="button" value="0"/>
<input type="button" value="2"/>	<input type="button" value="÷"/>			
<input type="button" value="4"/>	<input type="button" value="0"/>	<input type="button" value="÷"/>		

Индикация

<input data-bbox="687 590 931 677" type="text" value="12000,"/>
<input data-bbox="687 701 931 788" type="text" value="6000,"/>
<input data-bbox="687 812 931 899" type="text" value="150,"/> результат

Неверно введенное число стирают нажатием клавиши **[СХ]**, набирают его вновь и продолжают работу. При некорректных операциях (деление на 0, извлечение квадратного корня из отрицательного числа и др.) и переполнении калькулятора (число больше, чем $\pm 9,9999999 \cdot 10^9$, либо меньше, чем $1,0000000 \cdot 10^{-9}$) на индикаторе высвечивается сигнал ошибки ЕГГОГ (от английского — ошибка).

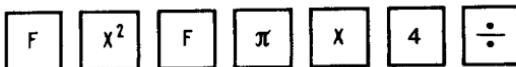
Работа калькулятора в автоматическом режиме целесообразна для однократных вычислений. Повторяющиеся вычисления удобнее выполнять по программе.

Работа калькулятора в режиме "Программирование".

Общие сведения об этом режиме дадим на примере несложной программы, по которой калькулятор вычислит площадь круга с диаметром d^* .

* Этот пример обычно приводят в инструкции по эксплуатации микрокалькулятора.

Формула для площади круга известна: $s = \pi d^2 / 4$. Если по ней ввести расчет вручную (автоматический режим), то следует сначала ввести величину d в регистр X (например, $d = 3$), далее нажать клавиши:



Индикатор покажет результат вычислений: 7,0685832.

В таком же порядке в калькулятор вводится программа для вычисления площади круга. Она в виде отдельных команд располагается в специальной программной памяти. Каждая команда занимает свою ячейку памяти, имеет свой номер, называемый адресом. Всего таких ячеек 98 — от 00 до 97.

После перевода калькулятора в режим программирования в правом углу индикатора загорится 00, т. е. счетчик адресов установится на нулевую отметку. Ввод каждой новой команды будет увеличивать на 1 содержимое счетчика адресов.

Ввод программы начинают с нажатия клавиши **F**. На индикаторе ничего не изменится, так как эта клавиша самостоятельного значения не имеет. Следом за ней нажимают клавишу **x²**; в левом углу индикатора загорается 22, означающее код операции возвведения числа в квадрат. Появление кода операции указывает, что команда занесена в программную память (ячейку 00). Одновременно в правом углу индикатора загорится 01

22 01

Вновь нажимают клавишу **F**, а за ней — **π**. Код 22 сдвигается вправо, а на его место появится число 20 — код засылки числа π в регистр X. Счетчик адресов покажет 02 — адрес следующей команды “умножить”

20 22 02

Нажатие клавиши **X** сдвигает вправо оба предыдущих кода, вызывает слева на индикаторе код операции умножения: 12 и текущее состояние счетчика адресов: 03

12 20 22 03

Так как индикатор отображает коды только трех последовательных команд, то занесение числа 4 в регистр X (нажатие клавиши **4**) даст следующее изображение на индикаторе:

04 12 20 04

Вычисление площади круга заканчивается операцией деления (код 13)

13	04	12	05
----	----	----	----

Завершение вычислений происходит по команде останова **[С/П]**, которая ставится в конце программы. Клавиша **[С/П]** ("стоп/пуск") также запускает калькулятор на автоматический счет по программе, находящейся в его памяти.

Чтобы обеспечить возможность многократных вычислений с разными исходными данными, программа каждый раз должна возвращаться к своему началу. Для этого после команды **[С/П]** нажимают клавиши: **[БП] [0] [0]** (переход к адресу 00).

Возврат калькулятора в автоматический режим после занесения программы осуществляется клавишами **[F]** и **[АВТ]**. Чтобы счет начался с начальной команды нашей программы, расположенной по адресу 00, нажимается клавиша **[В/0]** ("Возврат на 0").

Вычисление площади круга по программе требует только введения в регистр X диаметра 3 и нажатия клавиши **[С/П]**, запускающей калькулятор. Через несколько секунд на индикаторе появится результат: 7,0685832.

В больших сложных программах много исходных данных и подпрограмм. При их составлении используются адресуемые регистры памяти (от 0 до 9 и А, В, С, D), команды прямых и косвенных переходов, команды организации циклов, а также стековые регистры X, Y, Z, T, в которых последовательно записанная информация может считываться только в обратной последовательности.

В нашей книге помещены прикладные программы для балансировки. В заголовке программы дается ее название и несколько слов, поясняющие ее суть. Подробное описание того, что делает программа, обычно приведено отдельно в тексте раздела, где помещена программа. За поясняющими словами перечисляется исходная информация для расчетов. Затем следует сам текст программы с адресами, командами, кодами, используемыми регистрами памяти. После текста дается инструкция балансировщику по пользованию программой. В конце описания прикладной программы помещается контрольный пример с конкретными значениями исходных данных и получающимся результатом.

Работа с прикладными программами требует тщательной подготовки и некоторого навыка.

Прежде чем приступить к работе с калькулятором, необходимо проверить по тесту контроля его функционирование. Он

приводится в инструкции по эксплуатации Вашего микрокалькулятора.

Наиболее ответственный этап вычислений по программам — ввод ее в память калькулятора. Вводят программу, нажимая клавиши, записанные в тексте программы. Правильность выполняемых действий контролируют по индикатору.

Если при вводе программы допущены ошибки, что выявляется при решении контрольного примера, то следует проверить выполнение каждого шага программы. Для этого в режиме автоматической работы следует вернуть программу к началу

(**[БП]** **[0]** **[0]**), перевести калькулятор в режим программирования и, нажимая клавишу **[ШГ]**, проверить запись программы в калькуляторе. Все коды команд и их адреса должны в точности соответствовать тексту программы.

Ошибки, допущенные при вводе программы, можно исправить. Для этого вызывается ошибочная команда нажатием клавиш **[ШГ]** или **[ШГ]**. При каждом нажатии этих клавиш содержимое счетчика адресов команд соответственно увеличивается или уменьшается на единицу. Исправление ошибки в адресе перехода требует сдвинуть информацию на два шага и повторить ввод команды и следующий за ней адрес перехода. При большой разнице адресов ошибочной и текущей команд нужно воспользоваться командой безусловного перехода **[БП]** после перехода в режим "Автоматическая работа". Нажимается клавиша **[БП]**, а затем цифровые клавиши, которые обеспечат переход на нужный адрес. После возвращения в режим "Программирование" на индикаторе появятся код и адрес ошибочной команды. Она убирается с индикатора нажатием клавиши **[ШГ]**. Для исключения какой-либо команды из программы следует перейти на ее адрес, а затем нажать клавиши: **[К]** и **[НОП]** (нет операции).

Все приведенные в книге программы с точностью до обозначений годятся для микроЭВМ "Электроника" Б3-34, МК-56 и МК-54. Отдельные тождественные по существу операции, обозначенные на этих типах калькуляторов по-разному, с целью унификации приведены к обозначениям калькулятора Б3-34.

А именно:

1. Операция пересылки чисел из одного регистра в другой

$B \uparrow$ обозначены \uparrow ;

$PN \rightarrow x$ ИПН;

$x \rightarrow PN$ ПН;

$x \leftrightarrow y$ и $x \overrightarrow{y}$ $\leftarrow \rightarrow$

2. Операция кольцевого передвижения информации в стеке обозначена **[F]**.

3. Операции вычисления обратных тригонометрических функций:

\sin^{-1} обозначены ar sin;

\cos^{-1} ar cos;

tg^{-1} ar tg.

Развитие программируемых микрокалькуляторов идет по пути увеличения программной памяти, использования встроенного полупостоянного запоминающего устройства (ППЗУ).

В отличие от оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) оно способно длительно хранить информацию при отключении источника питания. В любой момент из него можно считать в ОЗУ микрокалькулятора одну из ранее записанных программ.

К средствам механизации и автоматизации более высокого уровня относятся: управляющие и вычислительные мини-ЭВМ, лазеры, автобалансирующие устройства.



СТАТИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА

Комплексно рассмотрены методы, точность и средства статической балансировки; даются способы определения массовых и геометрических параметров тел вращения.

2.1. ОСНОВЫ СТАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ПРИ ПОМОЩИ СИЛ ТЯЖЕСТИ

Статическая балансировка — балансировка, при которой определяется и уменьшается главный вектор дисбалансов ротора, характеризующий его статическую неуравновешенность. Главный вектор дисбалансов ротора можно определить при помощи силы тяжести на невращающемся роторе или на вращающемся роторе в динамическом режиме.

Ниже будет рассмотрена статическая балансировка при помощи сил тяжести на невращающемся роторе, а статическая балансировка в динамическом режиме — в гл. 3.

Положим на горизонтальную плоскость статически неуравновешенный ротор. Он начнет катиться по плоскости и, сделав несколько оборотов вокруг оси, остановится, заняв устойчивое положение. Движение ротора происходит под действием момента сил тяжести. Значение момента сил тяжести относительно оси, проходящей через точку O (рис. 2.1, а) перпендикулярно плоскости рисунка, равно произведению силы тяжести mg на плечо h . Расстояние h определяется как проекция эксцентризитета массы e_{ct} на ось y , т. е. $h = e_{ct} \cos \psi$. Тогда момент сил тяжести

$$M_g = e_{ct} mg \cos \psi.$$

Момент M_g действует до тех пор, пока точка O_1 (рис. 2.1, б) не переместится вниз. В устойчивом положении момент сил тяжести относительно продольной оси равен нулю, так как $\cos \psi = 0$. Нижняя точка показывает угол дисбаланса в системе координат, связанной с ротором, или, как говорят, тяжелое место ротора.

Чтобы сбалансировать ротор, его необходимо повернуть на 90° и привести тяжелое место в горизонтальную плоскость. В

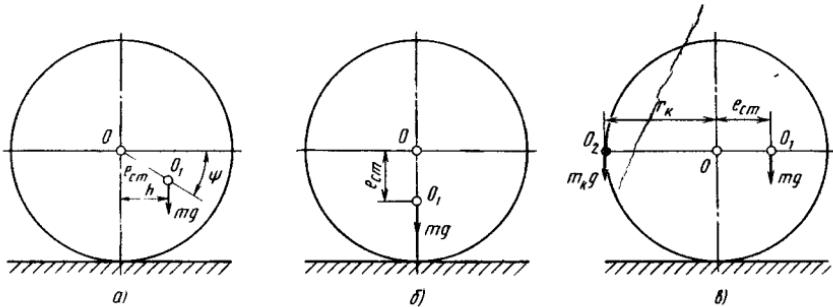


Рис. 2.1. Статическая балансировка

противоположной точке O_2 (рис. 2.1, в) на радиусе $OO_2 = r_k$ установить корректирующую массу m_k , создающую момент силы тяжести $r_k m_k g = e_{\text{ст}} m g$. Добившись состояния безразличного равновесия, получим значение главного вектора дисбалансов ротора:

$$D_{\text{ст}} = m e_{\text{ст}} = m_k r_k.$$

Для определения главного вектора дисбалансов можно использовать и другие движения ротора: поворот вокруг неподвижной оси ротора, перемещение оси ротора относительно неподвижной оси или точки, перемещение оси ротора в пространстве.

Пример. Ротор массой $m = 40$ кг сбалансирован статически корректирующей массой $m_k = 8$ г на радиусе $r_k = 300$ мм. Необходимо определить значение главного вектора дисбалансов и эксцентриситет центра массы ротора.

Главный вектор дисбалансов

$$D_{\text{ст}} = m_k r_k = 8 \text{ г} \cdot 200 \text{ мм} = 1600 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

Эксцентриситет центра массы ротора

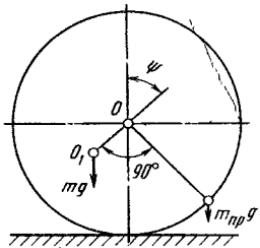
$$e_{\text{ст}} = \frac{D_{\text{ст}}}{m} = \frac{1600 \text{ г} \cdot \text{мм}}{40 \text{ кг}} = \frac{1600 \text{ г} \cdot \text{мм}}{40000 \text{ г}} = 0,04 \text{ мм} = 40 \text{ мкм}.$$

Методы определения корректирующей массы при статической балансировке. Значения корректирующей массы при статической балансировке находят расчетным и экспериментальным методами.

На предварительно настроенном станке для статической балансировки на данный тип ротора значение корректирующей массы определяют по показаниям индикатора дисбаланса, цена деления которого связана с единицами коррекции, г или г · мм.

Экспериментальные методы определения корректирующей массы при статической балансировке используют в станках без индикаторов дисбаланса. К экспериментальным относят методы подбора с пробной и без пробной массы, а также метод кругового обхода.

Рис. 2.2. Устойчивое равновесие ротора



Метод подбора без пробной массы заключается в последовательной постановке различных корректирующих масс в легком месте ротора, пока не будет достигнуто положение безразличного равновесия. Этот метод наиболее прост, но достаточно трудоемок.

Метод подбора с пробной массой состоит в постановке на несбалансированный ротор пробной массы $m_{\text{пр}}$ на радиусе $r_{\text{пр}}$.

Массу $m_{\text{пр}}$ ставят под углом 90° к тяжелому месту. Совместное действие моментов сил тяжести ротора и пробной массы выведет ротор из равновесия. Ротор повернется на угол ψ относительно вертикальной оси и займет новое устойчивое равновесие (рис. 2.2). В устойчивом положении момент сил тяжести ротора равен моменту сил тяжести пробной массы:

$$D_{\text{ст}}g \sin \psi = m_{\text{пр}}r_{\text{пр}}g \cos \psi.$$

Из этого равенства определим главный вектор дисбалансов

$$D_{\text{ст}} = m_{\text{пр}}r_{\text{пр}} \operatorname{ctg} \psi$$

и значение корректирующей массы

$$m_k = m_{\text{пр}} \frac{r_{\text{пр}}}{r_k} \operatorname{ctg} \psi.$$

Пробную массу выбирают так, чтобы она вызывала поворот несбалансированного ротора на угол $30 \dots 40^\circ$.

При статической балансировке партии роторов подбирают постоянную пробную массу, которую определяют при балансировке первого ротора. Расчет корректирующей массы для всех роторов ведут по упрощенной формуле

$$m_k = a \operatorname{ctg} \psi,$$

где $a = m_{\text{пр}}r_{\text{пр}}/r_k$ — постоянный коэффициент.

Метод кругового обхода широко распространен в балансировочной технике. Его применяют для определения дисбалансов роторов, находящихся в состоянии безразличного равновесия при любом угловом положении. Такое состояние наблюдается как у несбалансированных роторов, так и у роторов после статической балансировки рассмотренными выше методами.

Методика балансировки заключается в следующем. Окружность ротора в плоскости коррекции делят на восемь равных частей и наносят меловые метки 1, 2, ..., 8. Ротор устанавливают

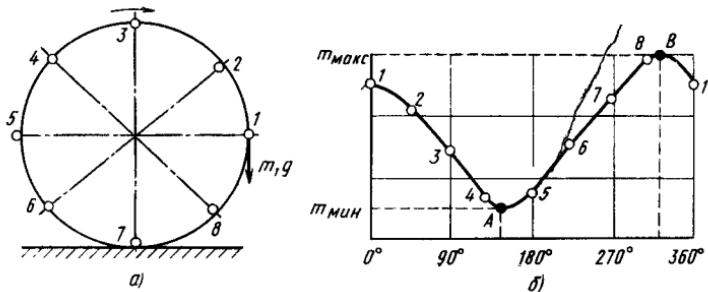


Рис. 2.3. Графическое определение неуравновешенной массы

на балансировочный станок так, чтобы метка 1 находилась в горизонтальной плоскости (рис. 2.3, а). В точке 1 подбирают массу m_1 , которая поворачивает ротор на угол 45° и приводит в горизонтальную плоскость точку 2. Первую массу снимают и взвешивают. В точке 2 подбирают новую массу m_2 , вызывающую поворот ротора также на угол 45° , и так для всех точек. В результате получают значения неуравновешенных масс m_1, m_2, \dots, m_8 , поворачивающих ротор на один и тот же угол.

Значение и угол корректирующей массы находят графическим способом. Для этого строят график (рис. 2.3, б). По оси абсцисс откладывают угол постановки (или номер метки) неуравновешенной массы, а по оси ординат — значение неуравновешенной массы. Полученные точки соединяют плавной кривой, подобной синусоиде. На кривой находят точки A и B , соответствующие минимальному m_{\min} и максимальному m_{\max} значению неуравновешенной массы.

Нижняя точка кривой A указывает тяжелое место ротора. Моменты сил тяжести ротора и неуравновешенной массы m_{\min} в этой точке направлены в одну сторону и создают момент

$$M_{gA} = D_{ctg} + m_{\min} r_k g.$$

Моменты сил тяжести ротора и неуравновешенной массы m_{\max} в точке B направлены в противоположные стороны. Они создают момент

$$M_{gB} = m_{\max} r_k g - D_{ctg}.$$

Из равенства углов поворота ротора следует равенство моментов $M_{gA} = M_{gB}$, откуда находим значение главного вектора дисбалансов:

$$D_{ct} = \frac{1}{2} (m_{\max} - m_{\min}) r_k$$

и корректирующей массы

$$m_k = \frac{1}{2} (m_{\max} - m_{\min}).$$

2.2 ПОГРЕШНОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Точность определения значения и угла корректирующей массы ограничивается погрешностями, возникающими при статической балансировке. К ним относятся: 1) отклонения формы несущих и опорных поверхностей ротора и балансировочного станка; 2) деформация поверхностей; 3) трение между этими поверхностями.

Погрешность статической балансировки, возникающая за счет отклонения формы несущих и опорных поверхностей ротора и балансировочного станка. В качестве несущих и опорных поверхностей применяют цилиндрические, сферические и плоские поверхности. Под отклонением (погрешностью) формы понимают несоответствие между формой реальной поверхности и формой геометрической поверхности, заданной чертежом.

К элементарным отклонениям формы цилиндрических поверхностей относятся: овальность, огранка, конусообразность, изогнутость и др. Для сферических поверхностей ограничивают отклонение от формы профиля, определяющееся наибольшим расстоянием от контура реального профиля до прилегающего. Неплоскость и непрямолинейность — отклонение формы плоских поверхностей.

Элементарным отклонением поверхности любой формы, имеющей характер периодически чередующихся возвышений и впадин, является волнистость. Высота неровностей волнистости и шероховатости примерно одинакова, а шаги волн различны.

Несущие и опорные поверхности ротора и балансировочного станка изготавливают по III ... V степени точности. Предельные отклонения формы поверхностей составляют 0,6 ... 10 мкм.

В качестве примера рассмотрим влияние неплоскости опорной поверхности на точность статической балансировки. Под действием момента силы тяжести несбалансированный ротор (рис. 2.4) стремится повернуться вокруг оси по часовой стрелке. Однако неплоскость препятствует этому движению. Ротор будет находиться в равновесном состоянии относительно точки O' . Момент силы тяжести ротора уравновешивается моментом силы тяжести корректирующей массы:

$$mO_1O'g = m_k(r_k + OO')g.$$

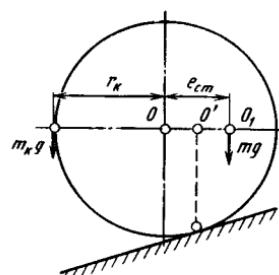


Рис. 2.4. Погрешность статической балансировки $00'$ при неплоскости опорной поверхности станка

Расстояние $O O'$ полагаем равным нулю, так как оно намного меньше радиуса коррекции. Из рис. 2.4 видно, что $O_1 O' = e_{\text{ст}} - O O'$. Тогда главный вектор дисбалансов

$$D_{\text{ст}} = m_k r_k + m O O',$$

где $m O O'$ — погрешность статической балансировки от неплоскости опорной поверхности станка.

Для уменьшения погрешности статической балансировки, возникающей за счет отклонения формы несущих и опорных поверхностей ротора и балансировочного станка, применяют следующий способ.

После балансировки ротора до состояния безразличного равновесия в тяжелое место ротора, установленное в горизонтальную плоскость, вносят неуравновешенную массу, вызывающую поворот ротора на $20 \dots 30^\circ$. Затем ротор поворачивают на угол 180° и в легкое место вносят новую неуравновешенную массу, которая повернет ротор на тот же угол. Полуразница между этими массами компенсирует погрешность статической балансировки.

Погрешность статической балансировки, возникающая за счет деформации несущих и опорных поверхностей ротора и балансировочного станка. Несущие и опорные поверхности в месте соприкосновения под действием силы тяжести деформируются. Образуется контактная площадка, называемая зоной контакта. Погрешность статической балансировки определяется размер зоны контакта; последняя зависит от жесткости и размеров несущих и опорных поверхностей ротора и балансировочного станка, величины силы тяжести. Жесткость опор должна быть такой, чтобы не было остаточной деформации при нагружении этих поверхностей.

Погрешность статической балансировки, возникающая за счет трения между несущими и опорными поверхностями ротора и балансировочного станка. Несущая поверхность перемещается относительно опорной поверхности балансировочного станка. Возникает момент сил трения качения или скольжения, препятствующий перемещению ротора;

$$M_{\text{тр}} = m g r f,$$

где r — радиус несущей поверхности (цапфы); f — коэффициент трения, зависящий от материала, твердости, чистоты и состояния поверхностей.

Ротор будет поворачиваться, если момент сил тяжести будет больше его момента сил трения. Следовательно, погрешность статической балансировки ΔD от трения между несущими и опорными поверхностями ротора и балансировочного станка будет $\Delta D = m r f$.

Пример. Ротор массой 100 кг находится в состоянии безразличного равновесия на опорах балансировочного станка. Радиус цапфы равен 50 мм, коэффициент трения составляет 0,001. Рассчитать погрешность ста-

тической балансировки, возникающей за счет трения между несущей и опорной поверхностями ротора и балансировочного станка.

Погрешность статической балансировки от трения между поверхностями

$$\Delta D = mrf = 100 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 0,001 = 5000 \text{ г} \cdot \text{мм}.$$

Для определения и устранения погрешностей статической балансировки, возникающих за счет деформации и трения между несущими и опорными поверхностями ротора и балансировочного станка, применяют метод кругового обхода. Компенсирующая эти погрешности масса равна полуразности максимальной и минимальной пробных масс.

Сумма рассмотренных погрешностей статической балансировки определяет порог чувствительности балансировочного станка для статической балансировки.

Балансировку деталей, не имеющих собственных несущих поверхностей, проводят на балансировочных оправках. Отклонения расположения поверхностей оправки и наличие зазора в посадке вызывают дополнительные погрешности статической балансировки.

Рассмотрим влияние радиального биения δ посадочной поверхности относительно цапф оправки на точность статической балансировки. Пусть, например, центр массы детали O (рис. 2.5) дополнительно смещается с оси оправки O_1 на величину δ за счет биения посадочного диаметра. Возникает погрешность статической балансировки $\Delta D_{\text{ст}}$, равная произведению массы детали m на биение δ , т. е.

$$\Delta D_{\text{ст}} = m\delta.$$

Наличие зазора между посадочными поверхностями детали и оправки S также вызывает погрешность статической балансировки:

$$\Delta D_{\text{ст}} = mS.$$

Для исключения влияния точности изготовления оправок на балансировку деталей применяют способ компенсирующих грузов.

Вначале балансируют деталь статически на оправке корректирующей массой m_{k1} . Затем оправку поворачивают относительно детали на 180° . Проводят вторую балансировку детали на оправке корректирующей массой m_{k2} . Снимают корректирующие массы m_{k1} и $m_{k2}/2$ и проводят окончательную балансировку детали. После этого контролируют точность балансировки, а затем снимают оставшуюся массу $m_{k2}/2$. Рассмотренный метод позволяет независимо от оси, относительно которой производится статическая балансировка, привести центр масс детали на ее геометрическую ось.

Статическую балансировку проводят обычно в одной плоскости коррекции. Если эта плоскость не проходит через центр

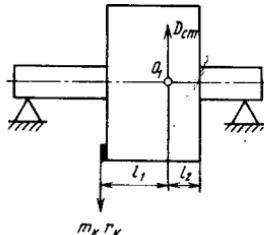
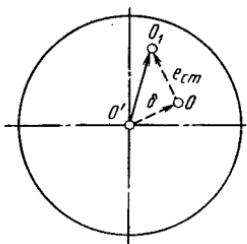


Рис. 2.5. Погрешность статической балансировки при радиальном биении посадочной поверхности оправки δ

Рис. 2.6. Моментная неуравновешенность, возникающая при статической балансировке

масс детали, то возникает погрешность балансировки — дополнительный главный момент дисбалансов ΔM_D .

Главный вектор дисбалансов $D_{ст}$ и дисбаланс в плоскости коррекции $m_k r_k$ (рис. 2.6) образуют два равных, противоположно направленных, не лежащих на одной прямой вектора — пару векторов. Момент пары равен произведению одного из векторов на расстояние между их направлениями. Значение момента пары составляет погрешность балансировки

$$\Delta M_D = m_k r_k l_1.$$

Пример. Ротор сбалансиран корректирующей массой $m_k = 8$ г на радиусе $r_k = 200$ мм в плоскости на расстоянии $l = 100$ мм от центра масс. Каково значение дополнительного главного момента дисбалансов?

Значение дополнительного главного момента дисбалансов

$$\Delta M_D = 8 \cdot 200 \cdot 100 = 16 \cdot 10^4 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$$

Дополнительный главный момент дисбалансов не возникает при статической балансировке, если корректировку масс проводят в двух плоскостях коррекции. Значения корректирующих масс в двух плоскостях рассчитывают по законам статики. Для плоскостей, расположенных по обе стороны от центра масс (см. рис. 2.6), корректирующие массы находят по формулам:

для 1-й плоскости $m_{k1} = m_k l_2 / (l_1 + l_2)$;

для 2-й плоскости $m_{k2} = m_k l_1 / (l_1 + l_2)$.

Статическую балансировку в двух плоскостях проводят в следующей последовательности.

Проводят статическую балансировку в одной плоскости коррекции массой m_k .

Рассчитывают корректирующие массы в 1-й и 2-й плоскостях коррекции по приведенным выше формулам.

Устанавливают расчетные корректирующие массы m_{k1} и m_{k2} в обеих плоскостях и контролируют точность балансировки.

Производят корректировку масс и контролируют точность

балансировки. При корректировке масс путем уменьшения массы ее проводят последовательно — сначала в одной, а затем в другой плоскости коррекции. Последовательная корректировка масс полностью устраниет дополнительный главный момент дисбалансов ротора.

2.3. СТАНКИ ДЛЯ СТАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Станки для статической балансировки определяют главный вектор дисбалансов ротора при помощи силы тяжести на невращающемся роторе. В зависимости от характера движения оси ротора при балансировке станки делят на пять основных групп (табл. 2.1). Станки для статической балансировки обозначают буквами СБС с порядковым номером группы. Каждая группа в зависимости от конструктивных особенностей станков делится на подгруппы, обозначаемые строчными буквами. Станки для статической балансировки при помощи силы тяжести просты в изготовлении и эксплуатации, не требуют высокой квалификации оператора. Они нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства.

Станки для статической балансировки СБС-1. Балансировочные станки 1-й группы предназначены для балансировки деталей на балансировочных оправках и роторов.

Таблица 2.1

Классификация станков для статической балансировки
при помощи силы тяжести

Номер группы	Характер перемещения оси ротора	Опоры станка	Условное обозначение	Порог чувствительности станка, мкм	Метод определения корректирующей массы
1	Не перемещается	Роликовые Дисковые Газовые	СБС-1а СБС-1б СБС-1в	15 ... 30 7 ... 15	Экспериментальный
2	Перемещается относительно неподвижной точки	Сферическая Упругая	СБС-2а СБС-2б	10 ... 20	Расчетный
3	Перемещается относительно неподвижной оси	Весы с вертикальной осью Весы с горизонтальной осью	СБС-3а СБС-3б	5 ... 10	Расчетный
4	Перемещается в неподвижной плоскости	Плоскопараллельные	СБС-4	2 ... 5	Экспериментальный
5	Перемещается в пространстве	Жидкостные	СБС-5	—	Экспериментальный

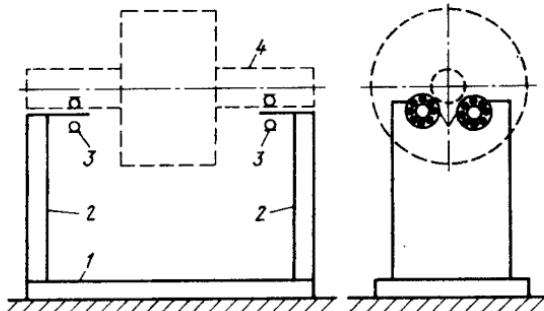


Рис. 2.7. Станок СБС-1

Принцип действия станков СБС-1 заключается в повороте несбалансированного ротора вокруг неподвижной оси в опорах станка под действием момента сил тяжести.

Типовая схема станка 1-й группы показана на рис. 2.7.

На фундаментной плите 1 установлены две стойки 2, которые можно передвигать по направляющим плиты. На каждой стойке смонтирована опора 3, воспринимающая нагрузки и моменты от сил тяжести несбалансированного ротора 4. В качестве опор балансировочных станков СБС-1 применяют роликовые, дисковые и газовые опоры. Роликовая опора станка СБС-1а состоит из двух роликов с подшипниками качения. Оба подшипника установлены на неподвижных осях в стойке в плоскости, перпендикулярной оси ротора. Дисковая опора станка СБС-1б отличается от роликовой опоры тем, что она имеет больший наружный диаметр, а диски расположены в параллельных плоскостях.

Порог чувствительности станков с роликовыми и дисковыми опорами зависит от диаметров роликов и цапф балансируемого ротора, расстояния между осями роликов, трения в подшипниках, погрешности формы несущих и опорных поверхностей и других причин.

В качестве газовых опор в станках СБС-1в используют полухватные цилиндрические газостатические подшипники. Слой газовой смазки в подшипнике образуется за счет подачи воздуха с избыточным давлением через жиклеры в зазор между цапфой и вкладышем. Балансируемый ротор всплывает и под действием момента сил тяжести поворачивается тяжелым местом вниз. Порог чувствительности станков с газовыми опорами жиклерного типа зависит от погрешности расположения жиклеров по окружности. В подшипниках щелевого типа этот недостаток отсутствует.

Настройка балансировочного станка СБС-1. В процессе настройки балансировочных станков 1-й группы на данный тип ротора выполняют следующие операции.

На фундаментной плите устанавливают стойки на расстоянии, равном расстоянию между цапфами балансируемого ротора.

Производят очистку, смазку, контроль радиальных и торцевых биений роликов или дисков. Опоры считаются годными к эксплуатации, если биения контролируемых поверхностей не превышают 0,01 ... 0,02 мм, а вращение подшипников свободное без заедания.

Устраняют непараллельность, неперпендикулярность и несоосность опор станка. Предельные отклонения этих параметров на длине 1 м не должны превышать 0,04 ... 0,06 мм. К газовым опорам предъявляют более высокие требования. Для контроля несоосности используют жесткие калибры, индикаторные приспособления, визирную трубку с коллиматором.

Тщательно балансируют тарировочный ротор, с помощью которого определяют порог чувствительности станка по значению главного вектора дисбалансов и метод определения корректирующей массы. Балансировку тарировочного ротора проводят методом кругового обхода. Порог чувствительности балансировочного станка для статической балансировки в заданных условиях находят подбором такой минимальной массы, устанавливаемой в тяжелом месте, которая вызовет поворот ротора на 5 ... 10°. Порог чувствительности можно подсчитать по формуле

$$\Delta D = D_{\text{стост}} + m_{\text{мин}} r k.$$

В процессе балансировки партии роторов тарировочный ротор используют для контроля параметров станка.

Статическая балансировка роторов или деталей на станках 1-й группы включает следующие операции:

монтаж детали на балансировочной оправке;

установку ротора на опорах станка;

определение угла и значения корректирующей массы;

корректировку масс ротора согласно требованиям чертежа;

контроль остаточного дисбаланса.

Статическую балансировку проводят до тех пор, пока значение остаточного дисбаланса не станет меньше допустимого, т. е.

$$D_{\text{стост}} < D_{\text{стдоп}}.$$

Станки для статической балансировки СБС-2. Балансировочные станки 2-й группы предназначены для балансировки деталей, не имеющих собственных несущих поверхностей. Принцип действия станков СБС-2 заключается в повороте несбалансированной детали вокруг неподвижной точки под действием момента сил тяжести. Типовая схема станка 2-й группы показана на рис. 2.8.

На станине 7, установленной на фундаментной плите 8, на сферической опоре 1 станка СБС-2а или упругом стержне станка СБС-2б подвешена подвижная система станка. Она состоит

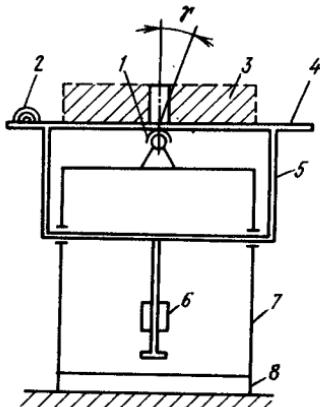


Рис. 2.8. Станок СБС-2

рабочем столе. Шкала уровня является индикатором значения и угла дисбаланса.

Порог чувствительности станков СБС-2 зависит от погрешности формы сферической пятнышки и шаровой опоры, деформации и трения в опоре, податливости упругого стержня.

Настройка балансирующего станка СБС-2. При настройке станков 2-й группы на данный тип детали выполняют следующие операции.

На рабочем столе монтируют приспособление для установки балансируемых деталей. В приспособлении закрепляют тщательно сбалансированную деталь для настройки и тарирования станка. Эту деталь балансируют методом кругового обхода.

Регулируют чувствительность подвижной системы балансирующего станка. На траверсе 5 подбирают такое положение груза 6, при котором контрольный груз, установленный в тяжелом месте тарировочной детали, вызывает заданное угловое отклонение γ подвижной части станка.

Производят тарирование балансирующего станка, при котором цену деления шкалы уровня связывают с единицами коррекции — граммами или граммами на миллиметр (g или $g \cdot mm$).

Технологический процесс статической балансировки партии деталей на станках 2-й группы включает операции, указанные для станков СБС-1. Определение угла и значения корректирующей массы производится расчетным методом — по показаниям шкалы сферического уровня, поэтому продолжительность измерительного цикла невелика.

Балансирующие станки СБС-2 применяют в серийном производстве при балансировке больших партий деталей.

Станки для статической балансировки СБС-3. Балансирующие станки 3-й группы предназначены для балансировки дискообразных деталей с посадочным базовым отверстием.

из рабочего стола с приспособлением 4 для балансируемой детали 3, траверсы 5 с грузом 6, который можно перемещать вдоль стержня траверсы. Подвижная система станка находится в состоянии устойчивого равновесия, так как ее центр массы лежит ниже геометрического центра опоры.

Величина и направление угла поворота подвижной системы станка с несбалансированной деталью вокруг геометрического центра сферической опоры характеризуют значение и угол дисбаланса. Поворот вертикальной оси измеряют прецизионным сферическим уровнем 2, который установлен на рабочем столе. Шкала уровня является индикатором значения и угла дисбаланса.

Настройка балансирующего станка СБС-2. При настройке

станков 2-й группы на данный тип детали выполняют следующие операции.

На рабочем столе монтируют приспособление для установки балансируемых деталей. В приспособлении закрепляют тщательно сбалансированную деталь для настройки и тарирования станка. Эту деталь балансируют методом кругового обхода.

Регулируют чувствительность подвижной системы балансирующего станка. На траверсе 5 подбирают такое положение груза 6, при котором контрольный груз, установленный в тяжелом месте тарировочной детали, вызывает заданное угловое отклонение γ подвижной части станка.

Производят тарирование балансирующего станка, при котором цену деления шкалы уровня связывают с единицами коррекции — граммами или граммами на миллиметр (g или $g \cdot mm$).

Технологический процесс статической балансировки партии деталей на станках 2-й группы включает операции, указанные для станков СБС-1. Определение угла и значения корректирующей массы производится расчетным методом — по показаниям шкалы сферического уровня, поэтому продолжительность измерительного цикла невелика.

Балансирующие станки СБС-2 применяют в серийном производстве при балансировке больших партий деталей.

Станки для статической балансировки СБС-3. Балансирующие станки 3-й группы предназначены для балансировки дискообразных деталей с посадочным базовым отверстием.

Принцип действия станков СБС-З заключается в перемещении несбалансированной детали относительно неподвижной оси под действием момента сил тяжести. В основе различных конструкций балансировочных станков этой группы лежит схема обычных неравноплечих рычажных весов.

Типовая схема станка с вертикальной осью показана на рис. 2.9.

На фундаментной плите 12 установлена стойка 9, на которую опирается подвижная часть станка. Стойка 9 имеет неподвижный указатель 7. Подвижная часть станка состоит из коромысла 1, грузов 2, 8, рабочего стола 6 с поворотным приспособлением для установки балансируемой детали 5. Приспособление с деталью можно поворачивать вокруг вертикальной оси. К нижней части коромысла прикреплены две призмы 3. Обе призмы опираются на опоры 4, установленные на стойке 9.

На правом плече коромысла находится груз 8. Левое плечо коромысла имеет шкалу, вдоль которой можно перемещать груз 2. Груз 8 служит для уравновешивания подвижной части станка с тарировочным ротором при крайнем правом положении груза 2. Состояние устойчивого равновесия подвижной части станка достигается перемещением груза 10 в такое положение, при котором ее центр массы лежит ниже точки контакта в опоре. Для гашения колебаний подвижной части станка служит жидкостный демпфер 11.

Схема станков с горизонтальной осью СБС-Зб отличается от станков с вертикальной осью СБС-За тем, что приспособление с деталью расположено на правом плече рычага.

Значение и угол дисбаланса детали пропорциональны отклонению левого плеча рычага от горизонтального положения — положения равновесия подвижной части станка. При повороте детали вокруг вертикальной оси максимальное отклонение рычага будет когда тяжелое место несбалансированной детали лежит напротив неподвижного указателя 7.

Порог чувствительности балансировочных станков СБС-З в основном зависит от трения и деформаций в опорах. Настройка балансировочных станков 3-й группы включает те же операции, что и настройке станков 2-й группы.

Технологический процесс статической балансировки партии деталей на станках 3-й группы включает операции, указанные для станков СБС-1. Подробнее рассмотрим операцию по опре-

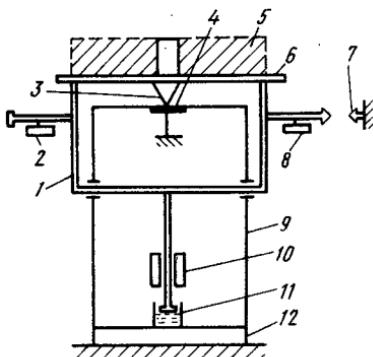


Рис. 2.9. Станок СБС-3

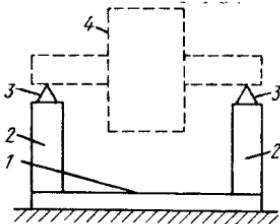


Рис. 2.10. Станок СБС-4

делению величины и угла дисбаланса детали. Первым переходом этой операции является определение тяжелого места несбалансированной детали. Тяжелое место детали находят следующим образом.

Приспособление с деталью плавно поворачивают вокруг вертикальной оси. Устанавливают положение детали, при котором наблюдается наибольшее отклонение правого плеча рычага от неподвижного указателя. Напротив

неподвижного указателя находится тяжелое место детали.

Перемещая груз 2 на левом плече коромысла, уравновешивают весы и по показаниям шкалы определяют значение дисбаланса.

Балансировочные станки СБС-3 применяют в серийном производстве при точной балансировке больших партий деталей.

Станки для статической балансировки СБС-4. Балансировочные станки 4-й группы предназначены для балансировки деталей на балансировочных оправках.

Принцип действия станков СБС-4 заключается в перемещении оси детали в неподвижной плоскости под действием момента сил тяжести. В этих станках ротор катится по параллельным направляющим.

Типовой балансировочный станок (рис. 2.10) состоит из фундаментной плиты 1, двух стоек 2 и двух направляющих (но-жей) 3, на которые устанавливают балансируемый ротор 4. В качестве опор станка применяют направляющие различных профилей.

Значение дисбаланса детали определяют экспериментальными методами, а угол дисбаланса устанавливают по нижней точке несбалансированного ротора, находящегося в устойчивом положении.

Порог чувствительности балансировочных станков СБС-4 зависит от многих причин (см. п. 2.2).

Настройка балансировочного станка СБС-4. Настройка балансировочных станков 4-й группы аналогична настройке балансировочных станков 1-й группы. Повышенные требования предъявляют к негоризонтальности направляющих, которая должна быть не более 0,03 мм на длине 1 м. Статическую балансировку деталей на станках СБС-4 проводят так же, как на станках СБС-1. Балансировочные станки СБС-4 применяют в единичном и мелкосерийном производстве.

Станки для статической балансировки СБС-5. Балансировочные станки 5-й группы предназначены для балансировки, регулировки дифферента и плавучести тел вращения типа поплавковых гироскопов.

Принцип действия станков СБС-5 заключается в измерении перемещений тела вращения в специальной жидкости под действием подъемной силы жидкости и моментов сил тяжести. Типовой балансировочный станок этой группы (рис. 2.11) представляет собой ванну 5, наполненную жидкостью 6,

в которой плавает поплавок 3. Плавучесть поплавка регулируют изменением массы груза 4 так, чтобы сила тяжести поплавка и подъемная сила жидкости находились в равновесии. Тогда сам поплавок будет в состоянии безразличного равновесия.

Регулировку дифферента поплавка производят перемещением груза 4 вдоль продольной оси поплавка без изменения массы самого груза. Статическую балансировку осуществляют перемещением грузов 1 и 2 по радиусу. Погрешность балансировки зависит от движения жидкости в ванне. Для уменьшения погрешности балансировки в ванне поддерживают постоянную температуру жидкости с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Контроль остаточных дисбалансов, плавучести и дифферента проводят на контрольном стенде с помощью приборов, называемых граммометрами.

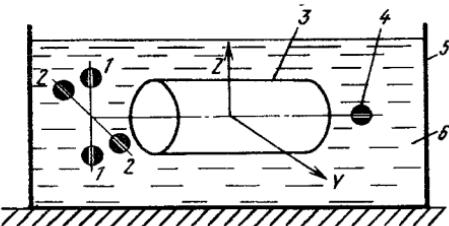


Рис. 2.11. Станок СБС-5

2.4. КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ ДИСБАЛАНСОВ

Статическую балансировку проводят до тех пор, пока значение главного вектора остаточных дисбалансов не станет меньше допустимого. Допустимое значение главного вектора дисбалансов указывают в технических требованиях чертежа детали. На практике применяют следующие методы контроля дисбалансов: по показаниям индикатора дисбаланса; с применением контрольного груза; круговым обходом.

Выбор метода контроля статической балансировки зависит от допустимого значения главного вектора дисбалансов, порога чувствительности и вида балансировочного станка.

Метод контроля значения главного вектора остаточных дисбалансов по показаниям индикатора дисбаланса применяют при статической балансировке на станках СБС-2 и СБС-3, если $D_{\text{стдоп}}$ более чем в 2,5 раза превышает порог чувствительности станка в заданных условиях ΔD .

Значения главного вектора дисбалансов детали после статической балансировки $D_{\text{ст}}$ отсчитывают непосредственно по шка-

ле уровня или весов в г · мм и рассчитывают остаточное значение по формуле

$$D_{\text{стост}} = D_{\text{ст}} \pm \Delta D.$$

На балансировочных станках СБС-1 и СБС-4, не имеющих индикатора дисбаланса, методом подбора находят главный вектор дисбалансов детали после статической балансировки $D_{\text{ст}}$ и рассчитывают $D_{\text{стост}}$ по приведенной выше формуле.

Метод контроля значения главного вектора остаточных дисбалансов с применением контрольного груза используют для всех видов балансировочных станков при малых допустимых дисбалансах деталей $D_{\text{стдоп}} = (1 \dots 2,5) \Delta D$. В общем случае контроль остаточных дисбалансов выглядит так.

В тяжелое место сбалансированной детали устанавливают контрольный груз m_1 и отсчитывают количество делений A_1 по шкале индикатора дисбаланса, например, по шкале уровня.

Переставляют контрольный груз m_1 в легкое место сбалансированной детали и отсчитывают число делений A_2 по шкале индикатора дисбаланса.

Рассчитывают значение главного вектора остаточных дисбалансов детали по формуле

$$D_{\text{стост}} = m_1 r \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2},$$

где r — радиус установки контрольного груза.

Массу контрольного груза выбирают в зависимости от значения допустимого дисбаланса

$$m_1 = (2,5 \dots 5) D_{\text{стдоп}} / r.$$

При контроле остаточного дисбаланса на станках СБС-1, СБС-4, СБС-5 масса контрольного груза, устанавливаемого в легкое и тяжелое место детали, разная. Контрольные грузы, укрепленные в легком и тяжелом месте, должны поворачивать деталь вокруг оси на один и тот же угол. Значение главного вектора остаточных дисбалансов детали рассчитывают по формуле

$$D_{\text{стост}} = \frac{m_1 - m_2}{2} r,$$

где m_1, m_2 — массы контрольных грузов, вызывающие поворот детали на один и тот же угол.

Метод контроля значения главного вектора остаточных дис-

балансов круговым обходом применяют для контроля остаточных дисбалансов, близких порогу чувствительности станка. Контроль остаточных дисбалансов этим методом заключается в следующем.

Окружность детали делят на восемь равных частей. Последовательно в каждую точку окружности устанавливают контрольный груз m_1 на радиусе r и записывают показания индикатора дисбаланса (количество делений шкалы или угол поворота детали).

Находят максимальные A_{\max} и минимальные A_{\min} показания индикатора и рассчитывают значение главного вектора остаточных дисбалансов детали по формуле

$$D_{\text{стост}} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} m_1 r.$$

На балансировочных станках СБС-1 и СБС-4 контроль остаточных дисбалансов можно проводить методом кругового обхода с подбором контрольных грузов в восьми точках детали так, как изложено в п. 2.1. Метод кругового обхода дает наибольшую точность контроля остаточных дисбалансов при статической балансировке.

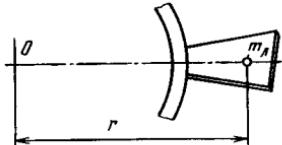
2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ТЕЛ

В балансировочной технике важную роль играют статические, аксиальные и экваториальные моменты инерции тел.

Статические моменты инерции. В процессе изготовления деталей и сборки роторов возникают начальные дисбалансы. Последние для сплошных симметричных роторов относительно малы и не вызывают затруднений при корректировке масс. Так, максимальная неуравновешенная масса маховика тракторного двигателя не превышает 0,2% массы маховика. Начальные дисбалансы сборных роторов турбин, компрессоров, вентиляторов и других лопаточных машин достигают больших значений. Для корректировки масс таких роторов требуется 1 ... 3% массы ротора. Основная причина больших начальных дисбалансов сборных роторов — различия по массе и расположению центра масс лопаток.

С целью минимизации начальных дисбалансов сборных роторов измеряют статические моменты лопаток и проводят их сортировку таким образом, чтобы результирующий дисбаланс рабочего колеса, вызываемый различиями масс и моментов инерции отдельных лопаток, был доведен до минимума.

Рис. 2.12. Статический момент лопатки



Статический момент лопатки равен произведению массы лопатки m_l на расстояние от центра массы лопатки до оси O рабочего колеса r (рис. 2.12) :

$$S = m_l r .$$

Измерения статических моментов лопаток проводят с помощью весов, которые состоят из весового прибора и сменных приспособлений, предназначенных для крепления лопаток и настройки прибора на определенный типоразмер. Принцип действия весового прибора аналогичен принципу действия балансировочного станка для статической балансировки СБС-3б.

Весовой прибор (рис. 2.13) состоит из стойки 1, опоры 2 и рычага 3. На одном конце рычага крепят сменный замок для лопатки, а на другом конце — уравновешивающие грузы. Весовой прибор имеет оптическое устройство и шкалу, по которой производят отсчет показаний.

Эталон-лопатка (рис. 2.14) служит для настройки и тарирования весового прибора. Она состоит из хвостовика 1, корпуса 3, подвижных грузов 2 и 4, с помощью которых можно регулировать положение центра массы лопатки, и подвески 5.

Настройка прибора заключается в уравновешивании подвижной системы весового прибора с эталон-лопаткой, тарировании шкалы и определении порога чувствительности весов для лопаток. Порог чувствительности весов для различных лопаток равен 25 ... 50 г · мм.

Статический момент лопатки определяют следующим образом. Сначала устанавливают лопатку в замок весового прибора и считывают показание A по шкале прибора, являющееся разностью между статическими моментами проверяемой и эта-

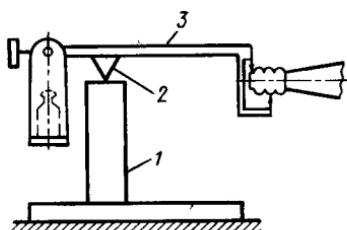


Рис. 2.13. Весовой прибор

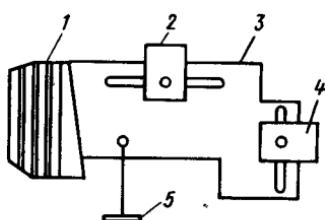


Рис. 2.14. Эталон-лопатка

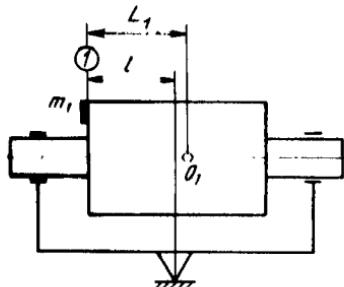


Рис. 2.15. Определение положения центра массы ротора с помощью призмы

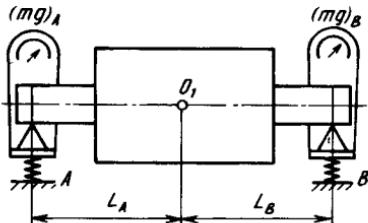


Рис. 2.16. Определение положения центра массы ротора с помощью весов

лон-лопаткой. Затем рассчитывают статический момент прове-ляемой лопатки по формуле

$$S = m_{\text{лэ}} r_n + A,$$

где $m_{\text{лэ}}$ — масса эталон-лопатки; r_n — номинальное значение рабочего плеча рычага.

После измерения статических моментов всех лопаток рас-считывают распределение лопаток в рабочем колесе.

Аксиальные и экваториальные моменты инерции роторов. Для проверки и настройки балансировочных станков, расчета корректирующих масс требуется знание массы, положения центра массы и моментов инерции роторов или изделий в сборе.

Массу роторов определяют взвешиванием на весах различ-ных типов.

Положение центра массы ротора находят экспериментально. Центр массы роторов массой до ста килограммов определяют с помощью призмы. Ротор укладывают в приспособление, кото-рое опирается на призму (рис. 2.15). Несовпадение центра мас-сы ротора с острием призмы создает момент сил тяжести и при-способление с ротором выходит из состояния равновесия. Если ротор наклонился вправо, то в левой части ротора в плоскости 1 на расстоянии l от острия призмы нужно подобрать массу m_1 , создающую момент сил тяжести, равный моменту сил тя-жести ротора. Ротор вернется в положение неустойчивого рав-новесия. Расстояние L_1 от центра массы ротора до массы m_1 рассчитывают по формуле

$$L_1 = \left(1 + \frac{m_1}{m}\right) l.$$

Этим способом определяют положение центра масс ротора с точностью до 0,01 ... 0,05 мм.

Положение центра масс (L_A или L_B) тяжелых роторов находят с помощью весов, на которые укладывают цапфы ро-тора (рис. 2.16). При этом измеряют силы тяжести $m(g)_A$, $m(g)_B$ в опоре A , B и по законам статики рассчитывают положение

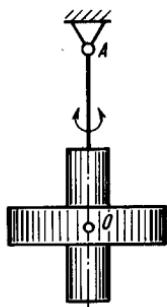


Рис. 2.17. Определение момента инерции ротора способом крутильных колебаний

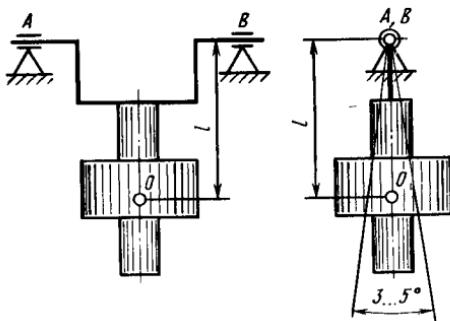


Рис. 2.18. Определение момента инерции ротора способом малых колебаний относительно неподвижной горизонтальной оси

центра масс ротора O_1 .

Аксиальные и экваториальные моменты инерции роторов определяют способом крутильных колебаний или вычисляют по периоду малых колебаний физического маятника.

При определении моментов инерции роторов способом крутильных колебаний ротор подвешивают на нити в центре масс к неподвижной точке (рис. 2.17). Нить закручивают на небольшой угол, после чего ротор отпускают. Он будет совершать крутильные колебания вокруг оси OA . Измеряют время, в течение которого ротор совершил n колебаний ($n = 20 \dots 40$ колебаний), находят период колебаний T по формуле

$$T = t/n.$$

Момент инерции ротора относительно оси OA

$$J = J_0 T^2 / T_0^2,$$

где T_0 — период колебаний эталонного тела с известным моментом инерции J_0 относительно оси OA .

Если ось OA является продольной осью ротора, то в результате расчета находят аксиальный момент инерции. Экваториальный момент инерции определяют, если ось OA перпендикулярна продольной оси ротора.

Физический маятник представляет собой тяжелое твердое тело, имеющее неподвижную горизонтальную ось вращения, которую называют осью подвеса маятника. Ротор, соединенный с осью подвеса (рис. 2.18), будет совершать малые колебания относительно положения равновесия. Момент инерции ротора относительно оси, параллельной оси подвеса и проходящей через центр масс ротора, определяют по формуле

$$J = mgl \left(\frac{T^2}{4\pi^2} - \frac{l}{g} \right),$$

где m — масса ротора, кг, $g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; l — расстояние от оси подвеса до центра массы ротора, м; T — период колебаний, с; $\pi = 3,14$.

ДИНАМИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА

Рассмотрены методы низко- и высокочастотной балансировки; способы контроля остаточных дисбалансов; приведены прикладные программы для вычислений дисбалансов на микроЭВМ.

3.1. ОСНОВЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Динамически неуравновешенный ротор при балансировке рассматривают как полностью сбалансированный ротор, в плоскостях коррекции которого прикреплены точечные неуравновешенные массы. При вращении такого ротора с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной оси возникают переменные нагрузки на опорах ротора \vec{F}_A , \vec{F}_B пропорциональны дисбалансам во всех плоскостях коррекции D_1, D_2, \dots, D_n :

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_A &= \alpha_{A1} \vec{D}_1 + \alpha_{A2} \vec{D}_2 + \dots + \alpha_{An} \vec{D}_n; \\ \vec{F}_B &= \alpha_{B1} \vec{D}_1 + \alpha_{B2} \vec{D}_2 + \dots + \alpha_{Bn} \vec{D}_n. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности α_{ij} называют *балансировочной чувствительностью*, или *чувствительностью по дисбалансу*, и обозначают двумя индексами: первый индекс соответствует названию опоры, а второй — номеру плоскости коррекции. Балансировочная чувствительность зависит от частоты вращения ротора при балансировке, расстояния от плоскости коррекции до опоры, массы, жесткости, демпфирования и других параметров ротора и опор. В общем случае α — векторная величина, определяющая отношение изменения вибраций опоры к изменению измеряемого значения дисбаланса. Балансировочную чувствительность находят путем расчета или экспериментально.

Для жесткого ротора достаточно измерить нагрузки или вибрации опор на постоянной частоте вращения для того, чтобы определить главный вектор и главный момент дисбалансов или два вектора дисбалансов. Эти векторы в общем случае разные по значению и непараллельные, лежат в двух произвольных плоскостях, перпендикулярных оси ротора, и полностью опре-

деляют его динамическую неуравновешенность. Корректировку масс также достаточно провести в двух плоскостях.

Дисбалансы гибкого ротора, определяющие неуравновешенность по n -й форме изгиба, определяют на частотах вращения, близких к соответствующей n -й собственной частоте изгибных колебаний системы ротор—опоры, т. е. на частотах вращения, при которых возникают деформации упругой линии, характерные для n -й формы изгиба. Корректировку масс проводят во многих плоскостях, перпендикулярных осям ротора, по каждой форме изгиба.

Упругодеформируемые роторы балансируют на низких частотах вращения как жесткие роторы. Однако корректирующие массы располагают во многих плоскостях по определенному закону.

Процесс динамической балансировки состоит из следующих этапов.

На постоянной частоте вращения измеряют нагрузки или вибрации опор динамически неуравновешенного ротора.

По результатам измерений вибраций опор путем расчета или экспериментально находят балансировочные чувствительности и дисбалансы в плоскостях измерения. Обычно плоскости измерения совпадают с плоскостями опор ротора.

Рассчитывают дисбалансы в заданных плоскостях коррекции, значения и углы корректирующих масс.

Проводят корректировку масс ротора согласно требованиям технической документации.

В зависимости от заданной точности балансировки, класса ротора, применяемого оборудования и многих других факторов используют различные методы динамической балансировки.

3.2. НИЗКОЧАСТОТНАЯ БАЛАНСИРОВКА

На низкой частоте вращения балансируют жесткие и упругодеформируемые роторы. Балансировку проводят на зарезонансных и дорезонансных станках. На зарезонансном балансировочном станке амплитуды колебаний подвижных опор пропорциональны дисбалансам в двух плоскостях:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_A &= \alpha_{A1} \vec{D}_1 + \alpha_{A2} \vec{D}_2; \\ \vec{U}_B &= \alpha_{B1} \vec{D}_1 + \alpha_{B2} \vec{D}_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

или главному вектору и главному моменту дисбалансов ротора:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_A &= \alpha_{A\text{ct}} \vec{D}_{\text{ct}} + \alpha_{AM} \vec{M}_D; \\ \vec{U}_B &= \alpha_{B\text{ct}} \vec{D}_{\text{ct}} + \alpha_{BM} \vec{M}_D. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для решения этих уравнений проводят настройку балансировочного станка с помощью полностью сбалансированного се-

рийного ротора, называемого *тарировочным ротором*. В процессе настройки станка исключают влияние дисбаланса в одной плоскости на показания индикатора дисбаланса в другой плоскости, связывают цену деления индикатора дисбаланса с единицами коррекции, выбранными для плоскостей, определяют балансировочные чувствительности. В результате настройки приборы балансировочного станка будут показывать значения и угол дисбаланса в каждой плоскости коррекции:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{D}_1 = a_1 \vec{U}_A - b_1 \vec{U}_B; \\ \vec{D}_2 = -a_2 \vec{U}_A + b_2 \vec{U}_B, \end{array} \right\} \quad (4)$$

где коэффициенты

$$\begin{aligned} a_1 &= \alpha_{B2}/\delta, \quad b_1 = \alpha_{A2}/\delta; \\ a_2 &= \alpha_{B1}/\delta, \quad b_2 = \alpha_{A1}/\delta; \\ \delta &= \alpha_{A1}\alpha_{B2} - \alpha_{B1}\alpha_{A2}. \end{aligned}$$

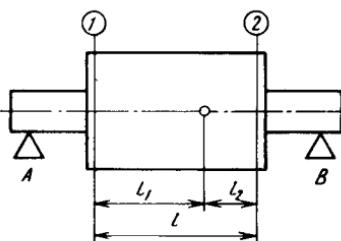
На дорезонасном балансировочном станке измеряют реакции опор при вращении несбалансированного ротора. При постоянной частоте вращения реакции опор можно заменить на дисбалансы в плоскостях опор \vec{D}_A и \vec{D}_B . Тогда дисбалансы в плоскостях коррекции находят по правилам статики, например, для межпоршного ротора (рис. 3.1) дисбалансы будут:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{D}_1 = -\frac{l_1 + l}{l} \vec{D}_A - \frac{l_2}{l} \vec{D}_B; \\ \vec{D}_2 = \frac{l_2 + l}{l} \vec{D}_B - \frac{l_1}{l} \vec{D}_A. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Настройку дорезонасного станка проводят по трем геометрическим параметрам ротора: расстоянию между плоскостями коррекции l и расстояниям от плоскостей опор до соответствующих плоскостей коррекции l_1 , l_2 . В результате настройки приборы станка будут показывать дисбалансы в каждой плоскости коррекции.

Одноплоскостная балансировка уменьшает дисбалансы только в одной плоскости коррекции. Этот метод применяют для динамической балансировки деталей, узлов, роторов различных типов, дисбалансы которых сосредоточены в одной плоскости. К ним относятся: шлифовальные круги, шкивы, тормозные барабаны, вентиляторы и другие роторы, имеющие одну сосредоточенную массу на валу, собранную с малым торцовым биением.

Рис. 3.1. Межпоршный ротор



Сущность одноплоскостной балансировки на предварительно настроенном станке заключается в измерении значения и угла начального дисбаланса в плоскости коррекции по показаниям приборов, расчете корректирующей массы и корректировке масс. На ненастроенном балансировочном станке начальный дисбаланс находят с помощью пробных грузов, устанавливаемых в плоскости коррекции.

В зависимости от измеряемых параметров колебаний опор зарезонансного станка различают методы: амплитуд, фаз и амплитуд и фаз.

Метод амплитуд. Для определения значения и угла начального дисбаланса в плоскости коррекции по этому методу измеряют амплитуды колебаний одной опоры при вращении ротора с различно расположенными пробными грузами.

Окружность ротора в плоскости коррекции делят на восемь равных частей 1, 2, ..., 8 (рис. 3.2). В точке 1 прикрепляют пробный груз $m_{\text{пр}}$ на радиусе r_k и на постоянной частоте вращения ротора измеряют амплитуду колебаний опоры U_1 . Переставляя пробный груз на том же радиусе на 45° , снова измеряют амплитуду колебаний опоры U_2 . Измерения повторяют при различных положениях пробного груза, пока не будет обойдена вся окружность ротора. В результате получают восемь значений амплитуд колебаний опоры U_1, U_2, \dots, U_8 .

В масштабе строят график в координатах мест установки пробного груза и амплитуд колебаний опоры (см. рис. 3.2). Верхняя точка полученной кривой $U_{\text{макс}}$ указывает тяжелое место — угол начального дисбаланса относительно 1-й точки, нанесенной на роторе, а нижняя точка кривой $U_{\text{мин}}$ указывает легкое место.

Максимальная амплитуда колебаний опоры $U_{\text{макс}}$ пропорциональна сумме начального дисбаланса и дисбаланса, созданного пробной массой, а минимальная амплитуда колебаний опоры пропорциональна разности этих дисбалансов:

$$U_{\text{макс}} = \alpha(D_{\text{нач}} + m_{\text{пр}}r_k);$$

$$U_{\text{мин}} = \alpha(D_{\text{нач}} - m_{\text{пр}}r_k).$$

Откуда балансировочная чувствительность

$$\alpha = 2m_{\text{пр}}r_k / (U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}})$$

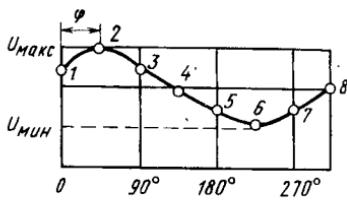
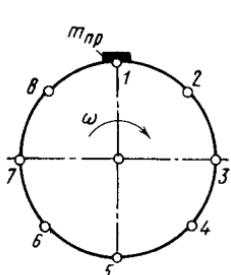


Рис. 3.2. Определение дисбаланса методом амплитуд

и корректирующая масса

$$m_k = m_{\text{пр}} \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{макс}} + U_{\text{мин}}}.$$

Массу пробного груза берут не менее 50% от предполагаемой неуравновешенной массы ротора. В то же время центробежная сила от пробного груза не должна превышать 20% силы тяжести ротора, приходящейся на ближайшую опору, т. е.

$$m_{\text{пр}} \leq 0,2 \frac{\frac{m_A g}{r_k \omega^2}}{.$$

Продолжительность одноплоскостной балансировки способом обхода контрольным грузом достаточно велика. Так, для уменьшения дисбаланса ротора в плоскости коррекции надо сделать 8 ... 12 пусков. Более производительным вариантом метода амплитуд является способ трех пусков.

Способ трех пусков позволяет определить значение и угол начального дисбаланса или корректирующей массы по результатам измерения амплитуд колебаний опоры при трех пусках ротора с пробным грузом, который устанавливают в три произвольные точки окружности ротора в плоскости коррекции.

Окружность ротора делят, обычно, на три равные части 1, 2, 3 (рис. 3.3). Вначале измеряют амплитуду колебаний опоры U_0 ротора без пробного груза $m_{\text{пр}}$, т. е. ротора с начальным дисбалансом. Затем пробную массу последовательно прикрепляют в точках 1, 2, 3 и каждый раз измеряют амплитуды колебаний опоры U_1, U_2, U_3 .

Угол начального дисбаланса находят на основании свойств косоугольных треугольников, решая систему уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} U_1^2 = U_0^2 + U_{10}^2 + 2U_0 U_{10} \cos \varphi; \\ U_2^2 = U_0^2 + U_{20}^2 + 2U_0 U_{20} \cos (\varphi + 120^\circ); \\ U_3^2 = U_0^2 + U_{30}^2 + 2U_0 U_{30} \cos (\varphi + 240^\circ), \end{array} \right\}$$

причем $U_{10} = U_{20} = U_{30}$ — амплитуды колебаний опоры, вызываемые только пробной массой.

Угол φ определяет угол между начальным дисбалансом и положением пробного груза при первом пуске ротора — точкой 1 на окружности:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(U_1^2 - U_3^2)(1 - \cos 120^\circ) - (U_1^2 - U_2^2)(1 - \cos 240^\circ)}{(U_1^2 - U_2^2)\sin 240^\circ - (U_1^2 - U_3^2)\sin 120^\circ}.$$

Подставляя найденное значение φ в любое уравнение, определяют величину U_{10} и корректирующую массу по формуле

$$m_k = m_{\text{пр}} \frac{U_0}{U_{10}}.$$

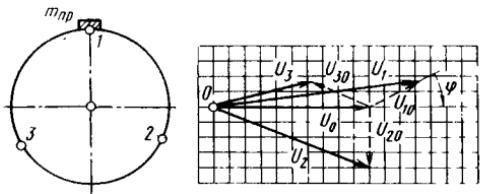


Рис. 3.3. Определение дисбаланса способом трех пусков

Корректирующую массу устанавливают под углом $180^\circ - \varphi$ от места оптимальной установки пробного груза в направлении точки, в которой пробная масса дала промежуточный результат по снижению амплитуды колебаний.

Значение и угол корректирующей массы находят с помощью микроЭВМ по прикладной программе.

Прикладная программа для микроЭВМ "Вычисление значения и угла корректирующей массы при балансировке способом трех пусков".

Вычисляется значение и угол корректирующей массы в плоскости коррекции ротора.

Исходной информацией для расчета является:

U_0 — амплитуда колебаний опоры ротора с начальным дисбалансом;
 U_1, \dots, U_3 — амплитуды колебаний опоры ротора при последовательной установке одного и того же пробного груза под углом 120° ;
 $m_{\text{пр}}$ — масса пробного груза.

Программа 3.1. для микроЭВМ "Электроника" Б3-34, МК-54, МК56-III-II

Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код
01	ИП3	63	21	2	02	41	X	12
02	Fx ²	22	22	÷	13	42	ИПО	60
03	ИП2	62	23	ИП6	66	43	÷	13
04	Fx ²	22	24	—	11	44	ПО	40
05	+	10	25	ИП7	67	45	С/П	50
06	П5	45	26	÷	13	46	ИП5	65
07	ИП1	61	27	П5	45	47	Farccos	1-
08	Fx ²	22	28	ИП6	66	48	П1	41
09	+	10	29	ИП0	60	49	ИП3	63
10	3	03	30	Fx ²	22	50	ИП2	62
11	÷	13	31	—	11	51	—	11
12	П6	46	32	ИП5	65	52	Fx<0	5C
13	ИП0	60	33	X	12	53	56	56
14	Fx ²	22	34	2	02	54	ИП1	61
15	—	11	35	X	12	55	/-	0L
16	F <sqrt></sqrt>	21	36	ПО	40	56	П1	41
17	ИП0	60	37	ИП6	66	57	ИП1	61
18	X	12	38	ИП1	61	58	С/П	50
19	П7	47	39	—	11	59	БП	51
20	ИП5	65	40	ИП4	64	60	00	00

Регистры памяти:

П0 — U_0 , П1 — U_1 ;

П2 — U_2 ; П3 — U_3 ;

П4, П5, П6, П7 — оперативные.

Инструкция балансировщику

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
1. Включите микрокалькулятор			0
2. Перейдите в режим "Программирование"		F ПРГ	00
3. Занести программу 3.1			
4. Перейдите в режим "Работа" и очистите программный счетчик		F АВТ В/О	0
5. Проверьте правильность набора программы			
5.1. Введите контрольную исходную информацию	1 0 3	х ПО; х П4 х П1 F $\sqrt{ };$ х П2; х П3	1 0 1,73...
5.2. Перейдите к выводу результатов		С/П С/П	1 0
6. Вычислите значение и угол корректирующей массы			
6.1. Занесите исходную информацию для расчета	$U_0;$ $U_1;$ $U_2;$ U_3	х ПО; х П1 х П2; х П3 х П4	U_0, U_1 U_2, U_3 $m_{\text{пр}}$
6.2. Перейдите к выводу результатов		С/П С/П	m_k massa φ_k угол

Для вычисления значения и угла корректирующей массы ротора той же геометрии с новыми исходными данными выполните инструкцию, начиная с п. 6.

З а м е ч а н и я: 1. Угол корректирующей массы отсчитывать от положения пробного груза при первом пуске ротора. 2. Угол корректирующей массы соответствует "легкому месту".

Метод амплитуд и фаз. Этот метод предусматривает одновременное измерение амплитуды и фазы колебаний опоры при балансировке ротора. При одноплоскостной балансировке теоретически достаточно двух пусков ротора: первый пуск ротора с начальным дисбалансом и второй пуск ротора с пробной массой.

На постоянной частоте вращения измеряют амплитуду U_0 и фазу φ_0 колебаний опоры ротора с начальным дисбалансом. Затем в произвольной точке на окружности ротора в плоскости коррекции прикрепляют пробную массу $m_{\text{пр}}$ и на той же частоте вращения вновь измеряют амплитуду U_1 и фазу φ_1 колебаний опоры.

В системе координат, связанной с ротором (рис. 3.4) строят вектор U_0 , откладывая под углом φ_0 отрезок, длина которого, в выбранном масштабе, равна амплитуде колебаний U_0 ,

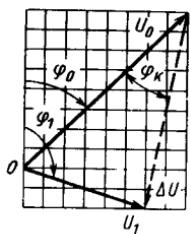


Рис. 3.4. Определение дисбаланса методом амплитуд и фаз

и вектор \vec{U}_1 . Вектор \vec{U}_0 пропорционален вектору начального дисбаланса $\vec{D}_{\text{нач}}$:

$$\vec{U}_0 = \alpha \vec{D}_{\text{нач}},$$

а вектор \vec{U}_1 пропорционален сумме дисбалансов:

$$\vec{U}_1 = \alpha (\vec{D}_{\text{нач}} + m_{\text{пр}} r \vec{k}).$$

Концы этих векторов соединяют и получают векторный треугольник вибраций, находят вектор

$$\Delta \vec{U} = \vec{U}_1 - \vec{U}_0 = \alpha m_{\text{пр}} r \vec{k}.$$

и балансировочную чувствительность

$$\alpha = \Delta U / m_{\text{пр}} r k.$$

Значение корректирующей массы, или начального дисбаланса, вычисляют по формуле

$$m_k = m_{\text{пр}} U_0 / \Delta U \text{ или } D_{\text{нач}} = \alpha U_0.$$

Угол корректирующей массы φ_k получают из векторного треугольника.

Корректирующую массу устанавливают в плоскости под углом φ_k , отсчет которого при стrobоскопическом способе измерения фазы ведется в направлении, противоположном изменению фазы колебаний.

Значение и угол корректирующей массы можно вычислить аналитическим способом или с помощью микроЭВМ по прикладной программе.

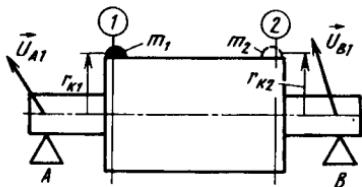
Балансировка в двух плоскостях уменьшает дисбалансы ротора в двух плоскостях коррекции. Этот метод применяют для динамической балансировки деталей, узлов и жестких роторов: колес легковых автомобилей, узлов коленчатых валов, роторов электродвигателей, приводов металлообрабатывающих станков и многих других изделий машиностроения.

Сущность двухплоскостной балансировки на предварительно настроенном станке заключается в последовательном или одновременном измерении значений и углов начальных дисбалансов ротора в двух плоскостях коррекции по показаниям приборов станка, расчете корректирующих масс и корректировке масс в обеих плоскостях.

На ненастроенном балансировочном станке начальные дисбалансы находят с помощью пробных грузов, устанавливаемых в плоскостях коррекции или плоскостях измерения.

Находят амплитуды и фазы колебаний двух опор U_A , U_B , φ_A , φ_B ротора с исходными начальными дисбалансами. В плоскости коррекции 1 на радиусе $r_k 1$ прикрепляют пробный груз m_1 и вновь измеряют колебания опор U_{A1} , U_{B1} , φ_{A1} , φ_{B1} .

Рис. 3.5. Двухплоскостная балансировка с помощью пробных грузов



(рис. 3.5). Снимают груз m_1 , прикрепляют в плоскости коррекции 2 на радиусе r_{k2} пробный груз m_2 и измеряют колебания опор ротора $U_{A2}, U_{B2}, \varphi_{A2}, \varphi_{B2}$.

В системе координат, связанной с ротором, строят векторы вибраций опор и графическим путем находят балансировочные чувствительности, как описано в методе амплитуд и фаз $\alpha_{A1}, \alpha_{A2}, \alpha_{B1}, \alpha_{B2}$.

Рассчитывают коэффициенты уравнений (4):

$$a_1, a_2, b_1, b_2.$$

В той же системе координат, но в другом масштабе строят векторы $a_1 \bar{U}_A; -b_1 \bar{U}_B; -a_2 \bar{U}_A; b_2 \bar{U}_B$ и графическим способом вычисляют значения D_1, D_2 и углы φ_1, φ_2 начальных дисбалансов в плоскостях коррекции. Определяют неуравновешенные массы и проводят корректировку масс в обеих плоскостях.

Статико-моментная балансировка уменьшает главный вектор и главный момент дисбалансов ротора. Этот метод применяют для статической, моментной и динамической балансировки деталей, узлов, жестких и упругодеформируемых роторов: маховиков, крыльчаток центробежных насосов, вентиляторов, турбин, турбокомпрессоров и других консольных и двухконсольных роторов.

Статико-моментную балансировку проводят на предварительно настроенном станке или на ненастроенном станке с помощью пробных грузов.

На предварительно настроенном станке с разделением главного вектора и главного момента последовательно измеряют и уменьшают главный вектор и главный момент начальных дисбалансов ротора по показаниям приборов станка.

Балансировку проводят в следующей последовательности.

Измеряют значение и угол главного вектора дисбалансов. Рассчитывают значение неуравновешенной массы и проводят корректировку масс в одной плоскости. Если уменьшение D_{ct} предусмотрено в двух плоскостях, то корректирующие массы в этих плоскостях определяют по законам статики. Затем измеряют значение и угол главного момента дисбалансов. Рассчитывают пару дисбалансов и неуравновешенные массы для двух плоскостей, проводят корректировку масс. При совпадении плоскости коррекции, в которой устраняется D_{ct} , с центром массы ротора одновременно измеряют и уменьшают главный вектор и главный момент дисбалансов.

На предварительно настроенном станке с разделением двух

плоскостей статико-моментную балансировку проводят расчетным путем.

По показаниям приборов станка находят значения D_1 , D_2 и углы φ_1 , φ_2 дисбалансов в плоскостях измерения. Главный вектор и главный момент дисбалансов определяют по формулам:

$$\vec{D}_{\text{ст}} = \vec{D}_1 + \vec{D}_2;$$

$$\vec{M}_D = \vec{D}_1 L_1 \pm \vec{D}_2 L_2,$$

где L_1 , L_2 — расстояние от плоскостей измерения 1, 2 до центра масс ротора; знак плюс ставят, если угол между векторами \vec{D}_1 и \vec{D}_2 острый, а знак минус — при тупом угле.

Программа 3.2 для микроЭВМ "Электроника" Б3-34, МК-54, МК-56-III-II

Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код
00	2	02	6	F $\sqrt{}$	21	70	X	12
1	ПО	40	7	П6	46	1	ИП9	69
2	Сх	ОГ	8	С/П	50	2	+	10
3	П8	48	9	ИП8	68	3	П9	49
4	П9	49	40	ИП6	66	4	\neq	14
5	FLO	5Г	1	\div	13	5	ИП8	68
6	17	17	2	Farccos	1—	6	+	10
7	ИП1	61	3	П7	47	7	П8	48
8	ИПА	6—	4	ИП9	69	8	B/O	52
9	X	12	5	F $x < 0$	5C			
10	П1	41	6	53	53			
1	ИП3	63	7	3	03			
2	ИПВ	6L	8	6	06			
3	X	12	9	0	00			
4	П3	43	50	ИП7	67			
5	БП	51	1	—	11			
6	25	25	2	П7	47			
7	ИП1	61	3	ИП7	67			
8	ИПС	6c	4	C/П	50			
9	X	12	5	FLO	5Г			
20	П1	41	6	00	00			
1	ИП3	63	7	БП	51			
2	ИПД	6Г	8	02	02			
3	X	12	9	↑	ОЕ			
4	П3	43	60	F sin	1C			
5	ИП4	64	1	F,	25			
6	ПП	53	2	Fcos	1Г			
7	59	59	3	\geq	14			
8	ИП1	61	4	x	12			
9	ИП2	62	5	FBx	0			
30	ПП	53	6	\Rightarrow	14			
1	59	59	7	F,	25			
2	F x^2	22	8	\Rightarrow	14			
3	\geq	14	9	F,	25			
4	F x^2	22						
5	+	10						

Регистры памяти
П1 m_1 , П2 φ_1
П3 m_2 , П4 φ_2
ПА l_1 , ПВ l_2
ПС r_1 , ПД r_2
П6 $D_{\text{ст}}$, M_D
П7 φ_D , φ_M

ПО, П8, П9 — оперативные

Инструкция балансировщику

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
1. Включите микрокалькулятор			0
2. Перейдите в режим "Программирование"		F ПРГ	00
3. Занесите программу 3.2			
4. Очистите программный счетчик		F АВТ В/О	0
5. Установить переключатель Г/Р/ГРД в положение "Г"			
6. Проверьте правильность набора программы			
6.1. Введите контрольную исходную информацию	3 4 1 90 180	П1; ПВ П3; ПА ПС; ПД П2 П4 В/О, С/П С/П С/П С/П	3 4 1 90 180 5 143, 1301 16, 97 ... 135 135
6.2. Перейдите к выводу результатов			
6.3. Очистите программный счетчик		F АВТ/В/О	
7. Вычислите значения и углы главного вектора и главного момента дисбалансов ротора			
7.1. Занесите исходную информацию для расчета	m_1 ; m_2 φ_1 ; φ_2 l_1 ; l_2	П1; П3 П2; П4 ПА; ПВ С/П	m_1 ; m_2 φ_1 ; φ_2 l_1 ; l_2 значение D_{ct}
7.2. Перейдите к выводу результатов		С/П С/П С/П	угол φ_D значение M_D угол φ_M

Корректирующие массы в заданных плоскостях коррекции находят по законам статики, а векторы \vec{D}_{ct} и \vec{M}_D определяют по прикладной программе с помощью микроЭВМ.

Прикладная программа для микроЭВМ "Вычисление значения и угла главного вектора и главного момента дисбалансов".

Вычисляются значения и углы главного вектора и главного момента дисбалансов ротора.

Исходной информацией для расчета являются:

m_1 , m_2 — уравновешивающие массы в плоскостях измерения 1, 2;
 φ_1 , φ_2 — угловое положение уравновешивающих масс относительно выбранного начала отсчета, связанного с ротором;

r_1 , r_2 — радиусы постановки уравновешивающих масс;

l_1 , l_2 — расстояния от плоскостей измерения до центра масс ротора.

Для вычисления значений и углов главного вектора и главного момента дисбалансов ротора той же геометрии с новыми исходными данными необходимо выполнять инструкцию, начиная с п. 7.

З а м е ч а н и я: 1. Расстояние l_1 , l_2 вводить со знаком минус, если плоскость измерения l_1 , l_2 расположена слева от центра масс ротора.

2. Угловое положение уравновешивающих масс φ_1 , φ_2 отсчитывать против часовой стрелки для 1-й и 2-й плоскостей измерения.

Пример. Вычислить значения и углы главного вектора и главного момента дисбалансов ротора, сбалансируемого в двух плоскостях измерения. Исходные данные для расчета: $m_1 = 3$ г; $m_2 = 4$ г; $\varphi_1 = 90^\circ$; $\varphi_2 = 180^\circ$; $l_1 = 40$ мм; $l_2 = 30$ мм; $r_1 = r_2 = 100$ мм. Ответ: $D_{\text{ст}} = 500$ г · мм; $\varphi_{\text{ст}} = 143^\circ$; $M_D = 16970$ г · мм²; $\varphi_M = 135^\circ$.

На ненастроенном станке главный вектор и главный момент находят с помощью пробных грузов, устанавливаемых в плоскости коррекции или измерения (рис. 3.6).

Вначале измеряют амплитуды и фазы колебаний двух опор ротора с начальной статической и моментной неуравновешенностью U_A , U_B , φ_A , φ_B . Затем в плоскости, перпендикулярной оси ротора (рис. 3.6, а) и проходящей через его центр масс, прикрепляют на радиусе $r_{\text{ст}}$ пробную массу $m_{\text{ст}}$, вызывающую только статическую неуравновешенность, и вновь измеряют колебания опор

$$U_{A \text{ ст}}, U_{B \text{ ст}}, \varphi_{A \text{ ст}}, \varphi_{B \text{ ст}}.$$

На консольном роторе для создания статической неуравно-

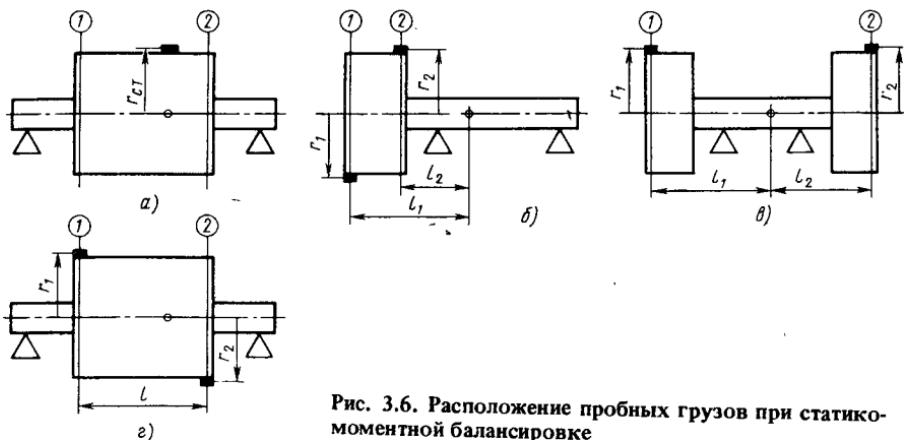


Рис. 3.6. Расположение пробных грузов при статико-моментной балансировке

вешенности устанавливают пробные массы $m_{\text{ст}1}$, $m_{\text{ст}2}$ в двух плоскостях на радиусах r_1 и r_2 , как показано на рис. 3.6, б. Значения этих масс рассчитывают по формулам:

$$m_{\text{ст}1} = m_{\text{ст}} \frac{r_{\text{ст}}}{r_1} \frac{l_2}{l_1 - l_2};$$

$$m_{\text{ст}2} = m_{\text{ст}} \frac{r_{\text{ст}}}{r_2} \frac{l_1}{l_1 - l_2}.$$

Пробные массы на двухконсольном роторе устанавливают параллельно друг другу (рис. 3.6, в). Значения пробных масс:

$$m_{ct1} = m_{ct} \frac{r_{ct}}{r_1} \frac{l_2}{l_1 + l_2};$$

$$m_{ct2} = m_{ct} \frac{r_{ct}}{r_2} \frac{l_1}{l_1 + l_2}.$$

Третий пуск ротора проводят с двумя пробными массами, вызывающими только моментную неуравновешенность. Массы прикрепляют в двух параллельных плоскостях под углом 180° . Значение второй пробной массы связано с первой соотношением

$$m_{M2} = m_{M1} \frac{r_1}{r_2}.$$

Эти две массы создают пару дисбалансов на плече l (рис. 3.6, г), равную главному моменту дисбалансов:

$$M_D = m_{M1} r_1 l.$$

В системе координат, связанной с ротором, строят векторы вибраций опор и так же, как при двухплоскостной балансировке находят балансировочные чувствительности $\alpha_{A\text{ ст}}, \alpha_{A\text{ M}}, \alpha_{B\text{ ст}}, \alpha_{B\text{ M}}$.

Рассчитывают коэффициенты уравнений (4) и графическим способом вычисляют значения D_{ct}, M_D и углы φ_{ct}, φ_M начальных дисбалансов. По тем же формулам, что и пробные, определяют корректирующие массы. Проводят корректировку масс.

Статическая балансировка в динамическом режиме уменьшает только главный вектор начальных дисбалансов ротора. Эту балансировку проводят на универсальных станках с горизонтальной или специальных станках с вертикальной осью вращения. Для определения главного вектора дисбалансов при статической балансировке в динамическом режиме применяют те же способы, что и при статико-моментной балансировке.

Модульная балансировка уменьшает начальные и технологические дисбалансы деталей и узлов, допускающих замену их в роторе без последующей балансировки ротора. Такие детали и узлы называют модулями. Модулем может быть колесо вентилятора, якорь электродвигателя, узел компрессора и другие

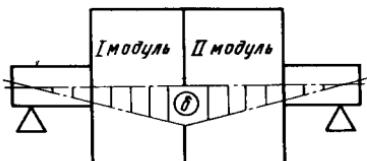


Рис. 3.7. Неуравновешенность жесткого ротора модульной конструкции

узлы, конструкция которых отвечает следующим требованиям:

1. Модули должны допускать не менее двух взаимных угловых положений одного модуля относительно другого с углом, близким к 180° .

2. На каждом модуле должны быть предусмотрены плоскости коррекции.

3. Все посадки в стыках модулей должны иметь гарантированные натяги.

4. Отклонение массы модуля от номинального значения не должно превышать 2%.

Основные положения модульной балансировки состоят в следующем.

Неуравновешенность жесткого ротора, состоящего из двух модулей (рис. 3.7), обусловлена смещением главных центральных осей каждого модуля относительно собственной геометрической оси, определяемой центром цапфы и центрирующей поверхностью сопряжения модулей, а также смещением геометрической оси модуля относительно оси ротора. Излом осей в плоскости стыка возникает за счет погрешности изготовления центрирующих поверхностей I и II модуля:

$$\vec{\delta} = \vec{\delta}_1 + \vec{\delta}_2,$$

где $\vec{\delta}_1$ — смещение оси ротора вследствие погрешности изготовления центрирующих поверхностей I модуля; $\vec{\delta}_2$ — смещение оси ротора вследствие погрешностей изготовления центрирующих поверхностей II модуля.

При этом главный вектор начальных дисбалансов ротора можно представить в следующем виде:

$$\vec{D}_{\text{ст нач}} = \vec{D}_{\text{ст нач 1}} + \vec{D}_{\text{ст нач 2}} + \vec{D}_{\text{ст нач 3}} + \vec{D}_{\text{ст нач 4}},$$

здесь $D_{\text{ст нач 1}}$ ($D_{\text{ст нач 2}}$) — начальный дисбаланс I и II модуля; $D_{\text{ст нач 3}}$ ($D_{\text{ст нач 4}}$) — технологический дисбаланс I и II модуля, обусловленный погрешностями центрирующих поверхностей. Аналогичное выражение можно записать и для главного момента начальных дисбалансов ротора.

Если на каждом модуле устранить начальные и технологические дисбалансы, то модули будут отбалансированы так, что они будут полностью взаимозаменяемы. Любой отбалансированный таким образом I модуль может быть собран с любым II модулем в произвольном взаимном положении без последующей балансировки.

В зависимости от конструктивно-технологических особенностей

настей модули балансируют с применением имитаторов или по двум сборкам ротора.

Способ модульной балансировки с применением имитаторов заключается в том, что каждый модуль ротора балансируют в сборе с имитатором.

Последний представляет собой полностью сбалансированный узел, имитирующий другой модуль ротора по моментам инерции, массе и геометрии и имеющий биение цапфы относительно сопрягаемых поверхностей, равное "нулю". В этом случае дисбалансы ротора, возникающие при сборке модуля с имитатором, обусловлены начальными и технологическими дисбалансами только модуля.

При динамической балансировке с применением имитаторов определяют дисбалансы ротора одним из методов, изложенных выше, например, в двух плоскостях измерения. Пересчитывают дисбалансы в плоскости коррекции модуля по законам статики. Находят корректирующие массы и проводят корректировку масс в плоскостях, расположенных на балансируемом модуле. Таким способом балансируют каждый модуль ротора со своим имитатором.

Балансировка модулей по двум сборкам ротора предусматривает уменьшение дисбалансов в четырех плоскостях коррекции, две из которых расположены на I модуле, а два другие — на II модуле.

Собирают ротор из двух модулей (рис. 3.8) и определяют дисбалансы в плоскостях измерения D_{A1}, D_{B1} (или D_{ct1}, M_{D1}). Разбирают ротор на модули и вновь собирают при другом взаимном положении модулей, отличающихся от первоначального на угол φ , например, $\varphi = 180^\circ$. Определяют дисбалансы в плоскостях измерения D_{A2}, D_{B2} после второй сборки.

Рассчитывают по прикладной программе на ЭВМ дисбалансы в плоскостях коррекции I и II модулей (см. с. 84).

Затем проводят корректировку масс каждого модуля.

Способ балансировки по двум сборкам используют также для балансировки деталей роторов немодульной конструкции с целью уменьшения технологических дисбалансов, обусловленных погрешностями центрирующих поверхностей балансировочной оправки.

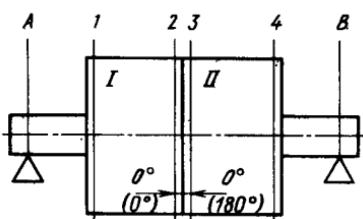


Рис. 3.8. Расположение модулей при сборке для модульной балансировки

БАЛАНСИРОВКА ДЛЯ МОДУЛЬНОЙ СБОРКИ
 РОТОР НД ИЗДЕЛИЕ А № 015 СБОРКА № 02 ДАТА 86.05.15.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ЗНАЧЕНИЯ И УГЛЫ ДИСБАЛАНСОВ

ЧАСТИ РОТОРА РАЗВЕРНУТЫ НУЛИ СОВМЕЩЕНЫ

ПЛОСКОСТЬ 1 (Г.ММ)	ПЛОСКОСТЬ 2 (Г.ММ)	ПЛОСКОСТЬ 1 (Г.ММ)	ПЛОСКОСТЬ 2 (Г.ММ)
11100	94	9340	108

19700 102 1870 356

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ РАССТОЯНИЯ

ДО ПЛ 1 0,000	ДО ПЛ 2 0,450	ДО ПЛ 3 0,450	ДО ПЛ 4 1,000
------------------	------------------	------------------	------------------

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

ПЕРВЫЙ МОДУЛЬ ВТОРОЙ МОДУЛЬ

ПЛОСКОСТЬ 1 (Г.ММ)	ПЛОСКОСТЬ 2 (Г.ММ)	ПЛОСКОСТЬ 1 (Г.ММ)	ПЛОСКОСТЬ 2 (Г.ММ)
5020	100	9790	100

1810 230 4830 307

Собирают ротор из неуравновешенной детали и полностью сбалансируют балансировочной оправки. Определяют дисбалансы ротора в плоскостях измерения или плоскостях коррекции, например, главный вектор начальных дисбалансов $\vec{D}_{\text{ст}1}$. Затем снимают деталь с оправки, поворачивают ее на 180° относительно оправки и проводят вторую сборку ротора. Вновь определяют $\vec{D}_{\text{ст}2}$. Рассчитывают начальные дисбалансы детали (в нашем примере $\vec{D}_{\text{стнач}}$) по формуле

$$\vec{D}_{\text{стнач}} = \frac{1}{2} (\vec{D}_{\text{ст}1} - \vec{D}_{\text{ст}2}),$$

или по прикладной программе на ЭВМ. Проводят корректировку масс в плоскостях, расположенных на балансируемой детали.

Многоплоскостная балансировка уменьшает дисбалансы ротора во многих плоскостях (более двух) коррекции. Этот метод применяют для динамической балансировки упругодеформируемых роторов: валов, роторов многоступенчатых компрессоров, насосов, турбин и других межпорочных роторов.

В основе метода лежит определение на низкой частоте вращения начальных дисбалансов ротора в двух плоскостях измерения и корректировка маес во многих плоскостях вдоль оси ротора.

Дисбалансы в плоскостях коррекции и корректирующие массы роторов с известным осевым распределением дисбалансов рассчитывают по формулам, описывающим данный закон распределения. Так неуравновешенность по первой форме изгиба уменьшают в трех плоскостях коррекции, дисбалансы в которых рассчитывают по формулам:

$$\vec{D}_1 = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \vec{D}_B - \frac{\alpha}{2} \vec{D}_A;$$

$$\vec{D}_2 = \alpha(\vec{D}_A + \vec{D}_B);$$

$$\vec{D}_3 = (1 - \frac{\alpha}{2})\vec{D}_A - \frac{\alpha}{2}\vec{D}_B,$$

где α — коэффициент первой формы изгиба.

Дисбалансы в плоскостях коррекции роторов с неизвестным осевым распределением дисбалансов считают пропорциональными смещению оси ротора относительно его главной центральной оси инерции:

$$\vec{D}_i = \frac{m_i}{m} \vec{D}_{ct} \pm \frac{m_il_i}{J_z} \vec{M}_D,$$

где m_i — условная дискретная масса ротора, приведенная к i -й плоскости коррекции, например, масса диска компрессора; l_i — расстояние от i -й плоскости коррекции до центра масс ротора.

Число и расположение плоскостей коррекции на роторе, а также закон распределения дисбалансов вдоль оси ротора устанавливают в результате предварительных экспериментально-аналитических исследований ротора на низких и высоких частотах вращения.

В общем случае методика низкочастотной многоплоскостной балансировки заключается в следующем.

На низкой частоте вращения определяют значения и углы дисбалансов ротора в двух плоскостях измерения $D_A, \varphi_A, D_B, \varphi_B$.

Рассчитывают дисбалансы в плоскостях коррекции по формуле

$$\vec{D}_i = a_i \vec{D}_A + b_i \vec{D}_B,$$

где a_i, b_i — соответствующие коэффициенты для i -й плоскости коррекции. Находят корректирующие массы в каждой плоскости:

$$m_i = D_i/r_{ki}.$$

Проводят корректировку масс ротора последовательно в каждой плоскости или одновременно во всех плоскостях.

Расчет \vec{D}_i и m_i выполняют на микроЭВМ по прикладной программе.

Прикладная программа для микроЭВМ "Вычисление значений и углов дисбалансов в плоскостях коррекции при многоплоскостной балансировке".

Вычисляются значения и углы дисбалансов ротора в плоскостях коррекции. Число плоскостей коррекции от 2 до 9.

Исходной информацией для расчета являются:

значения дисбалансов ротора D_A, D_B в плоскостях измерения A, B ; угол φ между векторами дисбалансов \vec{D}_A и \vec{D}_B ; a_i, b_i ($i = 1, 2, \dots, 9$), машинные коэффициенты для каждой плоскости коррекции.

З а м е ч а н и е. Угол φ принимают со знаком плюс при отсчете против часовой стрелки от \vec{D}_A к \vec{D}_B . Угол φ_i со знаком плюс в результате озна-

чает отсчет угла установки корректирующей массы от D_A против часовой стрелки.

Программа 3.3 для микроЭВМ "Электроника" Б3-34, МК-54, МК56-III-II

Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код
00	ИПВ	6L	6	/—/	OL	2	1	01
1	ИПС	6C	7	ПД	4Г	3	→	14
2	F sin	1C	8	С/П	50	4	—	11
3	X	12	9	F,	25	5	F Bx	0
4	ПО	40	40	÷	13	6	→	14
5	ИПВ	6L	1	Farccos	1—	7	Fx < 0	5C
6	ИПС	6c	2	ИПС	6C	8	80	80
7	F cos	1Г	3	F x < 0	5C	9	→	14
8	X	12	4	48	48	80	F,	25
9	Пв	4L	5	F,	25	1	→	14
10	Cx	ОГ	6	/—/	0L	2	0	00
1	С/П	50	7	↑	OE	3	,	0-
2	ПД	4Г	8	F,	25	4	1	01
3	КИПД	ГГ	9	ПС	4C	5	→	14
4	ПП	53	50	С/П	50	5	—	11
5	53	53	1	БП	51	7	F Bx	0
6	↑	OE	2	12	12	8	→	14
7	ИПО	60	3	↑	OE	9	Fx < 0	5C
8	X	12	4	↑	OE	90	92	92
9	ПС	4C	5	1	01	1	→	14
20	F,	25	6	,	0-	2	F,	25
1	ИПВ	6L	7	8	08	3	1	01
2	X	12	8	F 1/x	23	4	0	00
3	≥	14	9	—	11	5	X	12
4	ИПА	6-	60	1	01	6	B/O	52
5	X	12	1	ВП	OC	Регистры памяти		
6	+	10	2	7	07	ПО — опер. ПА — D_A		
7	↑	OE	3	+	10	ПИ — T_{11}, T_{12} ПВ — D_B		
8	F_x^2	22	4	F Bx	0	...		
9	ИПС	6C	5	—	11	$\Pi_5 - T_{15}, T_{25}$ ПС —		
						...		
						φ, φ_i		
30	F_x^2	22	6	—	11	$\Pi_9 - T_{19}, T_{29}$ П — m_{ki}		
1	+	10	7	F Bx	0			
2	$F\sqrt{ }$	21	8	ВП	OC			
3	↑	OE	9	3	03			
4	ВП	OC	70	/ — /	OL			
5	1	01	1	↑	OE			

Инструкция балансировщику

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
------------	---------------	-------------------	-----------

1. Включите микро-
калькулятор

2. Перейдите в режим
"Программирование"

3. Занесите програм-
му 3.3

F ПРГ

ПРГ

00

Продолжение инструкции

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
4. Очистите програм- мный счетчик		F АВТ В/О	0
5. Установите переклю- чатель Г/Р/ГРД в поло- жение "Г"			
6. Проверьте правиль- ность набора программы			
6.1. Введите конт- рольную исходную ин- формацию	600,12 400 200,02 0,04 1200,06 50 50 60	П1 П2 П3 П4 П5 ПА ПВ ПС	600,12 400 200,02 0,04 1200,06 50 60
6.2. Перейдите к вы- воду результатов	1	В/О С/П С/П С/П	0 2,645 ... -19,1 ...
6.3. Очистите про- граммный счетчик		F АВТ/В/О	
7. Вычислите значе- ние и угол дисбаланса в каждой плоскости коррекции			
7.1. Занесите исход- ную информацию для расчета	a_1, b_1 a_2, b_2 \dots a_9, b_9 D_A D_B φ	П1 П2 П9 ПА ПВ ПС В/О С/П С/П	a_1, b_1 a_2, b_2 \dots a_9, b_9 D_A D_B φ 0 значение D_1 угол φ_1 значение D_2
7.2. Перейдите к вы- воду результатов	1 2	С/П С/П	угол φ_2
		C/П	

Коэффициенты a_i и b_i можно рассчитать по формулам

$$a_i = \frac{m_i}{r_i} \left(\frac{1}{m} + \frac{l_A l_i}{\sum m_i l_i^2} \right),$$

$$b_i = \frac{m_i}{r_i} \left(\frac{1}{m} - \frac{l_B l_i}{\sum m_i l_i^2} \right).$$

В регистрах памяти микрокалькулятора коэффициенты размещаются попарно (0000, 0000 — до запятой — коэффици-

ент a , после запятой — коэффициент b , табл. 3.1. Первая цифра в отведенных для коэффициента ячейках означает его знак (0 соответствует плюсу, а 1 — минусу). Например, для контрольной информации (п. 6.1 инструкции).

Таблица 3.1

Размещение коэффициентов в регистрах памяти

Регистр	Значения коэффициентов		В памяти микрокалькулятора
	a_i	b_i	
П1	0,6	-0,2	600,12
П2	0,4	0	400,
П3	0,2	0,2	200,02
П4	0	0,4	4,—02
П5	-0,2	0,6	1200,06

3.3. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ БАЛАНСИРОВКА

На высоких частотах вращения балансируют гибкие роторы, которые невозможно сбалансировать низкочастотными методами, например, роторы крупных электродвигателей, бумагоделательных машин, двухполюсных и многополюсных генераторов, паровых и газовых турбин и другие роторы с неуравновешенностью по 1-й, 2-й и более высоким формам изгиба. В рабочем диапазоне частот вращения этих роторов лежит несколько критических скоростей, так, например, критические скорости ротора генератора ТВ2-150-2 равны 933 и 3400 c^{-1} .

Основное отличие высокочастотной балансировки от низкочастотной состоит в том, что кроме уменьшения динамических нагрузок на опоры снижают также динамический прогиб ротора во всем рабочем диапазоне частот вращения. Высокочастотную балансировку приводят на частотах, близких к критическим, при которых ротор изгибается по соответствующей форме (1-й, 2-й и т. д.). На этой частоте измеряют вибрации опор при пусках ротора с исходной неуравновешенностью и с пробными грузами. Последовательно определяют и устраняют дисбалансы по формам изгиба во многих плоскостях коррекции, устанавливая единичные корректирующие массы или системы корректирующих масс вдоль оси ротора. Значение и углы корректирующих масс вычисляют на ЭВМ по прикладным программам. Качество высокочастотной балансировки оценивают по уровню вибраций опор на стенде или на месте установки.

Основными методами балансировки гибких роторов являются:

- балансировка по формам изгиба ротора,
- комбинированная балансировка,

балансировка с использованием коэффициентов влияния.

Метод балансировки по формам изгиба применяют на разгонно-балансировочных стендах при изготовлении межпорных роторов, имеющих ярко выраженную неуравновешенность по 1-й или 2-й форме с критическими частотами, близкими к рабочей частоте вращения.

Методика балансировки состоит в следующем.

Ротор разгоняют до частоты, близкой к 1-й критической скорости, и измеряют вибрации опор. В средней плоскости ротора прикрепляют пробную массу (рис. 3.9, а) и измеряют вибрации на той же частоте вращения. По результатам двух пусков ротора рассчитывают значение и угол корректирующей массы и проводят корректировку масс в средней плоскости.

Затем ротор разгоняют до скорости, близкой ко 2-й критической, при условии, что эта скорость ниже наибольшей рабочей скорости, и измеряют вибрации опор. В двух крайних плоскостях прикрепляют пару таких пробных масс под углом 180° (рис. 3.9, б), которые не вызывают дисбаланса по 1-й форме изгиба, и вновь измеряют вибрации опор. После расчета и установки корректирующих масс переходят к балансировке по 3-й форме изгиба или добавлению балансировке ротора на рабочей частоте, если она лежит между критическими, по той ближайшей форме, которая осталась недостигнутой.

Комбинированный метод балансировки применяют на разгонно-балансировочных стенах с целью уменьшения главного вектора и главного момента дисбалансов ротора как жесткого.

Вначале проводят низкочастотную балансировку ротора в докритической области.

Затем ротор раскручивают до частоты, близкой к первой критической частоте, и измеряют вибрации опор. В трех плоскостях прикрепляют пробные массы (рис. 3.10, а), не нарушающие сбалансированность ротора как жесткого. Дисбалансы, создаваемые пробными массами в крайних плоскостях, связаны с дисбалансом в средней плоскости соотношениями:

$$D_1 = D_3 \frac{b}{a + b}, \quad D_5 = D_3 \frac{a}{a + b}.$$

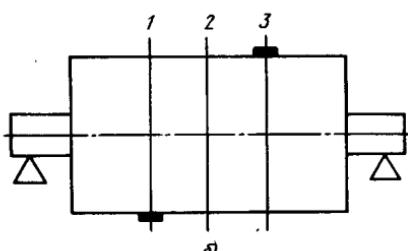
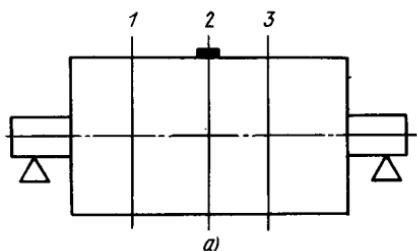


Рис. 3.9. Расположение пробных масс при балансировке гибкого ротора по формам изгиба

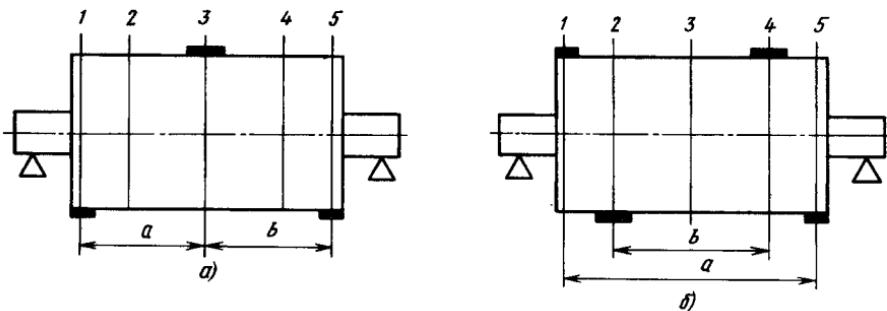


Рис. 3.10. Расположение пробных масс при балансировке гибкого ротора комбинированным методом

Измеряют вибрации опор ротора с системой пробных грузов, рассчитывают и устанавливают корректирующие массы в 1,3 и 5-й плоскостях.

После балансировки по 1-й форме ротор раскручивают до частоты, близкой ко 2-й критической скорости, и измеряют вибрации опор. В четырех плоскостях прикрепляют пробные массы (рис. 3.10, б), не искажающие предварительную балансировку ротора как жесткого тела и балансировку по 1-й форме изгиба:

$$D_1 = D_2 \frac{b}{a}; \quad D_2 = D_4; \quad D_5 = D_2 \frac{b}{a}.$$

Раскручивают ротор, измеряют вибрации опор, рассчитывают и устанавливают корректирующие массы в 1, 2, 4 и 5-й плоскостях.

Заключительным этапом комбинированной балансировки является балансировка на рабочей частоте, если она требуется.

Метод балансировки с использованием коэффициентов влияния, называемый также методом балансировочных чувствительностей, применяют при балансировке гибких роторов и роторных систем (валопроводов) в эксплуатационных условиях на месте установки, например, на электростанции. Этот метод основан на влиянии пробных масс и их комбинаций на вибрации опор валопровода при различных частотах вращения.

Измеряют вибрации опор на различных установившихся частотах вращения, при которых проявляется прогиб по формам изгиба. В первую плоскость прикрепляют пробную массу и изменяют вибрации на тех же частотах вращения, что и при первом пуске. С первой плоскости снимают пробную массу и устанавливают ее во вторую плоскость и вновь проводят измерения вибраций. Последовательно измеряют вибрации на выбранных частотах вращения при установке пробного груза в остальных плоскостях.

Вычисляют коэффициенты влияния по уравнению

$$\alpha_{ij} = \frac{\text{вектор колебаний с пробной массой} - \text{вектор колебаний без пробной массы}}{\text{пробная масса в плоскости } j}$$

где $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, q$ (здесь m — количество измерительных пусков, n — число датчиков вибраций, q — число плоскостей коррекции). На ЭВМ по прикладной программе рассчитывают корректирующие массы и устанавливают их в плоскости коррекции.

На практике используют программы с учетом одного, двух, трех и четырех параметров. Так, для учета трех параметров на ротор необходимо установить пробную массу в трех плоскостях и провести три пуска. После измерения всех вибраций ЭВМ автоматически определяет коэффициенты влияния, значения и углы всех корректирующих масс. Последние устанавливают на ротор и проводят контрольный пуск при заданной угловой скорости вращения. Если результаты не удовлетворительны, то балансировку повторяют, вычисляя поправочные корректирующие массы. Затем проводят контрольный пуск и т. д.

По мере накопления информации о балансировке однотипных роторов при балансировке используют коэффициенты влияния, определенные ранее. При этом отпадает необходимость в установке пробных масс. Например, для ротора генератора типа ТВ-100-2 средний коэффициент чувствительности к двум симметричным грузам равен 25 мкм/кг.

Если исходную информацию для расчетов вводят в ЭВМ вручную, то в этом случае заполняют специальный бланк и сдают его на вычислительный центр, откуда затем получают результат расчета.

3.4. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАЛАНСИРОВКИ

Процесс балансировки некоторых роторов имеет ряд конструктивно-технологических особенностей.

Роторы, отнесенные к 1-му и 2-му классам точности, роторы с изменяемой геометрией масс необходимо балансировать в собственных подшипниках и в собственном корпусе с соблюдением условий эксплуатации.

Процесс балансировки в этом случае имеет следующие особенности: паразитная масса корпуса нарушает расчетный режим работы станка; кроме дисбалансов появляются дополнительные источники вибраций.

Расчетный режим работы станков основан на законах статики, поэтому перемещение неуравновешенными силами ротора паразитной массы корпуса нарушает этот режим работы и затрудняет балансировку. Для исключения влияния паразитной

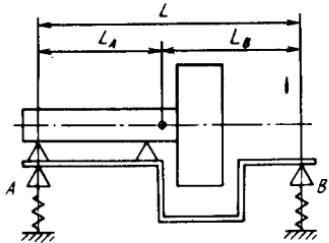


Рис. 3.11. Установка ротора на балансирующей рамке

массы проводят инерционное регулирование режима работы станка с помощью балансирующей рамки (рис. 3.11.). При этом добиваются устранения влияния паразитной массы так, чтобы

$$m L_A L_B - J = 0.$$

где m и J — соответственно масса и экваториальный момент инерции ротора с корпусом и рамкой; L_A , L_B — соответственно расстояние от центра масс ротора до опоры A , B .

Дополнительные источники вибрации обусловлены:

погрешностями изготовления и сборки роторов и опор — несоосность соединяемых роторов, биение посадочных поверхностей муфт, овальность цапф, перекос наружных колец подшипников качения;

наличием смазочного материала в опорах трения скольжения — автоколебания, резонансные биения;

асимметрией тел качения, зазорами между телами качения и погрешностями изготовления подшипников качения — волнистость дорожек качения, гранность тел качения, дисбаланс сепаратора;

аэродинамическими, гидравлическими и электромагнитными силами;

колебаниями элементов корпуса.

Эти источники вибраций приводят к нестабильным показаниям индикатора дисбаланса, осевым вибрациям, "ложным" дисбалансам. Так при вращении ротора на подшипниках качения медленно изменяются показания индикатора дисбаланса с периодом от 1 до 3 мин.

Для уменьшения влияния дополнительных вибраций на процесс балансировки с помощью балансирующей рамки и частоты вращения ротора регулируют режим работы станка. Более тщательно собирают роторы на балансирующем станке и выбирают параметры опор. Контролируют перенос наружных колец подшипников качения, подбирают давление подачи газа или жидкости в подшипники скольжения, исключающие автоколебания и резонансные биения, поджимают в осевом направлении радиально-упорные подшипники качения.

После проведения инерционного регулирования режима работы станка, выбора частоты вращения ротора и условий работы подшипников балансировку роторов в собственных подшипниках и в собственном корпусе выполняют рассмотренными выше методами.

Особенностью динамической балансировки коленчатых валов является в ряде конструкций установка на шейке вала технологических втулок.

Если многоцилиндровая машина состоит из одинаковых центральных кривошипно-ползунных механизмов (рис. 3.12) и для каждого механизма справедливо условие уравновешенности вращающихся масс кривошипа и шатуна, то

$$m_{kp} OS_{kp} = - m_{sh A} OA_{kp},$$

где m_{kp} — масса кривошипа; OS_{kp} — расстояние от центра массы кривошипа до оси вращения; $m_{sh A}$ — часть массы шатуна, статически приведенная к точке A кривошипа:

$$m_{sh A} = m_{sh} BS_{sh} / AB_{sh},$$

где OA_{kp} — длина кривошипа; AB_{sh} — длина шатуна.

После отсоединения от коленчатого вала шатунно-поршневых групп массы кривошипов могут оказаться неуравновешенными. Такой вал балансируют на станке невозможно без технологических втулок или специальной электрической компенсации в измерительном устройстве станка. Втулки делают разъемными и такой массы, чтобы их действие на коленчатый вал во время балансировки заменяло действие шатунно-поршневых групп.

Без технологических втулок балансируют коленчатые валы, симметричные относительно их средней плоскости, у которых центр масс кривошипов лежит на оси вращения. К ним относятся валы четырехцилиндровых и шестицилиндровых машин с расположением кривошипов по схеме, показанной на рис. 3.13.

Коленчатые валы двухцилиндровых машин балансируют с технологическими втулками. Массу технологической втулки рассчитывают по формуле

$$m_t = m_{sh A} = - m_{kp} \frac{OS_{kp}}{OA_{kp}}$$

Рис. 3.12. Центральный кривошипно-ползунный механизм:

1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — ползун

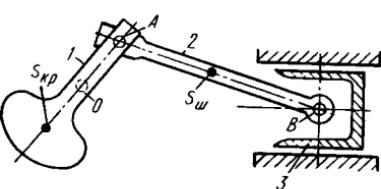
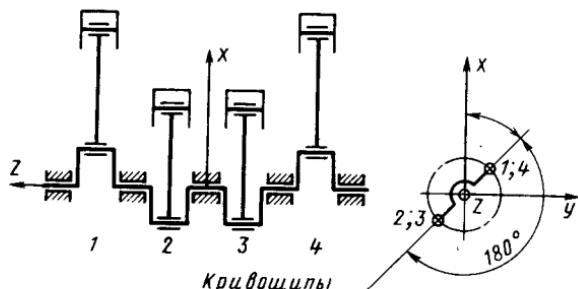


Рис. 3.13. Схема четырехцилиндровой машины



Втулку надевают на каждую шатунную шейку вала и закрепляют, после чего проводят динамическую балансировку коленчатого вала рассмотренными выше методами.

Коленчатый вал четырехцилиндровой V-образной машины с кривошипами, расположенными под углом 90° , и углом раз渲ла цилиндров 90° также балансируют с технологическими втулками. Масса одной технологической втулки для такого вала

$$m_T = m_3 + m_4 + m_2 A,$$

где $m_2 = m_3$; $m_4 = m_5$ — массы 2, 3, 4, 5-го звеньев; $m_{2A} = m_2 BS_2 / AB$ — часть массы 2-го шатуна, статически приведенная к точке A кривошипа.

3.5. ПОГРЕШНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Остаточные дисбалансы в плоскостях коррекции ротора обусловлены погрешностями динамической балансировки. Погрешности динамической балансировки определяются:

- применимым методом балансировки;
- балансировочным станком или балансировочным комплексом;
- балансировочной оснасткой;
- способом корректировки масс;
- производственными помехами.

Остаточные дисбалансы в первую очередь зависят от правильного выбора метода балансировки. Так, если гибкий ротор балансировать на низкой частоте вращения, то возникают повышенные вибрации на рабочих угловых скоростях. Другой пример — при балансировке межпорного жесткого ротора в одной плоскости коррекции вблизи опоры на рабочей частоте вращения возникнут большие нагрузки на другой опоре.

Точность методов низкочастотной балансировки оценивают коэффициентом уменьшения дисбаланса. Для жестких роторов коэффициент уменьшения дисбаланса равен отношению уменьшения дисбаланса к начальному дисбалансу:

$$\text{коэффициент уменьшения} = 1 - \frac{\text{остаточный дисбаланс}}{\text{начальный дисбаланс}}$$

Методы балансировки, при которых определяют и устраняют главный вектор и главный момент начальных дисбалансов или дисбалансы в двух плоскостях, обеспечивают полную сбалансированность ротора.

К этим методам относится двухплоскостная и статико-моментная балансировка, имеющие коэффициент уменьшения дисбаланса, равный единице (без учета других погрешностей).

Одноплоскостная балансировка не устраивает главный вектор и главный момент дисбалансов.

Рис. 3.14. Амплитудно-частотные характеристики гибкого ротора, сбалансированного различными методами

Коэффициент уменьшения дисбалансов зависит от геометрии и начальных дисбалансов ротора, положения плоскости коррекции. Ориентировочное значение этого коэффициента по главному вектору дисбалансов

$$K_D = 1 - \frac{M_{\text{дн ач}}}{D_{\text{ст нач}} L} ,$$

а по главному моменту дисбалансов равно нулю.

Статическая балансировка в динамическом режиме полностью устраняет главный вектор дисбалансов ($K_D = 1$) и не устраивает главный момент дисбалансов ($K_M = 0$).

Точность многоплоскостной низкочастотной балансировки упругодеформируемых роторов оценивают по величине прогиба вала вблизи первой критической скорости ($0,8 \omega_{kp1}$). На рис. 3. 14 показаны амплитудно-частотные характеристики упругодеформируемого ротора, сбалансированного различными методами. Кривая 1 соответствует ротору с начальным дисбалансом, т.е. несбалансированному ротору. После двухплоскостной балансировки (кривая 2) прогиб вала уменьшился на 20 %, пятиплоскостная балансировка ротора в сборе на 50 % снижает прогибы (кривая 3), а последовательная многоплоскостная балансировка дает 90 % уменьшения прогиба (кривая 4).

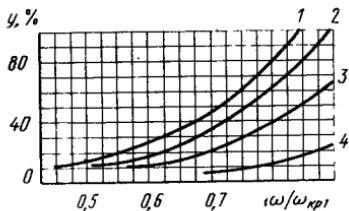
Коэффициент уменьшения дисбаланса при многоплоскостной балансировке по аналогии с жестким ротором лежит в пределах от 0,2 до 0,9.

Оценку точности высокочастотных методов балансировки гибких роторов проводят по уровню вибраций опор в эксплуатационных условиях.

Погрешности динамической балансировки роторов, вызываемые производственными причинами, будут рассмотрены в следующих главах.

3.6. КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ ДИСБАЛАНСОВ

Контроль остаточных дисбалансов ротора проводят в тех же условиях, в каких проводилась его балансировка. Остаточные дисбалансы измеряют в плоскостях коррекции или других заданных плоскостях. Пересчет измеренных остаточных дисбалансов из одних плоскостей в другие выполняют по правилам статики.



Остаточные дисбалансы контролируют с целью определения правильности выполнения операций балансировки и неизменности условий, в каких проводится балансировка. В первом случае осуществляют сплошной контроль балансируемых роторов. Во втором случае контролируют несколько роторов из партии.

В зависимости от значений допустимых дисбалансов ротора и порога чувствительности балансировочного станка используют следующие методы.

Метод контроля остаточных дисбалансов по показаниям индикатора дисбаланса применяют при условии, когда допустимый и остаточный дисбалансы более чем в 6,25 раза превышают порог чувствительности станка по значению дисбаланса.

Сбалансированный ротор раскручивают до частоты вращения, на которой проводилась балансировка, выдерживают его на этой частоте 2 мин и снимают показания индикаторов дисбаланса по каждой плоскости измерения. При этом выбирают такой рабочий диапазон, при котором показания индикатора дисбаланса находились бы в средней его части. Например, шкала индикатора дисбаланса класса точности 1,0 имеет абсолютную погрешность измерения одно деление. Если показания индикатора составляют два деления, то погрешность измерения будет 50 %, а если показания составляют 50 делений, то погрешность измерения будет 2 %.

Зная цену деления, находят значение остаточного дисбаланса в данной плоскости. Сравнивают допустимое и остаточное значения дисбаланса, причем

$$D_{\text{ост}} < D_{\text{доп}} - \Delta D.$$

Если это условие выполняется, то балансировку считают заключенной и соответствующей заданной точности.

Пример. Допустимое значение дисбаланса ротора в плоскости коррекции равно 100 г·мм. Порог чувствительности балансировочного станка в этой плоскости по значению дисбаланса составляет 10 г·мм. После балансировки ротора в плоскости коррекции остался дисбаланс 40 г·мм. Соответствует ли балансировка заданной точности? Решение: $D_{\text{доп}} - \Delta D = 100 - 10 = 90 \text{ г}\cdot\text{мм} > D_{\text{ост}} = 40 \text{ г}\cdot\text{мм}$, следовательно, балансировка соответствует заданной точности.

Метод контроля остаточных дисбалансов с помощью контрольного груза применяют при условии, когда допустимый дисбаланс в 2,5...6,25 раза больше порога чувствительности станка. По этому методу для определения остаточного дисбаланса проводят три пуска ротора и снимают показания индикатора дисбаланса. Один пуск с остаточным дисбалансом и два пуска с контрольным грузом m , последовательно прикрепляемым в тяжелом и легком месте в плоскости измерения. Значение остаточного дисбаланса рассчитывают по формуле

$$D_{\text{ост}} = 2mr_k \frac{U_0}{U_1 - U_2},$$

где масса контрольного груза равна

$$m = (2,5 \dots 6,25) D_{\text{доп}} / r_k$$

Сравнивают остаточное и допустимое значения дисбаланса. Если $D_{\text{ост}} < D_{\text{доп}} - \Delta D$, то балансировка выполнена с заданной точностью.

Пример. Допустимое значение дисбаланса ротора в плоскости коррекции равно 50 г·мм. Порог чувствительности балансировочного станка в этой плоскости составляет 10 г·мм. После балансировки ротора в плоскости коррекции остался дисбаланс 30 г·мм. Соответствует ли балансировка заданной точности? Решение: $D_{\text{доп}} - \Delta D = 50 - 10 = 40 \text{ г}\cdot\text{мм} > 30 \text{ г}\cdot\text{мм} = D_{\text{ост}}$, следовательно, балансировка соответствует заданной точности.

Метод контроля остаточных дисбалансов круговым обходом контрольного груза применяют при условии, когда допустимый дисбаланс равен или в 2,5 раза превышает порог чувствительности станка. По этому методу для определения остаточного дисбаланса последовательно прикрепляют контрольный груз m в восьми равнорасположенных точках окружности в плоскости измерения и снимают показания индикатора дисбаланса так же, как при одноплоскостной балансировке способом амплитуд. Для каждой плоскости строят графики в координатах: угол установки контрольного груза и показания индикатора значения дисбаланса. По полученной кривой находят максимальные и минимальные показания индикатора значения дисбаланса. Значение остаточного дисбаланса рассчитывают по формуле

$$D_{\text{ост}} = m r_k \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{макс}} + U_{\text{мин}}}$$

Масса контрольного груза должна быть

$$m = 2,5 D_{\text{доп}} / r_k .$$

Данный метод контроля обладает наибольшей точностью. Полученное значение $D_{\text{ост}}$ сравнивают с допустимым значением дисбаланса. Если $D_{\text{ост}} < D_{\text{доп}}$, то балансировка проведена с заданной точностью.

Статистический контроль остаточных дисбалансов осуществляют при балансировке большой партии роторов. Заключение о дисбалансах всей партии делается с некоторой вероятностью $W < 1$. Значение W указывается в технической документации (например, $W = 0,9; 0,95; 0,98; 0,99$ или $0,999$).

Число роторов, остаточные дисбалансы которых контролируют, вычисляют следующим образом.

Выбирают предварительно 5...7 роторов и измеряют их остаточные дисбалансы для каждой плоскости коррекции одним из методов контроля.

Вычисляют средние арифметические значения дисбалансов этих роторов для каждой плоскости коррекции A и B :

$$(D_{A,B})_{\text{cp}} = \frac{1}{n} [D_{A1,B1} + D_{A1,B2} + \dots + D_{A1,Bn}]$$

и квадраты среднего квадратического отклонения:

$$\sigma^2_{A,B} = \frac{1}{n-1} [(D_{A1,B\text{cp}} - D_{A1,B1})^2 + (D_{A1,B\text{cp}} - D_{A1,B2})^2 + \dots + (D_{A1,B\text{cp}} - D_{A1,Bn})^2].$$

По табл. 3.2 находят коэффициент Стьюдента t в зависимости от принятых W и n .

Таблица 3.2

Значения коэффициента Стьюдента t

$N-1$	W				
	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
1	6,31	12,7	31,8	63,7	636
2	2,92	4,3	6,97	9,93	31,6
3	2,35	3,18	4,54	5,84	12,9
4	2,13	2,78	3,75	4,6	8,61
5	2,02	2,57	3,37	4,03	6,87
6	1,94	2,45	3,14	3,71	5,95
7	1,9	2,37	3,0	3,5	5,41
8	1,86	2,31	2,9	3,36	5,04
9	1,83	2,62	2,82	3,25	4,78
10	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02

Вычисляют искомое число роторов N по формуле

$$N_{A,B} = \frac{t^2 \sigma^2_{A,B}}{(D_{A,B\text{ доп}} - D_{A,B\text{cp}})^2}.$$

Если это число N больше предварительно выбранного числа роторов n , то расчет повторяют для N роторов. Результаты проверок с N роторами используют для контроля остаточных дисбалансов. За значение остаточных дисбалансов всей партии роторов принимают следующий дисбаланс:

$$D_{A,B\text{o ст}} = D_{A,B\text{cp}} + t \sqrt{\frac{\sigma^2_{A,B}}{N}}.$$

Партию роторов считают годной при выполнении условия:

$$(D_{A,B})_{\text{cp}} + t \sqrt{\frac{\sigma^2_{A,B}}{N}} < (D_{A,B})_{\text{доп}}.$$

Среднее значение $(D_{A,B})_{\text{ср}}$ и дисперсия $\sigma^2_{A,B}$ совокупности значений дисбалансов $D_{A,B1}, D_{A,B2} \dots D_{A,B,N}$ вычисляются по прикладной программе на микроЭВМ.

Прикладная программа для микроЭВМ "Вычисление среднего арифметического значения и квадрата среднего квадратического отклонения дисбалансов".

Вычисляются среднее значение $D_{\text{ср}}$ (m_1) и дисперсия σ^2 (m_2) совокупности значений:

$$D_1, D_2, \dots, D_N \quad (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Исходной информацией для расчета являются дисбалансы $D_1, D_2 \dots, D_N$.

Программа 3.4 для микроЭВМ "Электроника" Б3-34, МК-54, МК-56

Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код
00	Сх	0Г	12	+	10	24	:	13
01	ПО	40	13	П1	41	25	ИПО	60
02	П1	41	14	КИП4	Г4	26	Fx ²	22
03	П4	44	15	ИПО	60	27	—	11
04	С/П	50	16	ИП4	64	28	П1	41
05	Fx ²	22	17	БП	51	29	С/П	50
06	F Вх	0	18	04	04	Регистры		
07	ИПО	60	19	:	13	0 Σx; m ₁		
08	+	10	20	ПО	40	1 Σx ² ; m ₂		
09	ПО	40	21	С/П	50	4 i; n		
10	→	14	22	ИП1	61			
11	ИП1	61	23	ИП4	64			

Инструкция балансировщику

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
1. Включите микрокалькулятор		F ПРГ	00
2. Перейдите в режим "Программирование"			
3. Занесите программу 3.4			0
4. Очистите программный счетчик		F АВТ В/О	0
5. Установите переключатель Г/Р/ГРД в положение Г		С/П	
6. Проверьте правильность набора программы			
6.1. Введите контрольную исходную информацию	1 2 3 4 5	С/П С/П С/П С/П С/П	1 2 3 4 5
6.2. Перейдите к выводу результатов		БП 19 С/П С/П	3 2
6.3. Очистите программный счетчик		F АВТ В/О С/П	0

Продолжение инструкции

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
7. Вычислите среднее значение и квадраты среднего квадратического отклонения			
7.1. Занесите исходную информацию для расчета	D_1 D_2 D_N	С/П БП	D_1 D_2 D_N 19 С/П С/П
7.2. Перейдите к выводу результатов			D_{cp} σ^2

В крупносерийном производстве встроенное в измерительное устройство балансировочного автомата или автоматической линии решающее устройство принимает и обрабатывает исходную информацию одновременно с балансировкой всей партии. Прибор показывает среднее значение дисбаланса и его изменение в процессе работы на индикаторе или самописце. По показаниям этого прибора судят о стабильности процесса балансировки и предупреждают выпуск бракованной продукции, контролируют качество предыдущих операций и работу самого балансировочного станка.

■ ■ ■

СТАНКИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Описывается устройство, принцип действия и конструкции основных узлов станков для динамической балансировки; рассматриваются типовые узлы по принципу выполняемых функций; даются правила оценки норм точности балансировочных станков единые для заводов-изготовителей и потребителей станков.

4.1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БАЛАНСИРОВОЧНЫХ СТАНКОВ

В общем случае балансировочный станок содержит (рис. 4.1) : балансировочное, приводное, измерительное и корректирующее устройства, а также дополнительные устройства, которые крепят на станине станка.

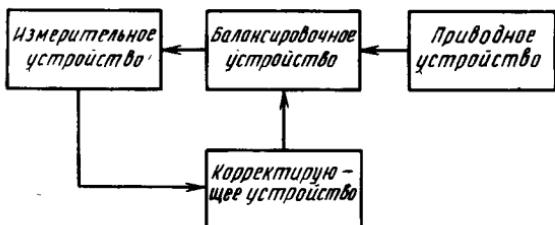


Рис. 4.1. Схема балансировочного станка

Балансировочное устройство является колебательной системой станка, в которой устанавливается и вращается неуравновешенный ротор. По колебаниям этой системы при балансировке судят о дисбалансах ротора. В современных станках применяют два типа таких устройств: зарезонансное и дорезонансное.

Зарезонансное балансировочное устройство (рис. 4.2, а) состоит из двух подвижных опор или платформы и упругих элементов, подвешивающих опоры на станине станка. Жесткость упругих элементов различна в разных направлениях. В станках с горизонтальной осью вращения упругие элементы сравнительно жестки в вертикальном направлении, тогда как в горизонтальном направлении жесткость очень мала и подвеска не препятствует колебаниям. При проектировании и изготовлении заре-

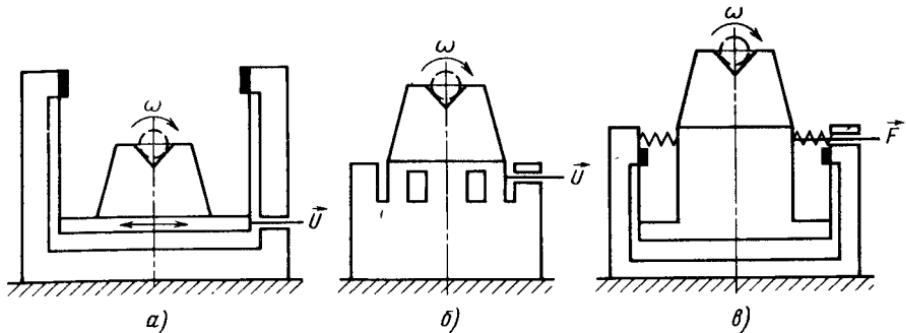


Рис. 4.2. Балансировочные устройства

зонансных станков подбирают массу опор, длину, жесткость подвески и другие параметры балансировочного устройства так, чтобы его собственная частота в горизонтальном направлении во много раз была ниже частоты вращения ротора при балансировке.

При вращении неуравновешенного ротора в зарезонансном балансировочном устройстве подвижные опоры будут колебаться в горизонтальной плоскости. Амплитуды этих колебаний пропорциональны дисбалансам в плоскостях коррекции ротора, т.е. описываются уравнениями (2).

Дорезонансное балансировочное устройство состоит из двух неподвижных опор, жестко закрепленных на станине станка. Собственные частоты колебаний опор во всех направлениях значительно превышают частоты вращения балансируемых роторов. Нижняя часть опоры представляет собой динамометр или силовой мостик. Динамические нагрузки, возникающие в опорах при вращении неуравновешенного ротора, создают малые перемещения на динамометре (рис. 4.2, б), которые усиливаются рычажной системой. Сила в опоре пропорциональна перемещению, т.е.

$$F_A = k U_A,$$

где k — коэффициент жесткости опоры в горизонтальном направлении.

В дорезонансном балансировочном устройстве по схеме силового мостика (рис. 4.2, в) в одном из плеч силового мостика устанавливают датчик, измеряющий непосредственно динамическую нагрузку от неуравновешенного ротора, описываемую уравнениями (1).

Балансировочные устройства разгонно-балансировочных стендов и станков для высокочастотной балансировки гибких роторов имеют одинаковую жесткость во всех направлениях — являются изотропными и имеют три или четыре опоры.

Принцип действия балансировочных устройств станков с

вертикальной осью вращения аналогичен рассмотренным выше. Эти устройства часто конструктивно объединяют с приводным устройством. Балансируемую деталь закрепляют в шпиндельном узле. Шпиндель, подвеска, а иногда и приводное устройство составляют балансировочное устройство станка с вертикальной осью вращения.

Приводное устройство обеспечивает запуск, поддержание постоянной угловой скорости вращения и торможение балансируемого ротора. Основными элементами устройства (рис. 4.3) являются: электродвигатель, коробка передач, тормоз, приводное соединение, схема управления приводным устройством.

В балансировочных станках применяют электродвигатели переменного или постоянного тока различной мощности, ступенчатые и бесступенчатые передачи. Ременные передачи применяют при относительно небольших передаваемых усилиях. В этих передачах используют плоские, клиновые и круглые ремни. Зубчатые передачи обеспечивают передачу больших мощностей и ступенчатое регулирование скоростей вращения. В коробках передач станков используют цилиндрические зубчатые колеса с разным числом зубьев, вводимые последовательно в зацепление друг с другом. Изменение передаточного отношения в приводе иногда производят сменой зубчатых колес.

Приводное соединение связывает выходной вал коробки передач с балансируемым ротором. Различают осевое, ленточное и тангенциальное соединения. Осевое соединение осуществляют с помощью карданных валов (рис. 4.4) различной конструкции. В ленточном соединении применяют плоские бесконечные ремни, охватывающие балансируемую деталь (рис. 4.5). Тангенциальное (касательное) соединение создают прижимные ролики (рис. 4.6, а) и круглые ремни (рис. 4.6, б).

Приводные соединения способны передавать ограниченные крутящие моменты. Поэтому во избежание разрушения приводного устройства во время запуска и торможения ротора используют специальную электрическую схему управления привод-

Рис. 4.3. Схема приводного устройства



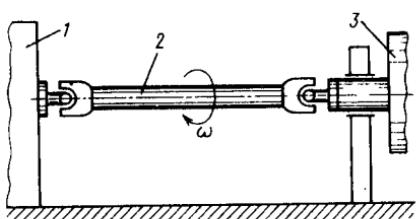


Рис. 4.4. Осевое соединение карданным валом:
1 – привод; 2 – карданный вал; 3 – балансируемая деталь

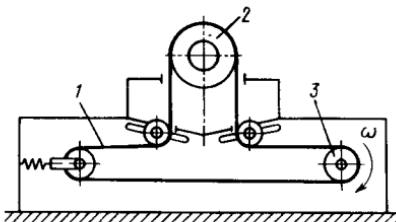


Рис. 4.5. Ленточное соединение плоским бесконечным ремнем:
1 – ремень; 2 – балансируемая деталь; 3 – привод

ным устройством, обеспечивающую плавность пуска и останова ротора.

В исходном положении схемы (рис. 4.7) катушки трехполюсных контакторов и реле времени обесточены. Нормально разомкнутые контакты контакторов и реле разомкнуты, нормально замкнутые – замкнуты.

При нажатии кнопки "Пуск" катушка контактора M_1 получает питание, замыкая свои контакты M_1 . В результате напряжение питания на электродвигатель ЭДВ подается через две ступени сопротивлений (R_1 и R_2). По истечении установленного времени реле PB_1 замыкает свои блокконтакты, подавая питание на катушку контактора M_2 и реле времени PB_2 (последнее на рис. 4.7 не показано). Контактор срабатывая, своими контактами M_2 шунтирует ступень сопротивлений R_1 . Через определенное время реле PB_2 срабатывает и замыкает свои блоккон-

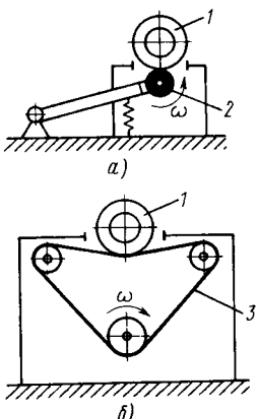


Рис. 4.6. Тангенциальное соединение:
1 – балансируемая деталь; 2 – прижимной ролик; 3 – круглый ремень

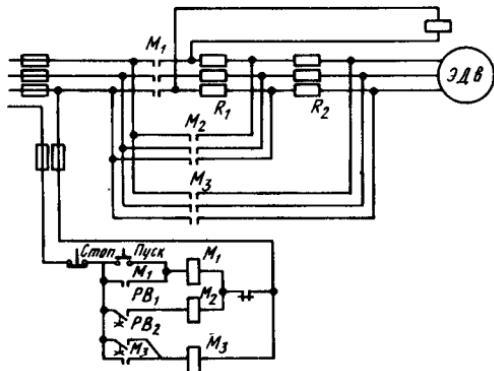


Рис. 4.7. Электрическая схема управления приводным устройством

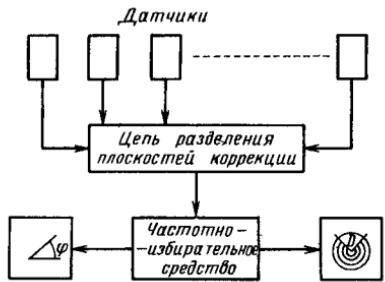


Рис. 4.8. Структурная схема измерительного устройства

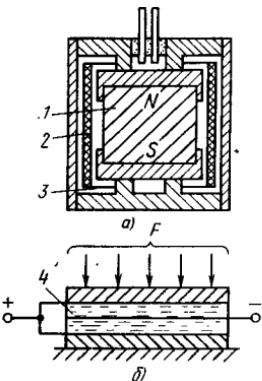


Рис. 4.9. Контактные датчики:
1 – постоянный магнит; 2 – катушка;
3 – пружина; 4 – пьезокристаллы

такты, подавая питание на катушку контактора M_3 , контакты которого шунтируют ступень сопротивлений R_2 . В результате на электродвигатель ЭДВ подается полное питающее напряжение. При срабатывании контактора M_3 размыкаются нормально-замкнутые блокконтакты, обесточивая катушки реле времени и контакторы.

При нажатии кнопки "Стоп" схема обесточивается.

Реле времени и сопротивления предварительно регулируют, добиваясь необходимой плавности пуска.

В схемах управления приводными устройствами мощностью свыше 4 кВт предусматривается многоступенчатая схема пуска и торможения ротора с воздушным охлаждением сопротивлений.

Тиристорные системы используют для управления трехфазными асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором и электродвигателями постоянного тока. Применение этих систем в балансировочных станках позволяет: управлять электродвигателем бесконтактным способом, ограничивать ударные моменты при пуске, получать широкую гамму пуско-тормозных и регулировочных режимов работы электродвигателя.

Измерительное устройство определяет значения и углы дисбалансов ротора в заданных плоскостях. Его структурная схема (рис. 4.8) состоит из датчиков, цепи разделения плоскостей коррекции или измерения, частотно-избирательных средств, индикаторов значения и угла дисбалансов.

Датчики преобразуют параметры колебаний балансировочного устройства в электрические сигналы. В балансировочных станках применяют контактные (индукционные, пьезоэлектрические) и бесконтактные (токовихревые) датчики.

Индукционный датчик представляет собой катушку индуктивности (рис. 4.9, а), которая может свободно перемещаться

в магнитном поле, образованном постоянным магнитом. Катушка жестко соединяется с балансировочным устройством. При колебаниях этого устройства катушка будет также колебаться и в ней возникнет ЭДС индукции, величина которой определяется скоростью изменения магнитного потока, т.е. пропорциональна скорости колебаний балансировочного устройства. При постоянной частоте вращения ротора ЭДС пропорциональна амплитуде перемещения опор станка.

Пьезоэлектрический датчик основан на пьезоэлектрическом эффекте. При механической деформации в определенном направлении, например, кристаллов сегнетовой соли, поляризованной керамики и титаната бария в них возникает электрическое поле (рис. 4.9, б), изменяющее знаки зарядов при изменении направления деформации. Величина заряда, возникающего при пьезоэлектрическом эффекте, пропорциональна действующей силе.

Индукционные и пьезоэлектрические датчики связаны с колебательной системой станка, т.е. являются контактными датчиками.

Токовихревые датчики – бесконтактные, поэтому служат для измерения прогибов вращающихся валов. Принцип действия токовихревого датчика основан на индукционных токах (токи Фуко), возникающих в массивном проводнике, которым является ротор, помещенном в изменяющееся магнитное поле. Изменяющееся магнитное поле создается генератором высокой частоты (рис. 4.10) и колебательным контуром, состоящим из индуктивности L и емкости C . Изменения зазора между поверхностью датчика и вала при его вращении вызывают изменение выходного напряжения.

Для отметки угла дисбаланса, частоты вращения ротора при балансировке применяют генераторы опорного сигнала, стробоскопы с газосветными лампами, фотоэлектрические и некоторые другие датчики.

Ротор генератора опорного сигнала представляет собой двухполюсный постоянный магнит, вращающийся со скоростью балансируемого ротора, и связан с ним жестко. Статор имеет две взаимно перпендикулярные обмотки и может поворачиваться в любое фиксированное положение вместе с

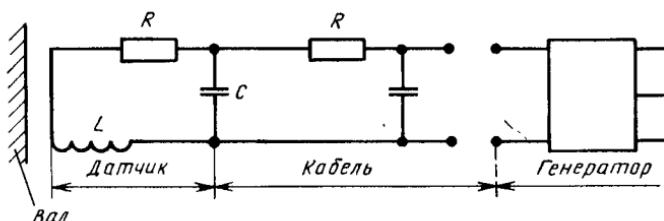


Рис. 4.10. Токовихревой датчик

лимбом, нанесенным на корпусе статора. Выходное напряжение генератора постоянной величины с известной фазой по отношению к отметке угла на роторе имеет частоту вращения ротора.

При освещении вращающегося ротора неоновой, импульсной или другой газосветной лампой возникает стробоскопический эффект. Этот эффект получается из-за того, что глаз человека импульсы света с частотой более 10 Гц не различает как отдельные вспышки, а воспринимает их как непрерывный поток света. Если импульсы следуют с частотой вращения, то ротор для человеческого глаза будет казаться неподвижным. На таком принципе основан стробоскоп, освещдающий при балансировке шкалу (метку), нанесенную на ротор. Освещаемая цифра указывает угол дисбаланса относительно известного положения.

Фотоэлектрический датчик срабатывает от контрастной метки, нанесенной на роторе, и выдает короткие импульсы с частотой вращения ротора.

При включении датчиков в электрическую цепь в ней появится напряжение, пропорциональное параметрам колебаний балансировочного устройства, например, $E_A = \mu U_A$, где коэффициенты пропорциональности μ постоянны и зависят от конкретных условий балансировки.

Электрическую цепь между виброзмерительными преобразователями и частотно-избирательными средствами называют *цепью разделения плоскостей коррекции (ЦРПК)*. ЦРПК автоматически решает уравнения (1)-(5) относительно дисбалансов ротора.

Датчики зарезонансного балансировочного станка включены в ЦРПК последовательно (рис. 4.11, а) с такой полярностью, что их ЭДС действуют навстречу друг другу. В цепи

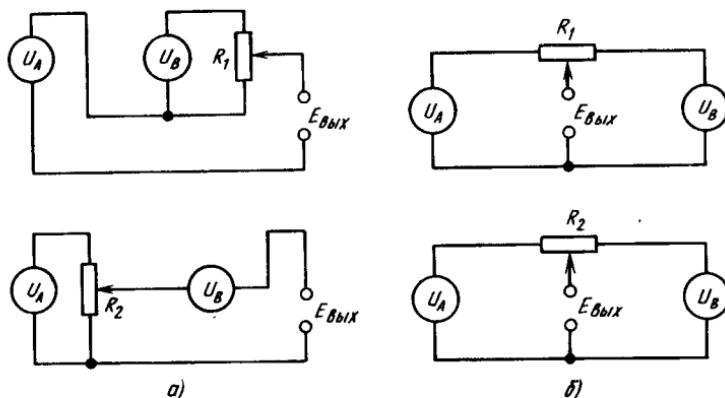


Рис. 4.11. Схемы включения датчиков в потенциометрических цепях разделения плоскостей коррекции

компенсирующего датчика включен потенциометр настройки R_1 или R_2 . Напряжение на выходе схемы $E_{\text{вых}}$ складывается из полного напряжения основного датчика и части напряжения компенсирующего датчика. Цель разделения плоскостей коррекции дополняется переключателями, реверсирующими фазу напряжения датчиков, и переключателями, коммутирующими потенциометры настройки к тому или другому датчику. Так как положения ползунков потенциометров и переключателей различны для разделения 1-й и 2-й плоскостей коррекции, то органы настройки в схеме дублируются.

Положения ползунков потенциометров зависят от коэффициентов балансировочных чувствительностей. Требуемое положение подбирают экспериментальным путем при настройке станка на балансировку ротора определенной массы и геометрии.

В потенциометрических цепях разделения плоскостей коррекции дорезонансного балансировочного станка датчики включены параллельно (рис. 4.11, б). Разделение плоскостей обеспечивается положением ползунков потенциометров R_1 , R_2 , которые зависят только от геометрических размеров ротора L_1 , L_2 , l .

В цепях с операционными суммирующими усилителями (рис. 4.12) потенциометры $R_1 - R_3$ включены в цепь суммирующего операционного усилителя Y_1, Y_2 , с помощью которых решают уравнения относительно D_1, D_2 . На выходе ЦРПК получают напряжения \vec{E}_1 и \vec{E}_3 пропорциональные дисбалансам \vec{D}_1 и \vec{D}_2 . Для решения необходимо, чтобы ползунки потенциометров $R_1 - R_3$ были установлены в положения, соответствующие расстояниям $L_1, L_2 l$. Такую схему называют схемой a, b, c , где $a = L_1$; $b = L_2$; $c = l$.

В измерительных устройствах балансировочных станков применяют и другие цепи разделения плоскостей коррекции. При многоплоскостной балансировке для решения уравнений (1) в измерительное устройство вместо цепи разделения плоскостей коррекции включают аналоговые или цифровые вычислительные машины, снабженные программами расчетов.

Колебания, регистрируемые вибропреобразователями, вызываются как неуравновешенностью ротора, так и погрешностями динамической балансировки. Составную часть колебаний от погрешностей называют колебаниями помех в противоположность полезным колебаниям от дисбалансов.

Для выделения полезного сигнала, изменяющегося с частотой вращения ротора, и подавления сигналов помех в измерительных устройствах используют избирательные усилители, ваттметры, векторметры и другие частотно-избирательные средства (фильтры).

Избирательные усилители состоят из усилительного каскада и фильтра в цепи отрицательной обратной связи. Простей-

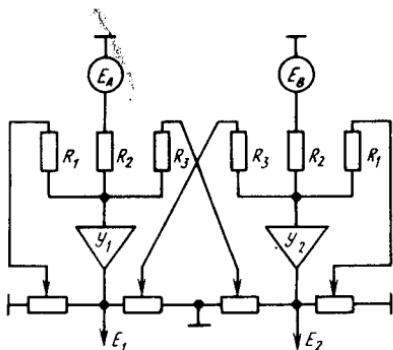
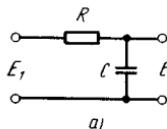
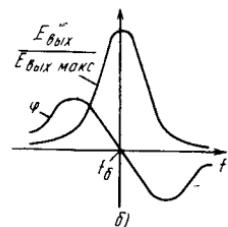


Рис. 4.12. Цепь разделения плоскостей коррекции с операционными суммирующими усилителями



а)



б)

Рис. 4.13. Интегрирующая цепочка

шим фильтром является интегрирующая цепочка (рис. 4.13, а). Известно, что при $R \gg 1/\omega C$ напряжение на конденсаторе

$$E_2 \approx \frac{E_1}{\omega R C} \sin \omega t.$$

Из этого выражения видно, что амплитуды более высоких гармоник ослаблены больше, чем низких. Частота максимального ослабления составляет $f_0 = 2\pi\omega_0 = 2\pi/RC$. Если такой фильтр включить в цепь отрицательной обратной связи усилителя, то частота f_0 будет ослабляться меньше других. Изменяя сопротивление R , фильтр настраивают на частоту вращения ротора при балансировке ($f_0 = f_6$). Тогда амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики будут иметь вид, показанный на рис. 4.13, б. Параметры избирательного усилителя подбирают так, чтобы небольшие изменения f_6 ($\pm 3\%$) не вызывали заметных изменений характеристик.

Мерой частотной избирательности фильтра является его добротность $q = f_6/\Delta f$, где Δf — полоса пропускания фильтра.

Ваттметр — частотно-избирательное средство, основанное на электромагнитном взаимодействии двух катушек с токами (рис. 4.14). Неподвижная катушка питается током опорного

сигнала, а подвижная — током сигнала от цепи разделения плоскостей коррекции. Если сигнал от датчика опорного сигнала, например, от фотодатчика, изменяется не по гармоническому закону, то перед поступлением на ваттметр он преобразуется в гармонический.

Поворачивая статор генератора, можно согласовать фазу опорного

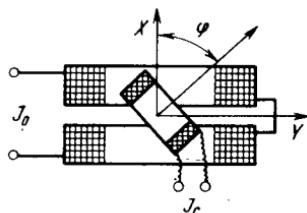


Рис. 4.14. Схема ваттметра

сигнала с углом дисбаланса. Так как частоты токов одинаковы, то угловое отклонение подвижной катушки ваттметра определяется выражением $\psi = aJ_0J_c \cos\varphi$, где a — коэффициент пропорциональности; J_0 , J_c — амплитуды токов опорного и измеряемого сигналов, φ — сдвиг фазы между токами сигналов.

При постоянной скорости вращения максимальное отклонение подвижной катушки ваттметра равно $\varphi_{\max} = a_0 J_c$, где $a_0 = a_0 J_0 \cos 0 = \text{const}$ пропорционально полезному сигналу, т. е. дисбалансу.

Добротность ваттметра определяется отношением частоты опорного сигнала к частоте собственных колебаний подвижной катушки $q = 0,778 f_0 / f_{\text{соб}}$. В современных конструкциях ваттметров добротность равна $(0,8..2,6) f_0$. Векторметр представляет собой два ваттметра, установленных в общем корпусе и снабженных оптической системой для одновременной регистрации поворотов рамок.

Более высокой добротностью обладают частотно-избирательные средства с фазовыми детекторами, представляющие собой электронные устройства.

Индикаторами значения и угла дисбаланса служат амперметры, вольтметры и ваттметры со стрелочной или цифровой индикацией значений, световые отметки на экране, шкалы и лимбы на роторе или приводе ротора. В измерительном устройстве бывает один или несколько индикаторов.

Измерительные устройства станков автоматов, автоматических линий, разгонно-балансировочных стендов и некоторых специальных станков оснащены запоминающими устройствами, а также электронно-вычислительными машинами.

Измерительные устройства включают также и ряд других блоков, обеспечивающих их работу.

Корректирующие устройства входят в состав балансировочных станков, предназначенных для крупносерийного и массового производства. Они корректируют массу ротора после его остановки или во время вращения. При работе в автоматическом режиме корректирующие устройства управляются от измерительного устройства.

В балансировочных станках применяют различные дополнительные устройства, обеспечивающие его функционирование. Это пневмо- и гидросистемы, загрузочные и накопительные устройства и т. п.

Способы измерения значений и углов дисбалансов. Рассмотрим наиболее распространенные способы измерения с помощью следующих измерительных устройств:

избирательного усилителя и стробоскопа;

ваттметра и генератора опорного сигнала;

избирательного усилителя или ваттметра и бесконтактного датчика опорного сигнала (фотодатчика);

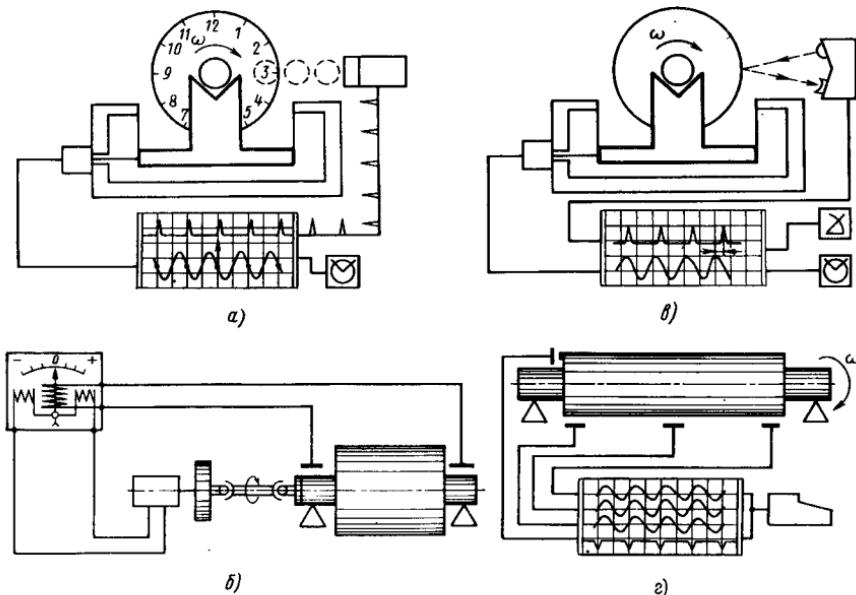


Рис. 4.15. Способы измерения значения и угла дисбаланса

токовихревых бесконтактных датчиков.

В измерительных устройствах, содержащих избирательный усилитель и стробоскоп (рис. 4.15, а), механические колебания преобразуются в электрические сигналы. В цепи разделения плоскостей коррекции из них выделяются сигналы, пропорциональные дисбалансам в каждой плоскости, которые поступают в избирательный усилитель. Отфильтрованные и усиленные сигналы поочередно поступают на индикатор дисбаланса и формирователь импульсов. По шкале индикатора находят значение дисбаланса ротора в данной плоскости коррекции.

В формирователе импульсов синусоидальный сигнал преобразуется в импульсный. Импульс вырабатывается в момент прохождения дисбаланса через горизонтальную плоскость. Частота следования импульсов равна частоте вращения ротора. Импульсные сигналы зажигают газосветную лампу, освещдающую ротор, которая вспыхивает за каждый оборот ротора только один раз на очень короткий промежуток времени. Отметка на роторе в силу стробоскопического эффекта кажется неподвижной. Замечая ее положение относительно визира на стробоскопе или на неподвижной части станка, определяют угол дисбаланса. Например, на рис. 4.15, а стробоскоп показывает угол дисбаланса 90° (точка 3). После остановки ротора его поворачивают в положение, зафиксированное стробоскопом. Значит, тяжелое место лежит в горизонтальной плоскости.

При ваттметрическом способе измерения значений углов дисбалансов (рис. 4.15, б) на катушки ваттметра поступают сигналы из цепи разделения плоскостей коррекции и генератора опорного сигнала. Для определения значения дисбаланса поворачивают лимб, связанный со статором генератора, добиваясь максимальных показаний ваттметра. Это происходит при совпадении фаз опорного и измеряемого сигналов. На шкале индикатора дисбаланса указывается его значение.

Угол поворота лимба относительно первоначального горизонтального положения указывает угол дисбаланса. После остановки ротора совмещают начальные деления лимбов статора и ротора генератора, поворачивая балансируемый ротор, жестко связанный с ротором генератора. Тяжелое место приходит в горизонтальную плоскость.

Если генератор опорного сигнала имеет две обмотки, одна из которых сдвинута на 90° , то сначала определяют угол дисбаланса, отыскивая нулевые показания ваттметра. После нахождения положения лимба, соответствующего нулевым показаниям индикатора, включают в измерительную цепь вторую обмотку статора генератора. Так как она повернута на угол 90° ($\cos \varphi = 1$), ваттметр даст максимальное показание, пропорциональное значению дисбаланса.

В измерительных устройствах с индикацией значения и угла дисбаланса световой отметкой на экране, т.е. в полярных координатах, сигналы с двух ваттметров поступают на отклоняющие устройства. Один отклоняет световой луч через зеркало в перпендикулярном направлении, а другой независимо от первого — в горизонтальном направлении. Показания отмечаются светящейся точкой на круговой шкале. Значение дисбаланса равно расстоянию точки от центра шкалы. Угол дисбаланса отсчитывают по дуге окружности шкалы.

Работа измерительного устройства с бесконтактным датчиком опорного сигнала показана на рис. 4.15, в. Отсчет значений и углов дисбалансов проводят непосредственно по шкалам индикаторов.

Способ измерения значений и углов дисбалансов с помощью токовыхых датчиков применяют при высокочастотной балансировке. Предварительно отфильтрованные и усиленные сигналы с датчиков (рис. 4.15, г) поступают в запоминающее устройство. После проведения необходимого числа пусков ротора в цепи разделения плоскостей коррекции с помощью ЭВМ решаются уравнения (1). Результаты решения — значения и углы дисбалансов — выводятся на индикаторы.

4.2. КОНСТРУКЦИЯ БАЛАНСИРОВОЧНЫХ СТАНКОВ

Основными узлами балансировочного станка являются: станина, опоры, узлы привода с пультом управления приводным устройством, датчики, измерительный пульт.

Станина предназначена для установки балансировочного станка на фундамент и крепления на ней узлов станка. В зависимости от массы балансируемого ротора применяют станины двух типов. Станины тяжелых станков (рис. 4.16) представляют собой плоские массивные плиты, изготовленные из чугуна или стали, внутри которых выполнены продольные и поперечные ребра для придания жесткости и устранения колебаний. В нижней части плиты находятся отверстия для крепления ее на фундаменте. На верхней части плиты имеются направляющие, по которым передвигаются опорные стойки, и пазы для зажимных болтов стоек и других узлов станка.

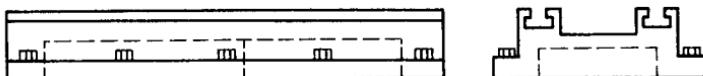


Рис. 4.16. Плита

Станины станков для балансировки роторов массой до 300 кг состоят из двух стоек 1 (рис. 4.17), скрепленных круглыми направляющими 2. Верхние направляющие крепятся в стойках тангенциальными зажимами 6. Расстояние между стойками устанавливают с помощью винтов 3, упирающихся в торцы средней направляющей, и гаек 4, навинчиваемых на концы нижней направляющей. Такая конструкция станины обеспечивает высокую надежность и исключает изгиб верхних направляющих в вертикальной плоскости. Станина устанавливается на 4 регулируемых по высоте опорах 5.

Вертикальные балансировочные станки и горизонтальные станки для роторов малой массы имеют рамную конструкцию.

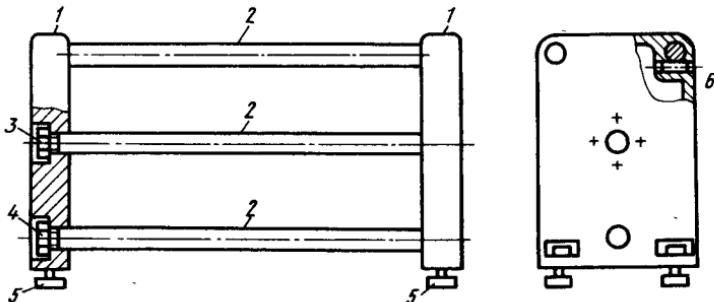


Рис. 4.17. Станина сборной конструкции

Плиту подвешивают на пружинах или жестко крепят к раме.

Опорные узлы образуют балансировочное устройство станка. Конструкция узла зависит от типа устройства (зарезонансное или дорезонансное), положения оси вращения (горизонтальное или вертикальное), частоты вращения при балансировке и других причин.

Зарезонансные опорные узлы состоят из стоек 5 (рис. 4.18), упругих элементов 2 и опор 3, на которых вращается балансируемый ротор.

Стойки 5 устанавливают на направляющих станины и фиксируют зажимами 1. Легкие и тяжелые стойки перемещают по направляющим вручную, но для перемещения тяжелых стоек используют зубчатые колеса и рейки, закрепленные на станине станка.

Упругие элементы 2, обеспечивающие колебания в заданной плоскости, крепят к стойкам опоры. В качестве упругих элементов балансировочных устройств применяют пластины и стержни. Пластины изготавливают из рессорно-пружинной стали постоянной или переменной толщины сечением в виде прямоугольника с отношением сторон более чем 1:100. Такие пластины не вытягиваются под действием силы тяжести ротора, имеют высокую жесткость на кручение и очень маленькую жесткость на изгиб. Опоры для роторов массой до 50 кг подвешивают на трех пластинах — двух вертикальных и одной поперечной. Поперечная пластина дает возможность опоре поворачиваться вокруг вертикальной оси, что необходимо для моментной балансировки, т.е. опора имеет две степени свободы. Опоры для роторов большой массы подвешивают на двух вертикальных пластинах. При этом опрокидывающий момент вдоль оси станка воспринимают три пары роликов.

В отличие от пластин стержни имеют одинаковую жесткость в плоскости колебаний, поэтому обеспечивают две степени свободы и выдерживают большие нагрузки.

В опоре устанавливаются и зажимаются подшипники балансируемого ротора. Конструкция и материал, из которого сделана опора, определяют ее малую массу. Колебания опоры при ба-

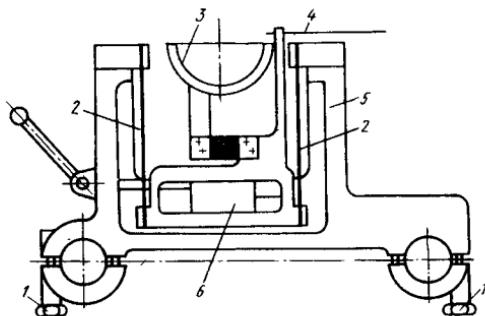


Рис. 4.18. Опорный узел зарезонансного балансировочного станка

лансировке передаются датчику через стяжень 4. Сам датчик устанавливают на стойке опоры. Максимальные перемещения опоры в горизонтальном направлении ограничиваются винтами.

Для фиксации опоры при транспортировке, во время установки и снятия ротора, а также разгона и торможения детали в опорном узле предусмотрен тормоз 6. Корпус тормоза закреплен на стойке. Зажимное устройство под действием пружин воздействует на рычаги, фиксирующие опору. Торможение опоры производится рукояткой или пневматическим зажимом.

Дорезонансные опорные узлы отличаются от зарезонансных тем, что опоры жестко закреплены на стойках 2 (рис. 4.19). Пружина 4 прижимает опору 5 к пьезодатчику 1. Опоры подвешиваются обычно на стержнях 3.

Динамометрические опоры (рис. 4.20) изготавливают из одного куска металла. Такую опору непосредственно устанавливают на станине станка. На ее верхней части закрепляют технологическую опору (например, роликовую). Технологическая опора с помощью винта 1 может перемещаться по направляющим вверх или вниз. На подвижной части 2 опоры устанавливают индукционный датчик с рычажным механизмом. Неподвижную часть 4 опоры стержнем 3 соединяют с рычажным механизмом.

В опорах разгонно-балансировочных стендов применяют изотропную подвеску. Изотропность обеспечивается установкой стяжней под углом 90° друг к другу.

Балансировочные устройства станков с вертикальной осью вращения (рис. 4.21) вместо опоры имеют опорный шпиндель 1. Стойки 2 и упругие элементы 3 аналогичны опорным узлам станков с горизонтальной осью вращения. В зависимости от типа устройства для подвески используют пластины или стержни.

Применяемые для подвески пластины шире пластин горизон-

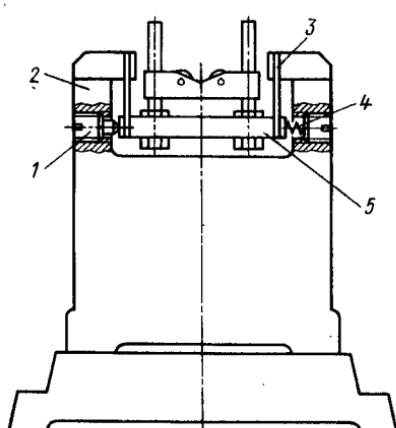


Рис. 4.19. Опорный узел дорезонансного балансировочного станка

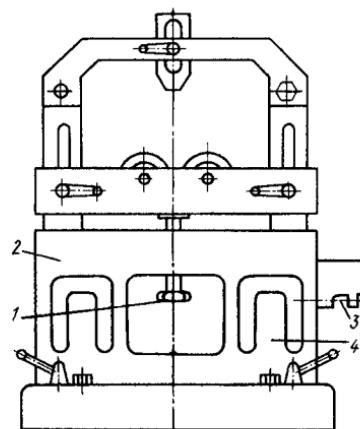


Рис. 4.20. Динамометрическая опора дорезонансного балансировочного станка

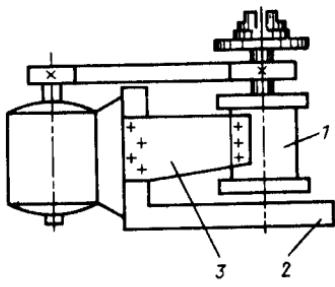


Рис. 4.21. Балансируочное устройство станка с вертикальной осью вращения

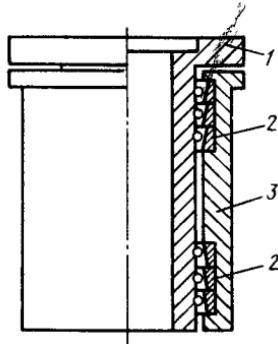


Рис. 4.22. Шпиндель балансируочного устройства

тальных станков, чтобы не терять устойчивости под действием силы тяжести шпинделя с балансируемой деталью. Для деталей большой массы в основном используют дорезонансные балансируочные устройства.

Опорный шпиндель позволяет точно устанавливать балансируемую деталь. Шпиндель (рис. 4.22) состоит из вала 1, подшипников 2, корпуса 3. На валу расположено зажимное устройство для крепления детали, шкив, муфта или зубчатое колесо для передачи крутящего момента от приводного электродвигателя.

В качестве подшипников шпинделя используют высокоточные многорядные подшипники качения. Высокая точность изготовления и сборки шпинделя обеспечивает минимальные биения вала, большую жесткость и долговечность опор. Охлаждение и смазывание подшипников проводится жидким маслом, подаваемым в шпиндель с помощью специальной системы станка.

Узел привода станков с горизонтальной осью вращения смонтирован на станине (рис. 4.23). В устройствах с ленточным соединением весь узел может перемещаться по направляющим станины.

Электродвигатель привода 6 крепится на плите 8 и перемещается в качалке 5 поперек направляющих. Качалка подвешена на раме 7 с помощью двух цапф. Плоский ремень накидывают на натяжные ролики 4 и ролики леникса 2. С помощью поворота траверсы леникса 3 регулируется расположение обеих ветвей ремня. При изменении положения плиты в качалке меняется натяжение ремня. Тормозное устройство 1 обеспечивает быстрый останов детали после выключения электродвигателя. Вместе с выключением электродвигателя отключается соленоид 10 тормозного устройства. Пружина 11 сжимает колодками 9 тормозной барабан. При пуске электродвигателя соленоид с помощью рычага раздвигает колодки тормоза, преодолевая усилия пружины.

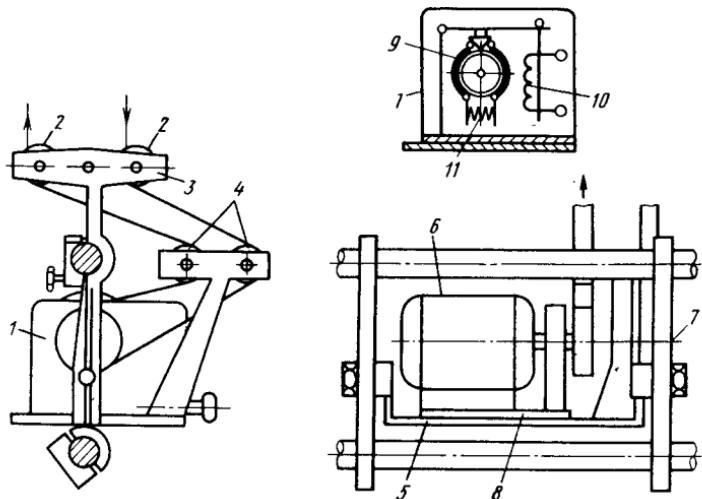


Рис. 4.23. Узел привода балансировочного станка с горизонтальной осью вращения

Простейшей коробкой передач с постоянным передаточным отношением является клиноременная передача (рис. 4.24). На валу электродвигателя установлен шкив 1, приводящий через клиновые ремни 2 во вращение шпиндель 3. На шпинделе устанавливают сменный шкив 4 для передачи необходимой скорости вращения ротору.

При передаче больших крутящих моментов ремень натягивают перемещением одного из роликов специальным электродвигателем, дополнительным грузом, пневмоцилиндрами или вручную винтовой парой.

Аппаратура управления электродвигателем привода смонтирована на станине станка или в отдельном шкафу. Электрооборудование станка работает от сети переменного тока напряжением 380 В. Вводной пакетный выключатель и кнопки управления установлены на панели (рис. 4.25).

В станках с тиристорной системой управления электродвигателем на панели расположены регулятор частоты вращения балансируемого ротора.

Датчики станка являются отдельными узлами измеритель-

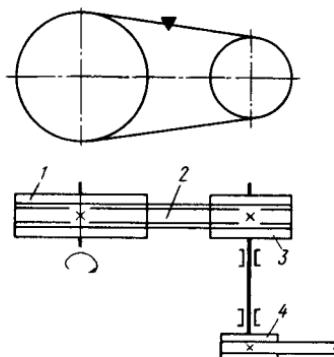


Рис. 4.24. Клиноприводная передача

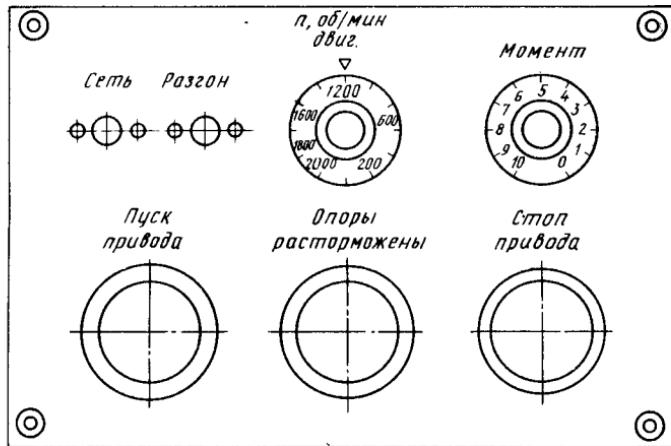


Рис. 4.25. Панель управления приводным устройством

ного устройства. Чувствительные элементы пьезоэлектрических и токовихревых датчиков находятся в металлическом корпусе. Корпус имеет резьбу, с помощью которой датчик ввертывают в стойку станка или корпуса машины (рис. 4.26).

Индукционный датчик (рис. 4.27) представляет собой катушку 6, установленную на плоских пружинах 5 в кольцевом пазу сильного постоянного магнита 4 так, чтобы она могла свободно перемещаться вдоль оси. Магнит укреплен на стойке станка с помощью пружин 8. Катушка соединена с опорой стержнем 2. Магнит с катушкой закрыт герметичным кожухом 3 с резиновой мембраной 1 и крышкой 7 на задней стенке кожуха.

В балансировочных станках применяют индукционные датчики и других конструкций, в которых перемещается не катушка, а постоянный магнит.

Стробоскопический датчик смонтирован в корпусе 1

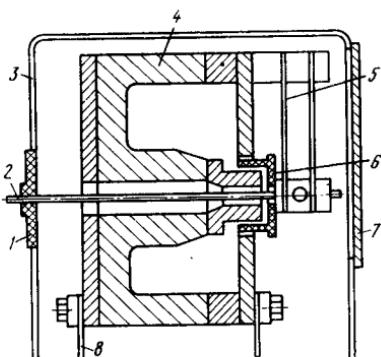
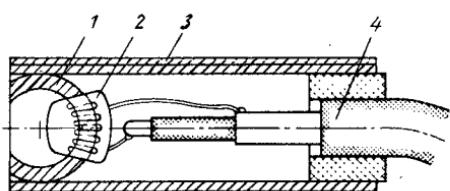


Рис. 4.26. Токовихревый датчик:
1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – корпус;
4 – кабель

Рис. 4.27. Индукционный датчик

Рис. 4.28. Стробоскопический датчик

(рис. 4.28) и соединен стержнем 4 с кронштейном 3. Кронштейн укреплен на направляющих или станине станка. Корпус датчика можно перемещать по высоте, поворачивать вокруг оси и перемещать по направляющим. Для создания направленного пучка света служит рефлектор 2.

Все датчики с измерительным пультом соединяют с помощью специальных кабелей и разъемов.

Измерительный пульт зарезонансного балансировочного станка с избирательным усилителем, стробоскопом и потенциометрической цепью разделения плоскостей коррекции показан на рис. 4.29. На передней панели пульта находятся органы управления и настройки измерительного устройства.

Потенциометр 1 и переключатель диапазонов 2 служат для настройки фильтра на частоту вращения ротора. Корректировка угла дисбаланса осуществляется потенциометром 3. Исключение влияния плоскостей коррекции производят с помощью потенциометров 4 и переключателей фазы датчиков 5. Чувствительность измерительного устройства уменьшают потенциометрами масштаба 6. Органы управления, применяемые при настройке станка на балансировку ротора определенной геометрии и массы, закрывают прозрачной крышкой и ими не пользуются при балансировке.

Для определения значения и угла дисбаланса в плоскости измерения пользуются переключателями: 7 — плоскости измерения, 8 — значение и угол дисбаланса, 9 — легкое — тяжелое место и 10 — масштаб. Отсчет показаний снимают с микроамперметра 11, укрепленного на пульте. Его можно поворачивать в удобное для наблюдения положение.

К задней стенке пульта через штекерные разъемы подключаются датчики и кабель питания. При включении пульта загорается сигнальная лампа „Сеть”.

Измерительная схема смонтирована на шасси, которое закреплено на передней панели пульта. Сама панель установлена в кожухе измерительного пульта. Кожух измерительного пульта стоит на направляющих станка или вмонтирован в отдельный шкаф пульта управления приводным устройством.

Измерительный пульт зарезонансного балансировочного станка с ваттметрами и цепью разделения плоскостей коррек-

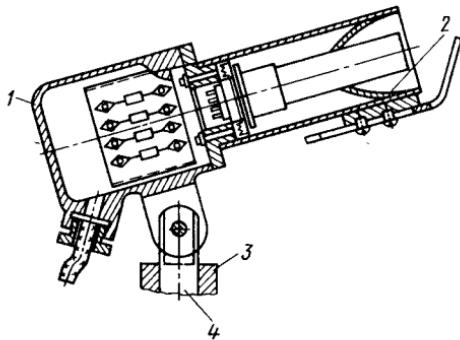
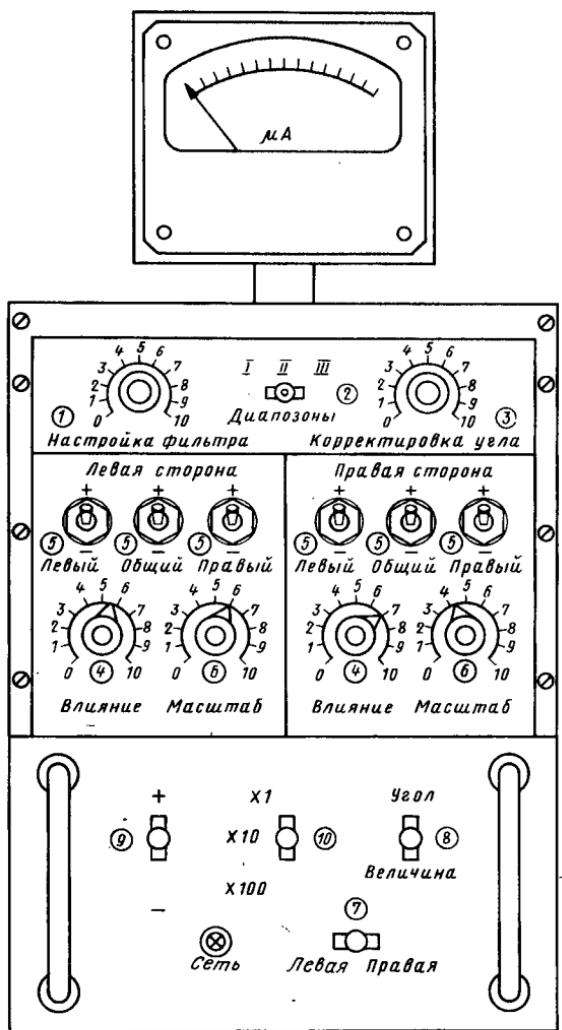


Рис. 4.29. Измерительный пульт с избирательным усилителем, стробоскопом и потенциометрической цепью разделения плоскостей коррекции



ции с операционными суммирующими усилителями показан на рис. 4.30. Клавишные переключатели на нижней панели служат для настройки балансировочного станка по геометрическим размерам ротора. На верхней панели находятся два индикатора значения и угла дисбаланса в каждой плоскости измерения. Для проведения измерений при балансировке нажимают клавишу 1.

Переключатель 2 предназначен для установки скорости вращения и чувствительности измерительного устройства. Клавиши 3, 4, 5, служат для выбора метода определения и устранения дисбалансов ротора. Геометрические размеры балансируемого ротора набирают переключателями r_1 , r_2 , a , b , c . Значение дисба-

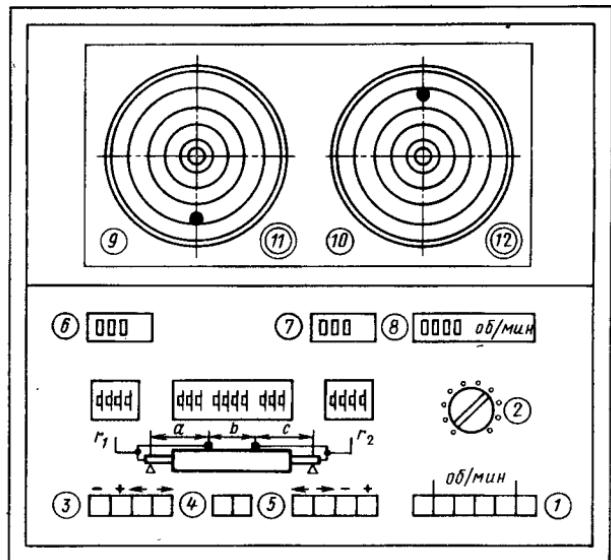


Рис. 4.30. Измерительный пульт с векторметрами и цепью разделения плоскостей коррекции с операционными суммирующими усилителями

ланса или корректирующей массы показывают цифровые индикаторы 6, 7, а частоту вращения — индикатор 8. Одновременно световой точкой показываются дисбалансы в двух плоскостях на экранах векторметров 9, 10. Яркость световой точки регулируют потенциометрами 11 и 12. Измерительный пульт смонтирован в отдельном корпусе.

4.3. ТИПЫ БАЛАНСИРОВОЧНЫХ СТАНКОВ

Одним из признаков технологической классификации балансировочных станков служат степень их универсальности, т.е. то разнообразие роторов, для которых они могут быть использованы. Чем больше это разнообразие, тем шире технологические возможности станка. Балансировочные станки разделяют на четыре типа: универсальные, определенного назначения, специальные и балансировочные комплекты.

Универсальные балансировочные станки используют в серийном производстве для определения дисбалансов роторов различных конструкций. К этому типу относятся зарезонансные и дозероизонансные станки с осевым или ленточным приводом, обладающие высокой точностью и быстрой переналадкой на новый тип роторов. На них можно балансировать роторы, отличающиеся по массе, длине и диаметру в 10..40 раз. Универсальные балансировочные станки характеризуются допустимой массой и

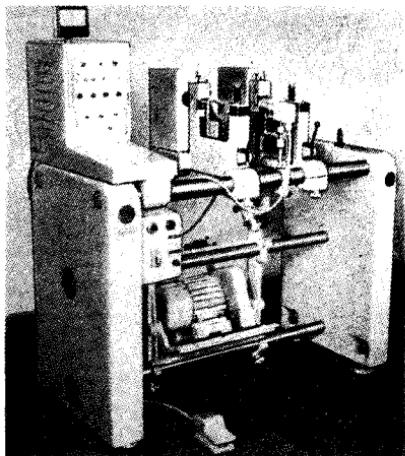


Рис. 4.31. Внешний вид зарезонансного балансировочного станка с ленточным приводным соединением для роторов массой до 50 кг

диаметром ротора, расстоянием между опорами станка, диапазоном частот вращения ротора, мощностью привода и точностью станка.

Минимально допустимая масса ротора — масса баласируемого ротора, при которой обеспечивается заданная точность станка. Максимально допустимая масса ограничена прочностью подвески опор. В нее входит масса ротора, его подшипников и корпуса.

са, оснастки, т.е. вся масса, устанавливаемая на опоры станка.

Допустимый диаметр ротора зависит от расстояния от центров опор до станины (пола) станка. Максимальное расстояние между опорами станка ограничено длиной направляющих станины, а минимальное — толщиной стоек.

У станков, опоры которых имеют гнездо для установки подшипника, указывают его диаметр или наибольший диаметр цапф ротора.

Диапазон частот вращения ротора при балансировке соответствует частотному диапазону измерительного устройства, частоте вращения и мощности приводного устройства.

Универсальные балансировочные станки изготавливают нормальной и повышенной точности.

Основные технические характеристики универсальных балансировочных станков приведены в табл. 4.1.

Для балансировки роторов массой от нескольких граммов до десятков килограммов применяют зарезонансные станки с ленточным приводным соединением (рис. 4.31). Измерительные устройства этих станков обычно имеют избирательный усилиитель, стробоскоп и потенциометрическую цепь разделения плоскостей коррекции. Настройку станка на данный тип ротора проводят с помощью тарировочного ротора.

Балансировку роторов массой до 1000 кг выполняют на зарезонансных и дорезонансных станках как с осевым, так и с ленточным приводом с разнообразными измерительными устройствами.

Универсальные балансировочные станки для роторов массой более 1000 кг изготавливают с осевым приводом и ваттметрическим измерительным устройством. Опоры станков для тяжелых роторов делают дорезонансными. На рис. 4.32 показан внешний вид балансировочного станка мод. ДБ-1001 с привод-

Таблица 4.1

Основные технические характеристики универсальных балансировочных станков

Модель балансиро-вочного станка	Параметры балансируемого ротора			Расстояние между опорами, мм	Диапазон частот вращения, с ⁻¹	Приводное соединение	Мощность привода, кВт	Точность станка
	масса, кг	диаметр рото-ра	диаметр шафта					
9703	0,01...0,3	30	16	12...130	23...90	Ленточное	0,05	
ДБ-1,5	0,1...1,5	135		30...150	110		0,17	Повышенная
9710	0,3...3	270	30	50...360	23...47	"	0,08	
ДБ-10	0,3...10	540	100	50...500	7,5...60	"	1,7	
9714	0,3...30	500	65	50...700	8...33	"	0,8	Нормальная
ДБ-50 (ДБ-50А)	5...50	540	100	50...700	7,5...60	"	1,7	Нормальная повышенная
ДБН-50	5...50	200	100	100...800	7,5...200	"	1,7	
9А725	10...100	800	85	180...1 250	13...25	"	1,7	
9А730	30...300	1200	125	150...2 000	10...15	"	10	Нормальная
ДБ-303А	100...300	1500	350	200...2 300	7,5...60	"	13	
ДБ-1001	100...1 000	2000	300	200...2500	7,5...10	Осьевое	20	
9А731	300...3 000	2500	300	350...6 300	6...10	"	14	
9А736	1 000...10 000	3200	360	350...6 300	6...7,5	"	68	
МС-20	3 000...30 000	3500	460	600...6 000	6...7,5	"	140	
9739	10 000 100 000	2000	600	2000...11 500	6...7,5	"	400	

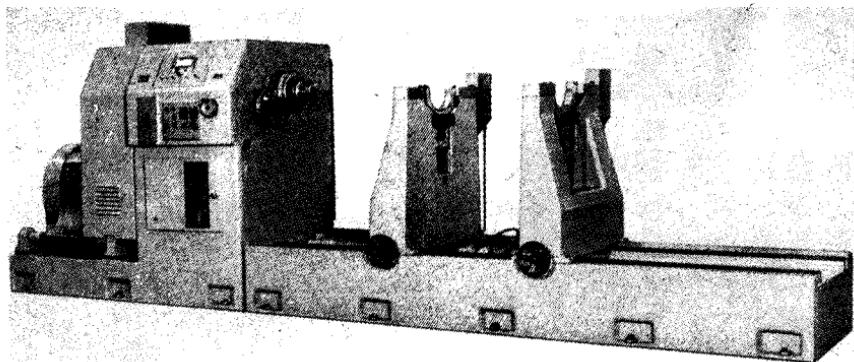


Рис. 4.32. Внешний вид зарезонансного балансировочного станка с осевым приводным соединением для роторов массой до 1000 кг

ным электродвигателем, коробкой передач и шпинделем, на конце которого виден подвижный лимб и приводная муфта. Приводное устройство с пультом управления и измерительное устройство смонтированы на отдельной станине. Масса такого станка составляет 7100 кг.

Станки определенного назначения предназначены для балансировки колес автомобилей, вентиляторов, электрических двигателей в собственному корпусе и т.п. или определенных видов балансировки — статической, высокочастотной. Эти станки менее универсальны, обладают меньшим диапазоном характеристик, но рассчитаны на большую производительность. Их изготавливают на базе универсальных станков и оснащают дополнительными устройствами (например, корректирующими устройствами и специальной оснасткой). Особое место среди станков 2-го типа занимают вертикальные балансировочные станки и станки для высокочастотной балансировки гибких роторов.

Вертикальные балансировочные станки предназначены для статической балансировки в динамическом режиме деталей, не имеющих собственных несущих поверхностей. Принцип действия и конструкция основных узлов станка аналогичны горизонтальным станкам. Отличительной особенностью вертикальных станков является наличие шпинделя с вертикальной осью вращения, на конце которого находится зажимное устройство. Эти станки характеризуются допустимой массой и диаметром балансируемой детали, диапазоном частот вращения, мощностью привода и точностью станка (табл. 4.2).

На рис. 4.33 показан вертикальный балансировочный станок мод. ПСБ-50 с зарезонансным балансировочным устройством, осевым приводом и ваттметрическим измерительным устройством. По вертикальным направляющим станка перемещается двухшпиндельная сверлильная головка, с помощью которой производится корректировка масс детали высверливанием не-

обходится в количества металла. Станок может работать в полуавтоматическом режиме.

Таблица 4.2
Основные технические характеристики вертикальных балансировочных станков

Модель станка	Параметры балансируемой детали		Диапазон частот вращения, с ⁻¹	Мощность привода, кВт	Точность станка, мкм
	масса, кг	диаметр, мм			
9765	1...100	1000	10; 15	2,1	10...4
9766	3...300	1500	6; 15	8,5	10...5
9784Ш	3...30	800	12,5		5
9785Ш	20...100	1130	6,7		7
СБ-12	20...200	600...1100	5	5,5	50
ЭЗ-84	1...17	300	60	1,2	2

Станки для высокочастотной балансировки гибких роторов имеют дорезонансные опоры, осевой привод с широким диапазоном частот вращения, измерительное устройство с токовихревыми датчиками. На высоких частотах балансируют роторы массой до 300 т. Поэтому с целью уменьшения потерь мощности на трение о воздух балансировочное устройство с ротором помещают в герметичную камеру, в которой с помощью вакуумного насоса создается разрежение до 100 Па. Станки для высокочастотной балансировки являются сложными устройствами с дополнительными системами, обеспечивающими транспортировку ротора, смазку его опор, разрежение в камере и т.п.

Специальные балансировочные станки используют в крупносерийном и массовом производстве для балансировки роторов определенной массы и геометрии. Специальный станок изготавливают в нескольких экземплярах.

Для повышения производительности балансировки специальные станки оснащают средствами механизации и автоматизации. Степень автоматизации станка зависит от условий производства и может быть различной. В простейшем случае она включает только определение дисбалансов, в более сложном — корректи-

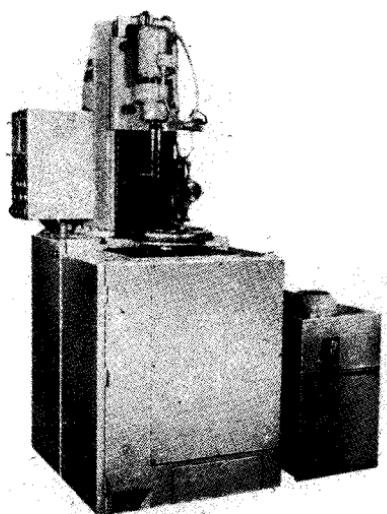


Рис. 4.33. Внешний вид вертикального балансировочного станка для деталей массой до 50 кг

Таблица 4.3

Основные технические характеристики балансировочных комплексов

Наименование комплекта	Модель комплекта	Тип вибропреобразователя	Максимальный диапазон измерения	Диапазон частот вращения, Гц	Датчик отмечки угла
Переносной балансиро-вочный	ПДВ-6			10...50	
Универсальный балансиро-вочный	УБП-1			2 мм 250 мкм	Стробоскоп
Для исследования и ба-лансировки	БИП-5	Индукционный	1000 мкм	15...200	
Выброизмерительный	ВИП-2		1000 мкм 50 м·с ⁻² 100 мм·с ⁻¹	12,5...200	
Виброметр переносной	ВМ-1		30 м·с ⁻²	1,4...2 800	
Измеритель шума и вибраций	ВШВ-003	Пьезоэлектрический	1 000 м·с ⁻²	10...20 000	Нет датчика
Токовихревой бескон-тактный виброметр	ТВВ-2	Токовихревой	2 мм	5...20 000	
Измеритель перемещений	ИП-5К		2 мм	10...1 000	

ровку масс и транспортировку роторов. Например, полуавтомат 9Г725 служит для балансировки коленчатого вала автомобиля ЗИЛ-130 (и его модификаций) в сборе с маховиком и диском сцепления. В станке автоматизированы процессы надевания муфты приводного вала, определения дисбалансов и корректировки масс. Продолжительность балансировки — время, необходимое для проведения балансировочного цикла, включая время установки и снятия ротора со станка, — не превышает 90 с. Продолжительность балансировки станков-автоматов мод. 9А720, предназначенных для роторов электродвигателей, составляет 35 с.

Группы станков-автоматов, связанные между собой автоматическим транспортером, образуют автоматическую линию. Продолжительность балансировки коленчатого вала автомобильного двигателя на автоматической линии МА23-25 из семи станков составляет 67 с, а коллекторного якоря на автоматической линии — 6 с.

Балансировочные комплекты предназначены для определения дисбалансов роторов при балансировке в собственных подшипниках и собственном корпусе без установки на станке. В качестве балансировочных комплексов используют измерительные устройства балансировочных станков, виброметрические приборы общего назначения и специальные балансировочные приборы (табл. 4.3).

Балансировочный комплект, например, мод. ПДБ-6, предназначенный для балансировки шлифовальных кругов (рис. 4.34), состоит из вибро преобразователя, стробоскопического датчика отметки угла дисбаланса, фильтра и индикатора значения дисбаланса. Если в комплекте отсутствует цепь разделения плоскостей коррекции, то для расчета дисбалансов используют микроЭВМ с прикладными программами.

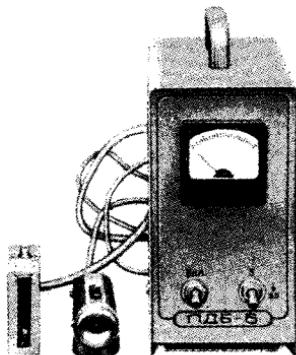


Рис. 4.34. Внешний вид балансировочного комплекта с индукционным датчиком и стробоскопом

4.4. НОРМЫ ТОЧНОСТИ

Балансировочные станки, также как измерительные приборы и оборудование, характеризуются чувствительностью, точностью и рабочими диапазонами.

Чувствительностью балансировочного станка называют отношение изменения показаний индикатора значения или угла дисбаланса к изменению измеряемого значения дисбаланса. Различа-

ют чувствительность дорезонансных и зарезонансных станков. Индикатор дисбаланса дорезонансного станка показывает непосредственно значение дисбаланса в измеряемой плоскости, так как он выпускается заводом-изготовителем, заранее градуированным. Чувствительность зарезонансных балансировочных станков определяют в результате испытаний станка. При этом чувствительность обычно измеряют в удельных единицах, например, отклонение стрелки на одно деление соответствует удельному дисбалансу в $5 \text{ г} \cdot \text{мм}$ на 1 кг массы ротора.

Если измерительный прибор характеризуется, например, классом точности 1, то это означает, что показания имеют погрешность в 1% от предельного значения шкалы. Поэтому он не может измерять величины, меньшие погрешности. Точность балансировочного станка оценивают по минимально достижимым остаточным дисбалансам контрольного ротора, представляющим собой меру перемещений опор станка. Точность станков для динамической балансировки нормирует ГОСТ 20076—74 "Станки балансировочные. Нормы точности". Согласно данному стандарту станки имеют нормальную или повышенную точность.

Станки нормальной точности должны обеспечивать минимальные достижимые удельные остаточные дисбалансы контрольных роторов в плоскостях опор 1...2 мкм, а станки повышенной точности — 0,5...1 мкм. Меньшее значение (1 и 0,5) относится к контрольному ротору максимально допустимой массы на максимально допустимой угловой скорости вращения при балансировке. Остаточные дисбалансы контрольных роторов минимально допустимой массы определяют при минимально допустимых частотах вращения.

Балансировочный станок должен иметь возможно больший диапазон масс роторов, частот вращения, показаний индикаторов дисбалансов. В дорезонансных балансировочных станках рабочий диапазон в основном ограничен минимальной и максимальной массой роторов и максимально допустимой центробежной силой, действующей на опоры. Рабочий диапазон зарезонансных станков определяется прочностью лент и собственными частотами балансировочного устройства.

Оценка норм точности станков осуществляется на заводе-изготовителе и на месте установки станка. В условиях поставки согласовывается место проведения испытаний балансировочного станка.

Точность балансировочных комплектов определяют так же, как у измерительных приборов. При поверке приборов и градуировке датчиков устанавливают: чувствительность, цену деления, интервал деления шкалы, погрешность измерения и диапазон показаний.

Рассмотрим методику испытаний на точность зарезонансных балансировочных станков.

На опорах зарезонансного балансировочного станка устанав-

ливают соответствующий контрольный ротор. Предварительно настраивают измерительный пульт станка и проводят балансировку контрольного ротора до минимальных показаний индикаторов дисбаланса. Окончательно настраивают измерительный пульт и с помощью контрольных грузов способом кругового обхода определяют остаточные дисбалансы в плоскостях коррекции.

Находят значения удельных дисбалансов в плоскостях опор станка по формуле

$$\vec{e}_A, B = \frac{1}{4 m_0 J} [(4J \pm m_0 L^2) \vec{D}_1 + (4J \mp m_0 L^2) \vec{D}_2] \quad (6)$$

где знаки плюс и минус в круглых скобках принимаются для опоры A , а знаки минус и плюс используются для опоры B .

Так как контрольные роторы имеют определенные параметры (массу, момент инерции и т.п.), то эта формула может быть упрощена путем подстановки в нее значений m_0 , J , L . Например, для контрольного ротора массой 50 кг, экваториальным моментом инерции 0,2 кг · м² и расстоянием между серединами цапф 0,352 м будет

$$\vec{e}_A = 0,175 \vec{D}_1 - 0,135 \vec{D}_2;$$

$$\vec{e}_B = 0,135 \vec{D}_1 + 0,175 \vec{D}_2.$$

В этих формулах удельный дисбаланс получается в микрометрах, если подставлять D_1 и D_2 в г·мм.

Вычисления удобно выполнять по прикладной программе для микроЭВМ.

Сравнивая полученные значения удельных остаточных дисбалансов в плоскостях опор с нормами точности, определяют точность балансировочного станка.

В качестве измеряемых параметров дорезонансных станков служат центробежные силы, действующие на опоры. Поэтому методика оценки точности таких станков отличается от изложенной.

На опоры дорезонансного станка устанавливают соответствующий контрольный ротор. По геометрическим размерам ротора настраивают измерительный пульт станка и выполняют балансировку до устойчивых минимальных показаний индикаторов дисбаланса. Рассчитывают точность станка по формуле:

$$\text{Точность станка (мкм)} = \frac{\text{показания индикатора (г·мм)}}{\text{масса контрольного ротора (кг)}}$$

и сравнивают ее с нормами для обеих плоскостей.

Так как точность в этом случае зависит от влияния плоскостей коррекции, то дополнительно определяют коэффициент уменьшения дисбаланса, характеризующий точность всего измерительного устройства. В качестве нормы принимают 95% снижение начального дисбаланса при условии отсутствия погрешности корректировки. Чтобы избежать погрешности корректировки, в плоскости коррекции устанавливают контрольный груз известной массы, создающий дисбаланс в 20 раз больше, чем остаточный дисбаланс. При вращении ротора снимают показания индикатора. Если станок показывает неуравновешенную массу, то сравнивая показания с массой контрольного груза, получают

показания индикатора

$$\text{Коэффициент уменьшения} = 1 - \frac{(z)}{\text{масса контрольного гру-} \\ \text{за (г)}} \cdot 100\%.$$

Подробнее испытания дорезонансных станков изложены в гл. 6.

■ ■ ■

СРЕДСТВА БАЛАНСИРОВКИ

Описываются приспособления для балансировочных станков; даются краткие сведения о средствах измерения, слесарно-сборочном и режущем инструментах.

5.1. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ БАЛАНСИРОВКИ СТАНКОВ

Приспособлениями называют дополнительное оборудование к станкам, предназначенное для связывания со станком деталей и режущих инструментов.

Приспособления для установки и закрепления инструментов принято называть вспомогательными инструментами.

Все приспособления разделяются на две основные группы: приспособления общего назначения и приспособления специальные.

Главным признаком приспособлений общего назначения является широкая универсальность. В эту группу приспособлений входят, например, патроны, тиски, ремни, приводные валы и т.п. Такие приспособления прилагаются в качестве принадлежностей к станкам.

Специальные приспособления пригодны только для детали определенной конструкции или определенной операции, например, балансировочная оправка. При проектировании таких приспособлений стремятся расширить их область применения за счет типизации основных элементов приспособлений. Элементом называют деталь или простейший узел приспособления, предназначенные для выполнения определенной функции. Характерными функциями являются: установочная, зажимная, направляющая, соединительная и некоторые другие.

Конструкция приспособлений должна обеспечивать надежную связь детали (инструмента) со станком; заданную точность балансировки или обработки; безопасность, удобство установки и снятия детали; наибольшую производительность труда.

Приспособления для балансировочных станков предназначены для установки ротора в балансировочном устройстве, со-

единения ротора с приводным устройством, ограждения вращающихся частей, поверки и настройки станка.

В первую группу приспособлений входят технологические опоры, балансировочные рамки и оправки. Ко второй группе приспособлений относятся приводные валы, шкивы, ленточные ремни. Третья группа приспособлений — защитные кожухи для роторов и приводных устройств. Четвертая группа включает контрольные и тарировочные роторы.

Технологические опоры являются установочными элементами, связывающими балансируемый ротор с опорами станка. Элементами для установки цилиндрических несущих поверхностей ротора (цапф) на опорах станка служат: установочные призмы, подшипники трения скольжения, роликовые опоры.

Элементами для установки подшипников трения качения служат: полуцилиндрические гнезда, установочные призмы, кольцевые ролики.

Установочной призмой (рис. 5.1, а) называют элемент, имеющий две рабочие плоскости (грани), расположенные под некоторым углом. Номинальный угол призмы равен 90° , но используют призмы и с другими углами. Расстояние от центра призмы до основания должно быть таким, чтобы ось призм совпадала с осью станка.

Призмы изготавливают из стали, чугуна, бронзы, графита, фторопластика и других материалов. Материал призмы выбирают в зависимости от ее назначения. Если призма является опорой для вращающейся цапфы, то материал подбирают как для подшипника скольжения. Призмы для установки подшипников качения изготавливают из стали, достаточно жесткой, чтобы воспринимать силу тяжести ротора и усилия от натяжения ремня.

На опоре станка призму закрепляют винтами. После выставления соосности опор фиксируют ее положение контрольными штифтами. Основным недостатком призмы является малая площадь контакта с цапфой. По этой причине для роторов большой массы вместо призм применяют полуцилиндрические гнезда (рис. 5.1, б).

Установочную функцию выполняет только гнездо — нижнее полуутверстие. Съемную или откидную крышку строго не фиксируют. Она должна равномерно передавать давление зажатия

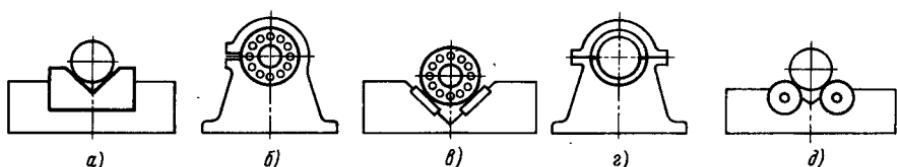


Рис. 5.1. Технологические опоры

на подшипник и не смещать его при закреплении. Полуцилиндрические гнезда выполняют во вкладышах. Точность изготовления вкладышей достаточно высокая. Так как ротор устанавливают на две опоры, то предъявляют высокие требования к отклонениям от соосности вкладышей. Для этого оба вкладыша обрабатывают совместно или пригоняют по месту.

При установке на технологические опоры подшипников качения возникает перекос внешних колец, что создает погрешность балансировки. В полуцилиндрических гнездах и установочных призмах перекос колец подшипников нестабильный и зависит от случайных факторов. Поэтому погрешность балансировки имеет поле рассеивания, затрудняющее учет погрешности при балансировке. Установочным элементом повышенной точности является технологическая опора с косыми роликами (рис. 5.1, в).

Косые ролики — разновидность призм, у которых вместо рабочих поверхностей установлены ролики под углом 90° . Ролик имеет одну точку контакта с подшипником, что определяет высокую стабильность положения подшипника при многократных его установках на косых роликах.

Динамическую балансировку роторов часто проводят на технологических подшипниках качения, в качестве которых используют подшипники тех же типоразмеров, что и рабочие, но повышенной точности с малыми радиальными зазорами.

Подшипники качения устанавливают на цапфы ротора с гарантированными зазорами, величины которых обычно указывают в технической документации. Иногда для обеспечения гарантированного зазора растачивают отверстие внутреннего кольца подшипника. При этом биение базового торца относительно внутреннего диаметра кольца не должно превышать 9 мкм, а овальность и конусность — 5 мкм.

При балансировке роторов используют также подшипники скольжения (рис. 5.1, г) с полужидкостным и жидкостным трением. При этом трущиеся поверхности разделяются слоем жидкости, что значительно снижает трение скольжения твердых тел. Применение газа для разделения поверхностей еще больше уменьшает сопротивление трению скольжения.

Эксплуатационные характеристики подшипников скольжения определяются коэффициентом трения, моментом трогания и сложностью в обслуживании. Коэффициент трения изменяется в зависимости от конструкции в очень широких пределах — от 0,1 до 0,005. В момент начала вращения коэффициент трения резко повышается за счет режима полусухого трения, возрастая до 0,1 и даже более. Подшипники скольжения удобнее, компактнее и надежнее для миниатюрных и крупных цапф роторов.

Подшипник скольжения в основном состоит из корпуса и вкладыша, на который опирается цапфа. При балансировке применяют разъемные подшипники. Такой подшипник удобен при

сборке и позволяет регулировать зазор между цапфой ротора и вкладышем, возрастающий вследствие их износа в процессе балансировки. Для этого между верхним и нижним вкладышами при сборке размещают прокладки из тонких пластинок, после удаления которых при ремонте можно с помощью болтов подтянуть вкладыши и уменьшить зазор. При значительных нагрузках на подшипник на рабочей поверхности вкладыша делают канавку для смазочного материала.

Нормальная работа подшипника скольжения возможна при условии равномерного распределения нагрузки по длине вкладыша. В противном случае возникает заедание вкладыша и цапфы. Для предотвращения этого тщательно устанавливают соосность опор и применяют самоустанавливающиеся подшипники с внутренним сферическим кольцом и желобом.

Вкладыши изготавливают из сплавов цветных металлов, чугуна и неметаллических материалов, обладающих достаточной прочностью, антифрикционными свойствами, высокой износостойкостью и хорошей прирабатываемостью к цапфе вала. Это бронза, бabbitt, латунь, алюминиевые сплавы, легированный серый чугун, графит с пропиткой свинцом и бabbитом, фторопласт-4, капран и т.п.

В технологических подшипниках скольжения в основном возникает сухое, граничное или полужидкостное трение. В техническом паспорте на такие опоры указывают допустимыми значениями удельного давления, скорости скольжения, теплового режима, вид, количество и периодичность смазки. Удельное давление и скорость скольжения рассчитывают соответственно по формулам:

$$p = mg / (ld); \quad v = \omega_b d / 2,$$

а тепловой режим (критерий) равен их произведению pv ; здесь m — масса ротора, приходящаяся на опору; l — длина цапфы; d — диаметр цапфы; ω_b — угловая скорость вращения при балансировке.

В подшипниках скольжения с подачей жидкости или газа под давлением устанавливают вид, расход и давление подачи смазочного материала.

Роликовые опоры (рис. 5.1, δ) имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами технологических опор:

большая универсальность, так как на одной и той же паре роликов возможна установка роторов с большим диапазоном диаметров цапф;

малый коэффициент трения, высокие удельные давления и угловые скорости вращения.

К недостаткам роликовых опор относятся помехи, возникающие из-за погрешностей формы и взаимного положения поверхностей самих роликов и подшипников, на которых они смонтированы.

Роликовая опора состоит из основания с двумя опорными роликами, откидной (съемной) крышки с прижимным роликом. Основание может перемещаться по вертикальным направляющим с помощью винта. Опорные ролики зафиксированы на основании в одном из нескольких возможных положений. В некоторых конструкциях роликовая опора поворачивается на небольшие углы вокруг вертикальной оси опоры станка, что обеспечивает ей вторую степень свободы. Прижимной ролик может перемещаться в вертикальной плоскости и фиксироваться в требуемом положении на крышке. Его используют для прижима цапфы с целью безопасности и при балансировке консольных роторов.

Для уменьшения помех при балансировке ролики изготавливают определенного диаметра. Отклонение формы наружной поверхности ролика (до диаметров 260 мм) не должно превышать 4 мкм, а отклонения расположения роликов в сборе на опоре, такие, как радиальные и торцевые биения, непараллельность, — должны соответствовать III—IV степени точности.

В зависимости от материала и конструкции роликов устанавливают допустимую нагрузку на роликовую опору. Сила тяжести ротора, приходящаяся на опору, не должна превышать установленного допустимого значения.

Детали и узлы, не имеющие собственных несущих поверхностей, монтируют на балансировочных оправках.

Балансировочные оправки являются промежуточными установочными элементами, связывающими балансируемые детали и узлы, которые не имеют собственных несущих поверхностей, с технологическими опорами. За установочную базу принимают ту поверхность детали, по которой осуществляется сопряжение последней с другими деталями ротора.

Установочные базы бывают плоские, цилиндрические, конические и др. Плоские поверхности устанавливают на три опорных штифта или сухаря. Детали с отверстиями устанавливают на цилиндрическую или коническую поверхность оправки. Эта поверхность должна обеспечивать высокую точность и стабильность центрирования детали. Смещение детали с оси оправки ведет к погрешностям балансировки.

Цилиндрическую посадочную поверхность оправки изготавливают с высокой точностью, обеспечивая в первую очередь ее минимальное биение относительно оси оправки. Посадку детали на оправку осуществляют с гарантированным зазором.

Установочную поверхность оправки делают конусной, чтобы деталь удерживалась только силой трения. Благодаря высокой точности базы погрешность установки детали на конусной поверхности равна нулю.

Детали с установочными базами типа валов центрируются на оправках цилиндрическими или коническими отверстиями.

Перекос детали на оправке предотвращается наличием тор-

цовой плоской поверхности, строго перпендикулярной оси.

Зажим детали на оправке должен обеспечивать безопасность в работе, быстроту действия, удобство установки и снятия детали. Для этих целей применяются простые винтовые зажимы с подвижной гайкой. Под гайку подкладывается шайба. Для того чтобы не свинчивать гайку при снятии детали, внешний диаметр гайки делают меньше диаметра отверстия детали, а шайбу выполняют разрезной для быстрого съема.

В тех случаях, когда требуется повышенная точность и производительность балансировки деталей, применяют оправки с самоцентрирующими зажимными устройствами. К ним относятся устройства с неразрезной цангой, мембранные, с гидропластом, а также кулачковые. Эти устройства широко используют для установки деталей на шпинделях вертикальных балансировочных станков.

Оправки для горизонтальных балансировочных станковывают межпорные и консольные. Межпорные оправки предназначены для деталей с отверстием, а консольные — для деталей без отверстия.

Типовая балансировочная оправка (рис. 5.2), кроме установочных поверхностей 3, имеет цапфы 1 и поверхность для приводного ремня 2 или приводную муфту. Все рабочие поверхности тщательно обработаны, имеют высокую твердость и износостойкость. Оправки изготавливают из легированных конструкционных сталей.

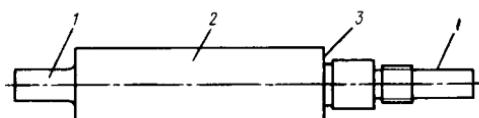


Рис. 5.2. Балансировочная оправка

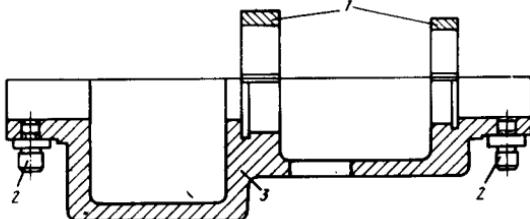
Динамическую балансировку оправок проводят в двух плоскостях коррекции. Допустимые дисбалансы в плоскостях коррекции должны быть на класс выше допустимых дисбалансов деталей, для которых предназначена оправка. В процессе эксплуатации периодически контролируют геометрические размеры оправки и ее дисбалансы. Хранят оправки в вертикальном положении, оберегая от повреждений, загрязнений и коррозии.

Балансировочные рамки предназначены: 1) для установки роторов на опорах станка при балансировке в собственных подшипниках и в собственном корпусе; 2) установки консольных роторов на опорах зарезонансных балансировочных станков; 3) регулирования режима работы станков.

Основными элементами балансированной рамки (рис. 5.3) являются технологические опоры 1 для установки балансируемого ротора, опорные узлы 2 для крепления рамки на станке, корпус 3 или направляющие.

В качестве технологических опор ротора используют устано-

Рис. 5.3. Балансировочная рамка



вочные призмы, полуцилиндрические гнезда, подшипники трения скольжения. Корпус роторов размещают на плоской поверхности рамки и зажимают винтовым зажимом или металлической лентой. В специальных рамках технологические опоры неподвижно закреплены на корпусе. Технологические опоры универсальных рамок могут передвигаться по направляющим и фиксируются в заданном положении.

Конструкция опорных узлов рамки определяется конструкцией опор станка. Они могут иметь цилиндрическую или плоскую поверхность. На станках, опоры которых имеют две степени свободы, рамку крепят неподвижно. На опорах с одной степенью свободы рамку устанавливают с помощью шарниров, обеспечивающих ей малые угловые перемещения. Роль шарниров выполняют упорные подшипники скольжения или качения, внутреннее кольцо которых связано с рамкой, а внешнее с опорой станка.

На корпусе рамки (направляющих) крепятся все элементы конструкции. Конструкция рамки должна отвечать следующим дополнительным требованиям:

обладать высокой жесткостью во всех направлениях;

центр массы рамки с ротором должен находиться на оси станка между его опорами;

не нарушать расчетный режим работы станка.

Смещение центра массы ротора к одной из опор станка, наличие большой паразитной массы (технологические опоры, корпус, рамка) нарушают расчетный режим работы станка. Понижается порог чувствительности и производительность балансировочного станка. Если балансировка в этих условиях не обеспечивает заданной точности, то с помощью рамки регулируют режим работы станка. Регулирование режима работы выполняют двумя способами.

По первому способу необходимый режим устанавливают путем изменения паразитной массы. К опорным узлам рамки прикрепляют такие дополнительные массы, которые увеличивают чувствительность станка. Это происходит, когда центр масс балансировочного устройства с ротором, рамкой и дополнительными массами будет находиться в середине между опорами.

По второму способу регулирование режима работы станка достигается изменением геометрии рамки (ее длины) и положения балансируемого ротора. Последовательно перемещая технологические опоры с ротором и опорные узлы рамки по направляющим, находят их оптимальное положение, при котором порог чувствительности станка выше допустимого значения дисбаланса. Это наблюдается при условии $mL_A L_B \sim J \rightarrow 0$, где m — вся паразитная масса вместе с массой ротора; L_A (L_B) — расстояние от центра масс балансировочного устройства до опоры станка A (B); J — экваториальный момент инерции балансировочного устройства.

Балансировочная рамка отвечает тем же техническим требованиям, что и механическая часть станка. Отклонения от параллельности направляющих и оси технологических опор в вертикальной и горизонтальной плоскостях, отклонения от соосности опор соответствуют VIII—IX степени точности.

В процессе эксплуатации балансировочные рамки периодически контролируют на соответствие заданным техническим требованиям, оберегают от повреждений, загрязнений и коррозии.

Приводной вал является основным элементом осевого соединения. В балансировочной практике широко применяются двухшарнирные приводные валы, а также приводные валы с упругими или зубчатыми муфтами.

Двухшарнирные приводные валы имеют жесткую конструкцию, обеспечивающую передачу больших крутящих моментов. Такой приводной вал (рис. 5.4) состоит из вала 1 и двух шарнирных муфт 2 на его концах. Шарнирные муфты передают крутящий момент и допускают перемещения самого вала в двух

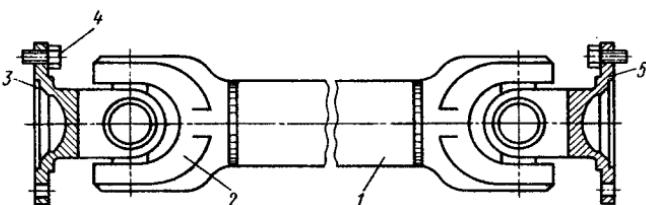


Рис. 5.4. Двухшарнирный приводной вал

перпендикулярных плоскостях. Шарниры муфт выполнены на подшипниках качения или скольжения. Оси шарниров расположены под углом 90° относительно друг друга. Полумуфта 3 жестко соединена с помощью винтов 4 со шпинделем балансировочного станка. Другая часть муфты также жестко (сваркой) соединена с валом. Полумуфта 5 через переходную втулку соединена с ротором. Переходную втулку изготавливают индивидуально для каждого типа балансируемого ротора.

Приводные валы с упругими муфтами применяют при балансировке роторов массой до 100 кг. При этом обеспечивается более высокая точность балансировки по сравнению с другими конструкциями приводных валов. Податливость муфты определяется деформацией упругого кольца, в котором расположены четыре отверстия под углом 90° друг относительно друга. В эти отверстия входят два пальца полумуфты, закрепленной на шпинделе (роторе), и два пальца, установленные в полумуфте, связанной с валом. Значительную податливость муфты обеспечивают кольца из резины.

Высокую жесткость соединения имеют *приводные валы с зубчатыми муфтами*. Полумуфты соединяются сферическим шарниром и зубчатым зацеплением. На венце одной полумуфты нарезаны наружные, а на венце другой — внутренние зубья со специальным профилем.

К недостаткам приводных валов, создающим погрешность балансировки, относятся: трение в шарнирах, дисбаланс вала, радиальные биения шпинделя, полумуфт и промежуточной втулки.

Трение в шарнирах приводного вала влияет на чувствительность балансировочного станка по значению и углу дисбаланса. Так, например, порог чувствительности станка с приводным валом при балансировке коленчатого вала в сборе с маховиком и сцеплением автомобиля по значению дисбаланса составляет 26 г·мм, а по углу дисбаланса $\pm 5^\circ$.

Приводной вал имеет собственный дисбаланс, который воспринимается измерительным устройством станка как дисбаланс ротора. Поэтому приводные валы тщательно балансируют с помощью контрольного ротора.

Большое значение имеет центровка приводного вала относительно оси ротора. В соединениях вала со шпинделем, промежуточной втулкой и валом за счет радиальных биений посадочных поверхностей, наличием зазоров в соединениях происходит смещение оси приводного вала, приводящее к дисбалансам. Значение и угол этих дисбалансов изменяются от ротора к ротору при балансировке партии. Уменьшение погрешности балансировки за счет радиальных биений достигается высокой точностью изготовления посадочных поверхностей и правильным выбором приводного вала.

Основным параметром приводного вала является его масса. Массу приводного вала выбирают с учетом массы балансируемого ротора и его допустимых дисбалансов по табл. 5.1.

При эксплуатации приводных валов контролируют геометрические размеры посадочных поверхностей полумуфт, дисбалансы валов, трение в шарнирах, периодически заменяют смазочный материал в шарнирах.

Таблица 5.1

Массы приводных валов

Масса ротора, кг	Масса приводного вала, кг				
	0,5	1	2	4	8
Погрешность балансировки, г·мм/кг					
20...100	0,5...1	1...0,2	2...0,5	5...0,7	
50...400		0,5...0,1	0,7...0,1	2...0,2	5...0,5
200...1 000			0,2...0,1	0,5...0,1	0,7...0,2
500...4 000				0,2...0,1	0,3...0,1
2 000...10 000					0,1

Масса ротора, кг	Масса приводного вала, кг			
	16	32	64	128
Погрешность балансировки, г·мм/кг				
20...100				
50...400				
200...1 000	2...0,3		6...0,6	
500...4 000	0,5...0,1		1...0,1	2...0,3
2 000...10 000	0,2...0,1		0,3...0,1	0,6...0,2
				1,5...0,3

Шкивы и ленточные ремни используют в ленточных и тангенциальных соединениях для передачи вращения от приводного устройства к ротору.

Шкив устанавливают на выходной вал приводного электродвигателя или коробки передач. Внутренний диаметр шкива соответствует диаметру выходного вала. Наружный диаметр шкива выбирают в зависимости от заданной частоты вращения ротора при балансировке по формуле

$$d_{\text{нар}} = d_{\text{рот}} \omega_b / \omega_{\text{пр}},$$

где $d_{\text{рот}}$ — диаметр поверхности ротора под ремень; ω_b — угловая скорость ротора при балансировке; $\omega_{\text{пр}}$ — угловая скорость выходного вала приводного устройства.

Радиальное и торцовое биение шкива должны быть минимальными, чтобы не оказывать влияния на балансируемый ротор.

В приводных устройствах применяют плоские бесконечные ремни на синтетической основе. Они обладают малым растяжением под действием усилия натяжения, покрыты маслостойким лаком, имеют хорошее сцепление с приводными поверхностями. При вращении ротора практически отсутствует

скольжение ремня, что обеспечивает высокую стабильность балансировки. Для уменьшения погрешностей, вносимых ремнем при балансировке, его длину делают более трех окружностей приводной поверхности ротора. При балансировке легких роторов ремень заменяют капроновой нитью.

Заданные кожухи устанавливают на балансировочных станках для ограждения вращающихся частей, а также уменьшения трения роторов с лопатками о воздух. При высокочастотной балансировке кожухи необходимы также для защиты рабочего места балансировщика при разрыве балансируемого ротора.

Для ограждения кожухи изготавливают из тонколистовой стали и оргстекла. Их закрепляют на станине или опорных стойках. Кожух для ротора имеет горизонтальный разъем. Верхняя крышка откручивается на петлях и фиксируется упорами. Перед балансировкой крышку опускают и закрывают на замки.

Заданные кожухи изготавливают из толстолистовой стали сварной конструкции. В нижней части кожуха находятся ролики, с помощью которых его надвигают на балансировочное устройство станка. Ролики катятся по направляющим станины или рельсам, лежащим на полу.

Контрольные роторы применяют для проверки балансировочных станков. Размеры, масса и другие параметры этих роторов определены ГОСТ 20076—74.

Контрольные роторы (рис. 5.5) для станков с горизонтальной осью вращения имеют симметричную цилиндрическую форму постоянного диаметра с двумя одинаковыми цапфами 2. Обработку всех поверхностей проводят при одной установке относительно центров. В крайних плоскостях бочки ротора выполнено по восемь радиальных резьбовых отверстий 1 через 45° . Там же через каждые 10° нанесены отрезки линий 3 вдоль оси ротора с указанием углов через каждые 30° . Массу и моменты контрольного ротора устанавливает изготовитель станков. Для проверки станка требуется два контрольных ротора. Один ротор имеет массу и моменты инерции, соответствующие нижнему, а другой — верхнему диапазону масс балансируемых роторов. Контрольный ротор полностью сбалансирован, имеет высокую точность изготовления всех рабочих поверхностей. Отклонения формы и расположения поверхностей соответствуют III—IV степени точности.

Для проверки станков с вертикальной осью вращения контрольные роторы выполняют в виде диска (рис. 5.6) с отношением диаметра к толщине 2:1. В нижней его части имеется центрирующий поясок 1 и отверстия 2 для установки и крепления диска на шпинделе станка. В трех сечениях 3 ротора через каждые 15° сделаны радиальные резьбовые отверстия 4. Причем среднее сечение проходит через центр масс контрольного ротора, а крайние сечения находятся от среднего на одинаковых расстояниях. Технические требования, предъявляемые к контроль-

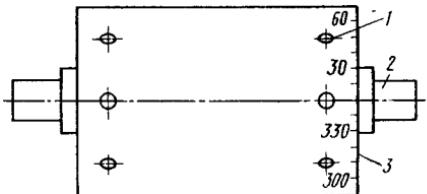


Рис. 5.5. Контрольный ротор для горизонтального балансировочного станка

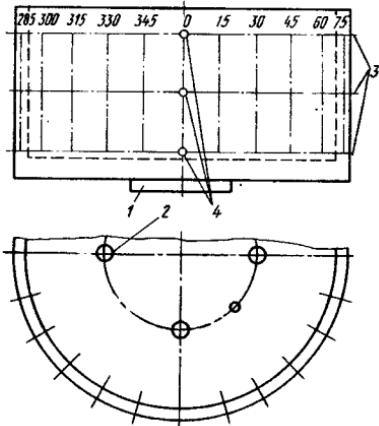


Рис. 5.6. Контрольный ротор для вертикального балансировочного станка

ным роторам для станков с вертикальной осью вращения, та же, что и для контрольных роторов для станков с горизонтальной осью.

К контрольным роторам прилагается набор контрольных грузов, масса которых охватывает весь диапазон показаний станка.

Тарировочный ротор используют для настройки станка на балансировку ротора определенной геометрии и массы. Ротор собирают из тех же деталей и с учетом тех же требований, что и серийный ротор. Для каждого типа балансируемых роторов изготавливают свой тарировочный ротор. Такой ротор должен быть сбалансирован по крайней мере на класс точнее серийного ротора.

На каждый тип тарировочного и контрольного ротора оформляют технологический паспорт. В паспорте указывают все технические данные ротора, фактические значения остаточных дисбалансов и результаты периодических проверок.

Контрольные и тарировочные роторы хранят в вертикальном положении в специальной таре, предохраняющей его от повреждений и загрязнений.

5.2. СЛЕСАРНО-СБОРОЧНЫЙ ИНСТРУМЕНТ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

В процессе подготовки балансировочного станка и ротора к работе при корректировке масс балансировщик пользуется гаечными ключами, молотками, отвертками, плоскогубцами и другим слесарно-сборочным инструментом.

Применяются ключи с плоскими открытыми зевами (рис. 5.7, а) двусторонние или односторонние, накладные гаечные ключи с шестью гранями с закрытым зевом (рис. 5.7, б).

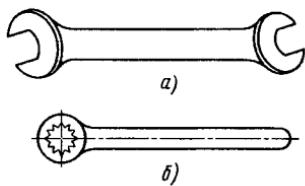


Рис. 5.7. Гаечные ключи

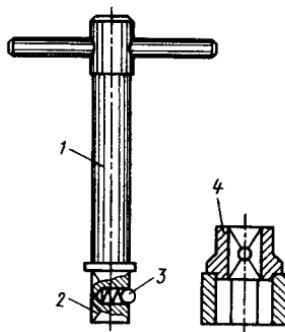


Рис. 5.8. Торцовой гаечный ключ со сменной головкой

При сборке резьбовых соединений удобны торцевые гаечные ключи со сменными головками. Стержень 1 такого ключа (рис. 5.8) имеет унифицированный четырехгранник 2 с шариковым фиксатором 3. Сменные головки 4 для различных гаек имеют такое же отверстие, как и стержень под шариковый фиксатор. Замена одной головки на другую производится достаточно быстро. Для завинчивания круглых гаек со шлицами применяют С-образные ключи (рис. 5.9, а) или шлицевые закрытые ключи (рис. 5.9, б).

Одним из основных требований, предъявляемых к сборке резьбовых соединений, является обеспечение заданного конструктором усилия затяжки (чаще крутящего момента), что указывается в технических требованиях чертежа узла. Требуемое усилие затяжки обеспечивают динамометрические и предельные ключи.

Динамометрический ключ (рис. 5.10) состоит из головки 1, рукоятки 4 и динамометра, включающего упругий элемент 2, стрелку-указатель 3 и шкалу 5. При затяжке резьбового соединения головка 1 ключа надевается на хвостовик торцевого ключа. Рабочий создает определенный крутящий момент, прикладывая усилия к рукоятке 4. Упругий элемент 2 при этом изгибается и стрелка-указатель 3 показывает по шкале 5 создаваемый крутящий момент. Упругий элемент представляет собой в простейшем случае металлический стержень. Динамометрические ключи периодически проверяют на точность градуировки.

У предельных ключей нет отчетного устройства. Заданный крутящий момент получается автоматически благодаря наличию специального механизма. При достижении заданного крутящего момента передача усилия на гайку прекращается, а ключ проворачивается.

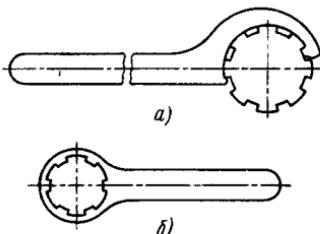


Рис. 5.9. Ключи для завинчивания круглых гаек

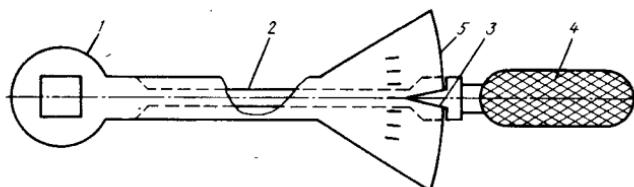


Рис. 5.10. Динамометрический ключ

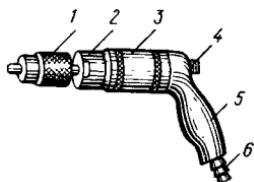


Рис. 5.12. Ручная сверлильная пневматическая машинка



Рис. 5.11. Выколотка

Гаечные ключи изготавливают из стали с зазором между губками ключа и гранями гайки или головки болта 0,1...0,3 мм.

Молотки изготавливают различной формы, массы, материала. Молотки из резины, кожи, дерева и других мягких материалов применяют для снятия и установки деталей с небольшим натягом. Стальные молотки используют совместно с выколотками.

Выколотка (рис. 5.11) предназначена для запрессовки и выпрессовки штифтов, призонных болтов и других операций, требующих удара. Ее изготавливают из мягкой стали, меди, текстолита, что предохраняет собираемые детали от повреждения при ударе молотком по выколотке. Выколотка имеет вставные наконечники. Верхний наконечник со сферической поверхностью направляет удар вдоль оси выколотки. Наконечники заменяют по мере необходимости или выхода из строя, сохраняя при этом основание выколотки.

При работе балансировщик использует также и другие слесарные и специальные инструменты.

Для уменьшения трудоемкости балансировочных работ применяют также пневматические и электрические сверлильные машинки. Ручная сверлильная пневматическая машинка Д-2 (рис. 5.12) имеет частоту вращения шпинделя 2500 об/мин при давлении воздуха в сети 0,5 МПа. Сжатый воздух поступает в камеру между ротором и статором и давит на рабочие лопатки, вращая ротор с частотой 12 000 об/мин. Редуктор понижает частоту вращения до 2500 об/мин. Пневматическая машинка имеет ручку 5, ротор 3, насадку 2, патрон 1, пусковую кнопку 4 и ниппель 6. В патрон машинки вставляют режущие инструменты.

Электрическая сверлильная машинка И-38 (рис. 5.13) с угловой насадкой имеет асинхронный электродвигатель, питаемый от сети напряжением 36 В частотой 50 Гц. На корпус 6 ма-

Рис. 5.13. Электрическая сверлильная машинка

шинки навернута гайкой 5 трубка 4 с головкой 3 под углом 90° . Хвостовик валика вставляется в корпус втулки электродвигателя.

Коническая шестерня валика, находящаяся в зацеплении с конической шестерней головки, вращает шпиндель. На хвостовик шпинделя надевается трехкулачковый патрон 2 со сверлом 1 или другим режущим инструментом. Кнопка 7 служит для включения машинки.

Сборочные приспособления делят на установочные и рабочие. К установочным приспособлениям относятся неподвижные стапели и сборочные тележки. Их конструкция соответствует конфигурации собираемого узла. Приспособления имеют фланцы, угольники и другие элементы, необходимые для крепления узла. Приспособления для тяжелых деталей снабжены специальным механизмом, позволяющим поворачивать собираемый узел вокруг горизонтальной или вертикальной оси. Приспособления, служащие для межоперационного перемещения (тележки), имеют колесный ход с поворотным устройством. Например, сборочная тележка для коленчатого вала (рис. 5.14) состоит из рамы 1, четырех поворотных колес 2, двух полуухватных гнезд 3 для установки коленчатого вала. Крепление вала осуществляется полуцилиндрическими кольцами. Для предохранения шеек вала предусматриваются фетровые чехлы.

Основную массу рабочих приспособлений составляют приспособления для запрессовки и съемники разнообразных конструкций.

Приспособления для запрессовки, часто называемые оправками (рис. 5.15), представляют собой жесткий стакан 1 с нап-

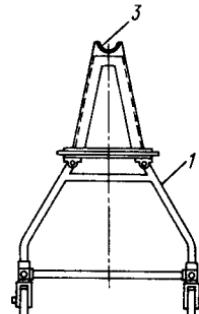
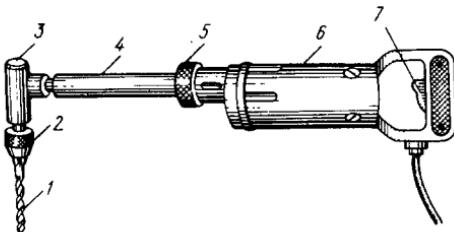


Рис. 5.14. Сборочная тележка

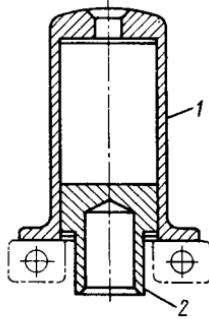


Рис. 5.15. Приспособление для запрессовки

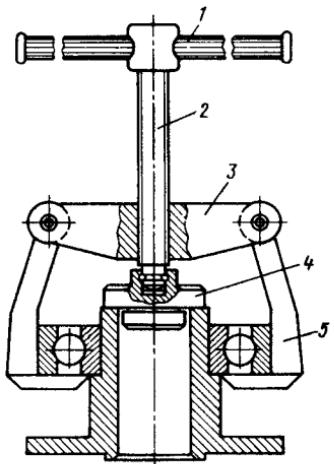


Рис. 5.16. Приспособление для выпрессовки – съемник

равляющим пальцем 2. Усилие запрессовки прикладывают к сферической поверхности стакана вручную или с помощью пресса. В ряде конструкций приспособлений предусмотрена винтовая пара с воротком. Вращение воротка создает необходимую силу для запрессовки детали.

Съемник (рис. 5.16) предназначен для выпрессовки детали из узла, например, снятия подшипника с вала. Внутреннее кольцо подшипника охватывается лапками 5, подвижно соединенными с траверсой 3. Предохранительная пята 4, шарнирно связанныя с винтом 2, упирается в вал. Вращая вороток 1 с помощью винта, создается усилие выпрессовки и подшипник снимается с вала.

При выполнении балансировочных работ используют смазочные, обтирочные, противокоррозионные и другие вспомогательные материалы. Среди последних особое место занимает воск и восковой пластилин, которые широко применяются при определении дисбалансов ротора. Смазочные материалы (масла) наносятся на поверхность детали погружением в масляную ванну или чистой рукой. Для консервации поверхности применяют трансформаторное, веретенное, моторное масло, а также густые смазочные материалы.

5.3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение — это определение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерение не может быть проведено абсолютно точно. Высокая точность измерения может быть достигнута при выполнении определенных правил. Основные причины, поникающие точность измерения, — неудовлетворительное состояние инструмента; неточность установки инструмента относительно детали; незнание устройства измерительного инструмента или неумение пользоваться им.

В балансировочной практике в зависимости от требуемой точности измерения применяют простые средства измерения, измерительные инструменты и приборы.

Простые средства измерения. Измерительные металлические линейки предназначены для непосредственных измерений длин.

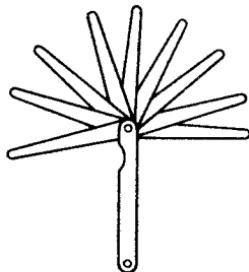
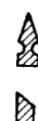
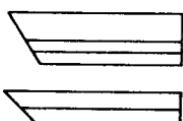
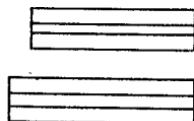


Рис. 5.17. Лекальные линейки

Рис. 5.18. Набор щупов

Линейки изготавливают с пределами измерений от 150 до 1000 мм с ценой деления 1 мм. Линейки имеют один и два рабочих торца.

Угольники с углом 90° предназначены для разметки и контроля прямых углов деталей, проверки взаимной перпендикулярности отдельных поверхностей деталей, при монтаже станков и приборов.

Лекальные линейки (рис. 5.17) предназначены для контроля прямолинейности и плоскостности небольших поверхностей деталей способом световой щели. Проверочные линейки применяют для контроля плоскостности поверхностей способом "на краску".

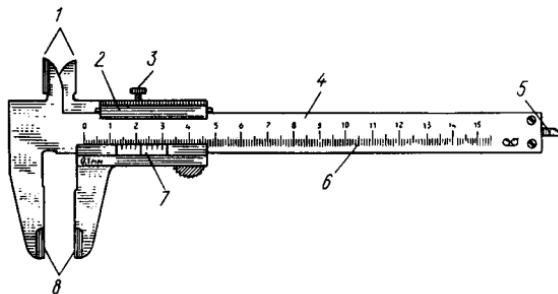
Щупы предназначены для определения величины зазора между двумя поверхностями контактным методом. Щуп (рис. 5.18) представляет собой стальную плоскую пластинку определенной толщины. Щупы соединяют в наборы, в которых пластиинки закрепляют в порядке возрастания их толщины. Изготавливают четыре номера наборов с диапазоном толщин щупов 0,02...1 мм.

Технические уровни предназначены для контроля горизонтального и вертикального положения поверхностей.

Брусковый уровень служит для контроля горизонтального положения, рамный уровень, кроме горизонтального, контролирует и вертикальное положение поверхностей. Установочные уровни монтируют в оборудование, например, на станок для статической балансировки для контроля его установки в горизонтальное положение.

Штангенинструменты используют для измерения линейных размеров прямым методом. Штангенциркуль ШЦ-1 с пределами измерений 0...125 мм и величиной отсчета по нониусу 0,1 мм предназначен для наружных и внутренних измерений и для измерения глубин. Основной частью штангенциркуля (рис. 5.19) является штанга 4 с миллиметровыми делениями 6, на одном конце которой имеется линейка глубиномера 5, а на другом — неподвижные измерительные губки 1 и 8. По штанге перемещается рамка 2 с губками 1, 8. На скошенной грани рамки на-

Рис. 5.19. Штангенциркуль ЩЦ-І



несена шкала (нониус) 7. Ноныус длиной 19 мм разделен на 10 частей. При измерении рамку закрепляют на штанге с помощью винта 3.

Целое число миллиметров отсчитывают по шкале штанги слева направо нулевым штрихом ноныуса. Количество десятых долей миллиметра определяется умножением величины отсчета (0,1 мм) на порядковый номер штриха ноныуса (не считая нулевого), совпадающего со штрихом штанги.

Штангенциркули ЩЦ-ІІ, ЩЦ-ІІІ с величиной отсчета по ноныусу 0,05 мм и пределами измерений соответственно 0...160 мм и 0...400 мм имеют микрометрическую подачу рамки. Микрометрическую подачу применяют для точной установки рамки относительно штанги. Рамка штангенциркуля 1 (рис. 5.20) соединена винтом и гайкой 6 с рамкой микрометрической подачи 4. Обе рамки 1 и 4 перемещаются по штанге 3 и зажимаются винтами 2 и 5.

При измерении приблизительно устанавливают контролируемый размер, закрепляют рамку микрометрической подачи 4. Затем при помощи микрометрической пары доводят губки до соприкосновения с проверяемыми поверхностями, закрепляют рамку 1.

Штангенглубиномеры изготавливают с пределами измерений до 200; 250; 300; 400 и 500 мм с величиной отсчета по ноныусу 0,1; 0,05 мм. Их применяют для измерения высоты, глубины глухих отверстий, пазов, выступов. Измерительная поверхность основания 1 штангенглубиномера (рис. 5.21) по площади зна-

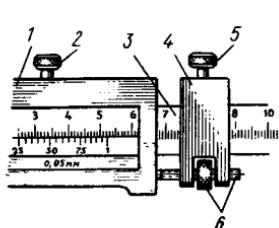


Рис. 5.20. Рамка штангенциркуля ЩЦ-ІІ

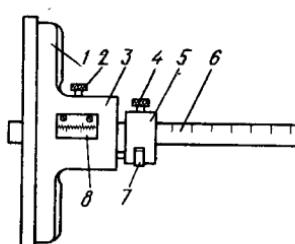


Рис. 5.21. Штангенглубиномер

Рис. 5.22. Штангенрейсмус

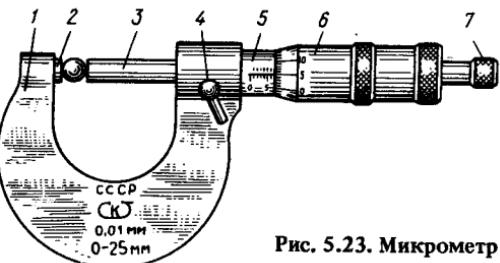
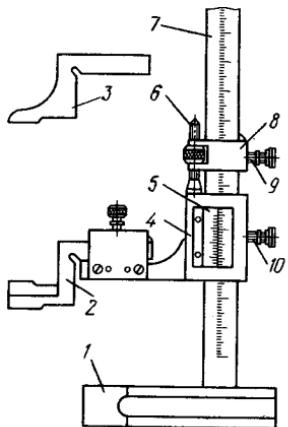


Рис. 5.23. Микрометр

чительно больше измерительной поверхности штанги 6, что обеспечивает его устойчивость при измерении. Рамка 3 имеет нониус 8, зажим 2 и связана микрометрической подачей 7 с рамкой 5. При измерении рамка микрометрической подачи 5 зажимается на штанге 6 винтом 4.

Штангенрейсмусы изготавливают с пределами измерений 0...250; 40...400; 60...630; 100...1000; 600...1600; 1500...2500 мм и величиной отсчета по нониусу 0,05 и 0,1 мм. Они предназначены для измерения высоты и разметочных работ. Штангенрейсмус (рис. 5.22) имеет основание 1 с закрепленной на нем штангой 7. По штанге перемещаются рамки 4 и 8 с нониусом 5 с микрометрической подачей 6. К рамке 4 прикрепляют с помощью винта измерительную 2 или разметочную 3 ножки. Рамки зажимают винтами 9, 10. При сборке ножку устанавливают в державке ниже губки рамки 4.

После окончания работы штангенинструмент необходимо протереть, смазать антикоррозионным составом, развести измерительные губки на 2...3 мм и ослабить зажимы рамки, а затем положить его в футляр.

Микрометрические измерительные средства: микрометры, микрометрические глубиномеры и нутромеры — широко применяют в машиностроении.

Микрометры предназначены для наружных измерений. Их изготавливают с ценой деления 0,01 мм, измерительным перемещением микрометрического винта 25 мм, верхним пределом измерений до 600 мм. Микрометр (рис. 5.23) состоит из скобы 1, в которой закреплена неподвижная пятка 2 и стебель 5. Внутри стебля расположен микрометрический винт 3 с шагом резьбы 0,5 мм, соединенный с барабаном 6 и трещоткой 7. Последняя необходима для обеспечения постоянного измерительного усилия. Положение микрометрического винта фиксируется стопором 4. Вдоль оси стебля нанесены две шкалы, а барабан раз-

делен по окружности на 50 равных частей. К микрометрам с нижним пределом 25 мм и более придаются установочные меры для поверки нулевого положения.

При повороте на одно деление микрометрический винт перемещается вдоль оси на $1/50$ шага, т.е. 0,5 мм: $50 = 0,01$ мм. Целое число миллиметров и половину миллиметра отсчитывают краем скоса барабана по шкалам стебля. Сотые доли миллиметра определяют по порядковому номеру штриха барабана, совпадающего с продольным штрихом стебля.

Измеряя закрепленную деталь, слегка прижимают пятку к проверяемой поверхности. Находящимися на накатанном поле трещотки большим и указательным пальцами правой руки перемещают микровинт до соприкосновения его с проверяемой поверхностью, до появления "пощелкивания" трещотки. Зажимают микрометрический винт стопором и читают показания.

После окончания работы у микрометрических инструментов надо ослабить стопор и микрометрический винт, протереть инструмент, смазать антикоррозийным составом и уложить в футляр.

Калибры предназначены для контроля размеров, формы и взаимного расположения поверхностей. Чаще всего контролируют соосность опор балансировочного станка жесткими калибрами. Калибры бывают гладкими и ступенчатыми. Соосность считается удовлетворительной, если калибр проходит все отверстия при незначительном усилии.

Рычажно-механические приборы предназначены для контроля линейных размеров, отклонения формы и расположения поверхностей. Наиболее широко используют индикаторы часового типа.

Индикатор часового типа (рис. 5. 24) состоит из циферблата 1 с большой шкалой, разделенной на 100 частей, и малой шкалой, разделенной на 10 частей, стрелки 2 и указателя чисел оборотов 8. Циферблат закреплен на корпусе 5 с ушком 7 и закрыт стеклом. Измерительный стержень 9 с головкой 3 и наконечником 10 перемещается в гильзе 11. Большая шкала поворачивается в корпусе 5 вокруг оси с помощью ободка 6 и фиксируется стопором 4. Внутри корпуса находится механизм индикаторного типа. При перемещении измерительного стержня на 10 мм зубчатое колесо со стрелкой указателя оборотов, находящейся на его оси, совершает один оборот. Второе зубчатое колесо, соосное с первым зубчатым колесом, при перемеще-

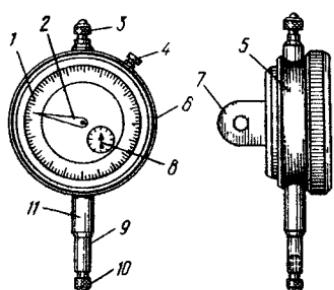


Рис. 5.24. Индикатор часового типа

нии измерительного стержня на 1 мм поворачивает третье зубчатое колесо с большой стрелкой, закрепленной на его оси на один оборот. Так как шкала разделена на 100 частей, то цена деления большой шкалы равна 0,01 мм.

Целое число миллиметров показывает стрелка указателя оборотов на малой шкале, а сотые доли миллиметров — стрелка на большой шкале. При подъеме измерительного стержня показания читают по наружным цифрам большой шкалы (увеличения по часовой стрелке). При опускании измерительного стержня показания читают по внутренним цифрам большой шкалы (увеличения против часовой стрелки).

Индикаторами часового типа оснащают нутромеры, глубиномеры, микромеры и другие приборы общего и специального назначения.

Для более точных измерений применяют многооборотный микроиндикатор или рычажно-зубчатую измерительную головку.

Многооборотный микроиндикатор с ценой деления 0,001 и 0,002 мм имеет увеличенное количество оборотов, поэтому верхний предел измерения у него равен 1 и 2 мм. Это достигается введением в механизм прибора дополнительного рычага, связанного с измерительным стержнем.

Рычажно-зубчатая измерительная головка имеет цену деления 0,001 и 0,002 мм с пределами измерения $\pm 0,05$ и $\pm 0,1$ мм. Ее механизм преобразования перемещения измерительного стержня в угловые перемещения стрелки состоит из рычажных и зубчатых элементов.

При эксплуатации рычажно-измерительных приборов не допускаются их встряхивание, резкие толчки, попадания пыли, жидкости и т.п.

Индикаторы часового типа часто крепят в стойках и штативах. Если крепление производится за гильзу, то следует контролировать усилие зажатия гильзы. Измерительный стержень должен свободно перемещаться в гильзе.

5.4. РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

В балансировочной практике при корректировке масс применяют лезвийные и абразивные режущие инструменты.

К лезвийным инструментам относятся: сверла, фрезы, метчики и т.п. Их изготавливают из углеродистых и легированных инструментальных сталей и металлокерамических сплавов. Лезвийный инструмент имеет большую твердость, износостойкость, малую хрупкость, высокую теплостойкость, механическую прочность. На его рабочей поверхности образованы режущие кромки. Основными геометрическими параметрами лезвийных инструментов являются их углы.

Наибольшее распространение получили спиральные сверла, которые имеют диаметры от 0,25 до 80 мм. Угол при вершине зависит от обрабатываемого материала: 116...118° — при обработке сталей и чугунов; 140° — при обработке алюминия, баббита и других мягких материалов; 80° — при обработке хрупких материалов.

Сpirальные сверла могут быть оснащены пластинками из металлокерамических сплавов ВК2, ВК3, Т5К10 и т.д.

Зенкеры внешне сходны со сверлами, но более жесткие и имеют большее число режущих кромок. Зенкеры для получения конических углублений называют зенковками.

Метчики предназначены для нарезания внутренней резьбы. Метчик состоит из рабочей и хвостовой частей.

Режущие зубья метчика выполнены в форме резцов, расположенных по окружности. Режущие кромки образуются продольными канавками.

Резьбу нарезают комплектом из трех метчиков: чернового, среднего и чистового. Для того чтобы различить метчики, на хвостовой части нанесены соответствующие риски: одна, две, три.

Плашки предназначены для нарезания наружной резьбы. Резьбу невысокой точности нарезают круглыми плашками за один проход. Режущие кромки рабочей части расположены с обоих торцов плашки, что позволяет нарезать резьбу как одной, так и другой стороной.

Фрезы предназначены для обработки плоскостей и поверхностей вращения детали при корректировке масс. По способу крепления фрезы подразделяются на хвостовые и насадные. Первые снабжены хвостовиком, вставляемым в шпиндель станка. Насадные фрезы имеют отверстия, которыми они центрируются на оправках. В основном применяют цилиндрические, дисковые и концевые фрезы.

Геометрическая форма каждого из режущих зубьев принципиально сходна с геометрической формой резцов.

Инструмент для абразивной обработки принципиально отличается от лезвийного инструмента. При обработке зерна абразивного инструмента режут и царапают материал.

Абразивный инструмент характеризуется формой, геометрическими размерами, видом и маркой абразива, зернистостью абразива, связкой, твердостью и т.п. Для изготовления абразивных инструментов используют: электрокорунд, карбид кремния, синтетические алмазы и другие искусственные абразивные материалы. Их выпускают преимущественно на керамической связке, состоящей из оgneупорной глины, полевого шпата и некоторых добавок.

Характерные формы шлифовальных кругов показаны на рис. 5. 25.

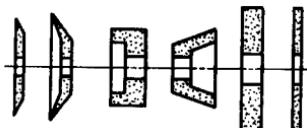


Рис. 5.25. Формы шлифовальных кругов

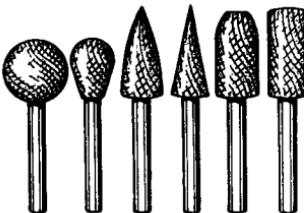


Рис. 5.26. Фрезы-шарошки



Рис. 5.27. Абразивные фасонные головки

Наряду с инструментом для металлорежущих станков при корректировке масс широко применяют ручной инструмент.

Для грубой обдирки поверхности используют фрезы-шарошки (рис. 5.26), опиливания и зачистки поверхности применяют плоские и круглые напильники. Съем труднообрабатываемого материала осуществляют торцовой плоскостью абразивного круга, а шлифование поверхностей в труднодоступных местах — абразивными фасонными головками (рис. 5.27).

Принципы резания, материалы, из которых изготавливают ручной режущий инструмент, такие же, как у инструмента для металлорежущих станков.

■ ■ ■

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СТАНКОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Приводится цикл работ, выполняемых при подготовке станка, приспособлений и ротора к работе; описывается методика настройки зарезонансных и дорезонансных станков на балансировку ротора определенной массы и геометрии; кратко излагается процесс балансировки, порядок технического обслуживания и техника безопасности при работе на балансировочных станках.

6.1. ПОДГОТОВКА СТАНКА К ЭКСПЛУАТАЦИИ

Балансировочный станок устанавливают на твердом основании в помещении, удаленном от оборудования, работающего с сильной вибрацией, магнитными и электрическими полями. Станок заземляют согласно "Правилам устройств электрических установок промышленных предприятий". После установки станка проверяют его на соответствие паспортным данным.

Проверка устройств станка. Согласно программе испытаний проверяют правильность работы всех устройств станка и их взаимодействия.

Работу приводного устройства проверяют на стабильность поддержания частоты вращения в заданном диапазоне, пускотормозных и регулировочных характеристик. Оценивают работу устройства в течение длительного времени при многократных пусках и остановках.

Проверку балансировочного устройства проводят в статическом и динамическом режимах. В статическом режиме проверяют надежность крепления всех элементов устройства, работу арретира, податливость динамометрических стоек. В динамическом режиме определяют собственные частоты колебаний опор, затухание этих колебаний.

Определяют отклонения формы и расположения рабочих поверхностей приводного и балансировочного устройств, а также станины станка. К измеряемым отклонениям относятся: неплоскость и непрямолинейность плоских поверхностей направляющих станины; изогнутость цилиндрических направляющих станины; непараллельность направляющих и оси опор; несоос-

ность опор и шпинделя; радиальные и торцовые биения рабочих поверхностей шкивов, роликов и других деталей вращения в сборе.

Измерения выполняют с помощью специальной оснастки, инструментального уровня, индикаторов часового типа. Методы проверки, допустимые и фактические отклонения указываются в техническом описании и акте технического испытания станка заводом-изготовителем. В зависимости от нормы точности станка предельные отклонения указанных поверхностей соответствуют VI–VIII степени точности.

Особое внимание при проверке измерительного устройства уделяют датчикам станка. Кроме внешнего осмотра, регулировки хода чувствительного элемента измеряют сопротивление между выходными зажимами датчика с помощью омметра.

Проверку всего измерительного устройства проводят по контрольному тесту. В качестве простейшего теста используют электрический сигнал определенной частоты и величины, который подают на вход измерительного устройства от генератора стандартных сигналов, например, генератора низкой частоты. При исходном положении органов управления измерительного пульта этот сигнал вызывает показания индикаторов дисбаланса. Сравнение показаний индикаторов с заданными в контрольном teste значениями определяет исправность измерительного устройства.

В техническом описании и инструкции по эксплуатации некоторых моделей балансировочных станков контрольный тест не приводится. В этом случае проверку измерительного устройства проводят следующим образом. На вход измерительного пульта вместо датчика подключают генератор синусоидальных сигналов. Подбирают такое напряжение выходного сигнала генератора, которое вызовет среднее показание индикатора дисбаланса, например, 50 делений. Это напряжение принимают за контрольный тест. В дальнейшем по нему контролируют исправность измерительного устройства в процессе эксплуатации. Частоту контрольного сигнала выбирают из допустимого диапазона частот станка. Устанавливают минимальную, среднюю и максимальную рабочую частоту измерительного устройства. Этот же сигнал используют для проверки работы индикатора угла дисбаланса, например, строботрона, а также органов управления измерительного пульта.

Для комплексной проверки всех блоков измерительного устройства собирают более сложную внешнюю электрическую схему, имитирующую работу балансировочного станка. Внешняя электрическая схема включает генератор сигналов, делители напряжения, фазовращатели, измерители напряжений и разности фаз.

При наличии дополнительных устройств в станке проверяют их функционирование и соответствие паспортным данным. На-

пример, определяют давление, расход, количество масла в системе смазки или работу корректирующего устройства.

Оценка нормы точности станка. Заключительным этапом подготовки станка к работе является оценка нормы точности согласно ГОСТ 20076–74, проводимая с помощью двух контрольных роторов, массы которых соответствуют нижнему и верхнему значениям паспортного диапазона масс.

Контрольный ротор подготавливают к балансировке, устанавливают и закрепляют на опорах станка, соединяют его с приводным устройством. Для балансировки контрольного ротора используют оснастку, отвечающую требованиям завода-изготовителя станка. Делают несколько пробных пусков ротора для проверки функционирования станка. Длительность работы станка перед балансировкой контрольного ротора должна составлять не менее 30 мин.

Проводят предварительную настройку станка на балансировку контрольного ротора. Методика предварительной настройки будет рассмотрена ниже.

С помощью контрольных грузов методом кругового обхода по восьми точкам в плоскостях коррекции определяют показания индикатора дисбаланса в плоскостях измерения. Для определения дисбалансов контрольного ротора применяют двухплоскостную или статико-моментную балансировку.

Рассчитывают значение и углы дисбалансов ротора в плоскостях коррекции. Проводят корректировку масс, добиваясь минимальных показаний индикаторов дисбалансов.

Устанавливая последовательно в резьбовые отверстия контрольные грузы, создающие статическую и моментную неуравновешенность, методом кругового обхода находят остаточные дисбалансы.

По формулам (6) рассчитывают смещение осей контрольного ротора в плоскостях опор станка. Полученные значения сравнивают с паспортным порогом чувствительности балансировочного станка и определяют норму точности станка.

Оценку нормы точности дорезонансного балансировочного станка с целью разделения плоскостей коррекции по схеме *a*, *b*, *c* проводят также с помощью контрольных роторов. После выполнения необходимой балансировки контрольного ротора до минимальных показаний индикатора дисбаланса в плоскости коррекции устанавливают контрольный груз. По показаниям индикатора дисбаланса ротора с контрольным грузом судят о паспортном пороге чувствительности станка (при максимальной чувствительности измерительного устройства) и точности показаний. Получаемая величина на индикаторе должна соответствовать массе контрольного груза в данной плоскости коррекции.

В балансировочных станках с осевым приводом оценивают точность приводного вала. Измеряют фактические размеры ра-

бочих поверхностей вала и его дисбалансы. Дисбалансы приводного вала находят с помощью полностью сбалансированного контрольного ротора, например, на станке с ленточным приводом.

При соединении приводного вала с контрольным ротором возникают дисбалансы за счет погрешности соединения и собственной неуравновешенности вала. Для определения этих дисбалансов используют модульную балансировку по двум сборкам. Вторую сборку вала с ротором проводят при другом их взаимном положении, обычно под углом 180° .

По результатам испытаний станка составляют технический акт, служащий основанием для ввода в эксплуатацию данного станка.

6.2. НАСТРОЙКА БАЛАНСИРОВОЧНОГО СТАНКА

Настройкой балансировочного станка называют процесс, включающий механическую регулировку привода ротора, установку элементов крепления, разделение плоскостей коррекции и тарирование измерительного устройства. В процессе настройки станка уточняются технические требования на балансировку, параметры технологического процесса балансировки, приспособлений и инструмента, нормы времени на балансировку.

При подготовке станка к настройке собирают тарировочный ротор, необходимые приспособления, проводят входной контроль деталей, инструмента, вспомогательных материалов согласно требованиям технической документации. Измеряют массу, положение центра масс, моменты инерции и геометрические размеры ротора, необходимые для настройки станка. Проводят техническое обслуживание станка.

Балансировочные приспособления и тарировочный ротор устанавливают на станке в требуемом положении. Особое внимание следует обращать на регулировку привода ротора зарезонансного станка при наличии большой паразитной массы.

Частота вращения ротора при балансировке влияет на точность настройки станка, устойчивость показаний индикаторов дисбалансов, мощность и время, затрачиваемое на раскрутку ротора. Нижний диапазон частот вращения ограничен собственными частотами колебаний балансировочного устройства с ротором. Балансировка вблизи собственных частот затруднена из-за возникающих резонансных явлений в колебательной системе станка. Поэтому частоту вращения ротора следует выбирать в 3...6 раз больше максимальной собственной частоты балансировочного устройства.

Собственные частоты не трудно оценить экспериментальным способом. Растормаживают одну опору станка, отводят ее до

упора к стойке и отпускают. Опора будет совершать свободные колебания. Находят число колебаний n за выбранный промежуток времени t . По формуле $f_A = n/t_A$ определяют первую собственную частоту. То же повторяют для другой опоры станка и находят $f_B = n/t_B$.

Верхний диапазон частот вращения ограничен мощностью приводного электродвигателя и временем на раскрутку и торможение ротора. В зависимости от жесткости ротора на высоких частотах возможны упругие деформации его оси. Для выбора оптимальной частоты вращения проводят пуски ротора на различных частотах.

Отрегулировав приводное устройство, проводят предварительную настройку измерительного пульта станка. Предварительная настройка зависит от типа балансировочного станка. Основными операциями являются:

установка диапазона частоты вращения ротора;

настройка фильтра в резонанс (для станков с избирательными усилителями);

разделение плоскостей коррекции (для станков с цепью разделения плоскостей коррекции по схеме a, b, c).

Установку диапазона частоты вращения проводят переключателем диапазонов на измерительном пульте станка. Если частота вращения ротора лежит одновременно в двух соседних диапазонах, то переключатель устанавливают на высший диапазон.

Для проведения настройки фильтра в резонанс с частотой вращения вносят неуравновешенную массу в плоскость коррекции тарировочного ротора. Включают привод и на постоянной частоте вращения определяют показания индикатора дисбаланса. Если показания выходят за пределы шкалы или близки к ее началу, то с помощью потенциометра масштаба и переключателей устанавливают показания на середине шкалы. Плавно поворачивая ручку настройки фильтра, находят такое ее положение, при котором показания будут максимальными. Это положение не должно лежать на краю шкалы. При настройке фильтра пользуются также переключателями и потенциометрами масштаба, чтобы показания индикатора не выходили за пределы шкалы.

Балансируют тарировочный ротор до минимальных показаний индикатора дисбалансов. Определяют остаточные дисбалансы в плоскостях измерения. Значения этих дисбалансов должны быть в 2,5 раза меньше допустимых дисбалансов ротора, заданных техническими требованиями.

Предварительная настройка дорезонансных балансировочных станков совпадает с окончательной настройкой на балансировку ротора определенной массы и геометрии.

Разделение плоскостей коррекции зарезонансных балансировочных станков проводят двумя способами. По первому способу разделяют плоскости для двухплоскостной балансировки.

Второй способ применяют при статико-моментной балансировке.

Первый способ. В 1-й плоскости коррекции на радиусе r_1 (рис. 6.1, а) прикрепляют точечную неуравновешенную массу m_1 , создающую допустимый начальный дисбаланс в этой плоскости.

Включают привод станка. На установившейся частоте вращения окончательно настраивают фильтр в резонанс с частотой вращения. Переключатель, указывающий плоскость измерения, переводят в положение измерения дисбалансов 2-й плоскости. Записывают показания индикатора дисбаланса в этой плоскости $A_{2\max}$. Вращая ручку настройки, находят такое ее положение (не крайнее), при котором наблюдаются минимальные показания индикатора $A_{2\min}$. Записывают эти показания. При настройке используют также переключатели масштаба и фазы датчиков 2-й плоскости измерения.

Выключают привод станка, останавливают ротор, снимают неуравновешенную массу m_1 . Во 2-й плоскости коррекции на радиусе r_2 прикрепляют точечную неуравновешенную массу m_2 , создающую допустимый начальный дисбаланс в этой плоскости.

Включают привод станка. Переключатель, указывающий плоскость измерения, переводят в положение измерения дисбалансов 1-й плоскости. Записывают показания индикатора в 1-й плоскости $A_{1\max}$. Вращая ручку настройки 1-й плоскости измерения, находят ее положение (не крайнее), при котором наблюдаются минимальные показания индикатора дисбаланса $A_{1\min}$. Записывают эти показания. При настройке используют переключатели и ручки только 1-й плоскости измерения.

Выключают привод станка, останавливают ротор, снимают неуравновешенную массу m_2 .

Рассчитывают коэффициенты уменьшения взаимного влияния плоскостей коррекции по формулам:

$$K_{12} = A_{1\max} / A_{1\min};$$

$$K_{21} = A_{2\max} / A_{2\min}.$$

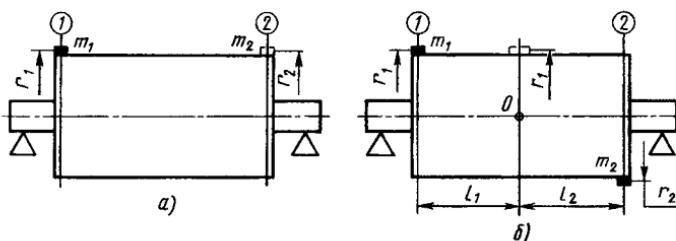


Рис. 6.1. Расположение точечных неуравновешенных масс

Пример. Показания индикатора дисбаланса в 1-й плоскости, вызванные точечной неуравновешенной массой во 2-й плоскости, до разделения плоскостей коррекции при исходном (нулевом) положении ручки настройки 1-й плоскости равны 80 делений. Показания индикатора дисбаланса в 1-й плоскости после разделения плоскостей коррекции при ручке настройки в положении "6" составляют 4 деления. Взаимное влияние дисбаланса во 2-й плоскости на показание индикатора дисбаланса в 1-й плоскости уменьшилось в 20 раз:

$$K_{12} = 80:4 = 20.$$

Второй способ. В двух плоскостях тарировочного ротора прикрепляют точечные неуравновешенные массы m_1 и m_2 на радиусах r_1 и r_2 , как показано на рис. 6.1, б, создающие моментную неуравновешенность. Значение главного момента допустимых начальных дисбалансов

$$M_{D \text{ нач}} = m_1 r_1 l_1 + m_2 r_2 l_2.$$

Включают привод станка, настраивают фильтр в резонанс с частотой вращения ротора. Переключатель плоскостей измерения устанавливают в положение 1-й плоскости измерения. Записывают показания индикатора дисбаланса в 1-й плоскости. Переводят переключатель в положение измерения дисбалансов 2-й плоскости и фиксируют показания индикатора в этой плоскости.

По показаниям в этих плоскостях выбирают плоскости измерения главного вектора и главного момента дисбалансов. За плоскость измерения главного вектора дисбалансов принимают ту плоскость, в которой зафиксированы меньшие показания индикатора при моментной неуравновешенности. Например, индикатор дисбалансов показывает в 1-й плоскости 40 делений, а во 2-й плоскости показывает 70 делений. За плоскость измерения главного вектора следует принять 1-ю плоскость. В отдельных случаях плоскости измерения выбирают по другим критериям.

Устанавливают переключатель плоскостей измерения в выбранное положение, например, в 1-ю плоскость. Вращая ручку настройки этой плоскости, находят такое ее положение, при котором наблюдаются минимальные показания индикатора дисбаланса. Записывают показания индикатора до и после настройки.

Выключают привод станка, останавливают ротор, снимают массы m_1 и m_2 .

Статическую неуравновешенность на тарировочном роторе создают с помощью одной или двух неуравновешенных масс.

На межпорном роторе прикрепляют точечную неуравновешенную массу m_1 на радиусе r_1 в плоскости, проходящей через его центр масс.

На консольном роторе антипараллельно прикрепляют две точечные неуравновешенные массы m_1 и m_2 на радиусах r_1 , r_2

в двух плоскостях (см. рис. 3.6). Значения масс рассчитывают по формулам

$$m_1 = D_{\text{ст нач доп}} \frac{l_2}{(l_2 + l_1) r_1};$$

$$m_2 = D_{\text{ст нач доп}} \frac{l_1}{(l_2 - l_1) r_2}.$$

На двухконсольном роторе прикрепляют две точечные неуравновешенные массы m_1, m_2 на радиусах r_1, r_2 параллельно друг другу в двух плоскостях (см. рис. 3.6). Значения масс рассчитывают по формулам:

$$m_1 = D_{\text{ст нач доп}} \frac{l_2}{(l_1 + l_2) r_1};$$

$$m_2 = D_{\text{ст нач доп}} \frac{l_1}{(l_1 + l_2) r_2}.$$

Включают привод станка. Переключатель плоскости измерения переводят в положение измерения главного момента дисбалансов (в нашем примере 2-я плоскость) и, вращая ручку настройки этой плоскости, уменьшают влияние главного вектора дисбалансов на показания индикатора во 2-й плоскости — плоскости измерения главного момента дисбалансов. Записывают показания индикатора до и после разделения плоскостей.

Рассчитывают коэффициенты уменьшения взаимного влияния плоскостей по тем же формулам, что и при двухплоскостной балансировке.

При статической балансировке в динамическом режиме достаточно выполнить первую часть операции — исключить влияние главного момента на показания индикатора дисбаланса в плоскости измерения главного вектора дисбалансов ротора.

Разделение плоскостей коррекции дорезонансных балансировочных станков выполняют двумя способами. Первым способом разделяют плоскости при двухплоскостной балансировке. Второй способ применяют при статико-моментной балансировке. Разделение плоскостей коррекции в дорезонансных балансировочных станках, цепь разделения плоскостей коррекции которых выполнена по схеме a, b, c , проводят по геометрическим размерам ротора без его вращения.

Первый способ. Переключатель метода балансировки ставят в положение для двухплоскостной балансировки. В зависимости от способа корректировки масс добавлением (+) или съе-

мом материала (—) устанавливают переключатель знака в соответствующее положение.

Вводят данные о типе балансируемого ротора. Переключатели местонахождения плоскостей коррекции ставят в следующие положения:

для межопорного ротора — от опор к плоскостям, т.е. к середине ротора;

для консольного ротора — от опор в направлении консольной части (оба переключателя ставят в левое или в правое положения);

для двухконсольного ротора — от опор к плоскостям, т.е. от середины ротора к консолям (один переключатель ставят в левое, а другой в правое положение).

Вводят числовые значения геометрических размеров ротора, обозначенных на рис. 6.2 буквами a , b , c , r . Ручками потенциометров или цифровыми переключателями набирают числовые значения радиусов коррекции r_1 и r_2 в миллиметрах для 1-й и 2-й плоскостей. Потенциометром b набирают числовое значение, равное расстоянию между плоскостями коррекции. Потенциометрами a и c — расстояния от соответствующих опор до плоскостей коррекции. При этом величины a , b , c могут быть выражены в миллиметрах, сантиметрах или метрах.

Переключатель диапазонов частот вращения ставят на выбранный диапазон. Этот же переключатель указывает цену деления индикатора дисбаланса в измерительных устройствах.

Второй способ. Переключатель метода балансировки ставят в положение для статико-моментной балансировки.

Переключатели местонахождения плоскостей коррекции ставят в следующие положения:

для межопорного и двухконсольного ротора — от опор к середине ротора;

для консольного ротора — от опор в направлении консольной части (оба переключателя ставят в левое или правое положение). Если одна плоскость измерения моментной неуравновешенности совпадает с одной из опор, то соответствующий переключатель остается в среднем положении.

Вводят геометрические размеры ротора (см. рис. 6.2). На цифровом переключателе r_1 набирают число, равное радиусу коррекции главного вектора дисбалансов. Переключателями a и c набирают числа, равные расстояниям от плоскости коррек-

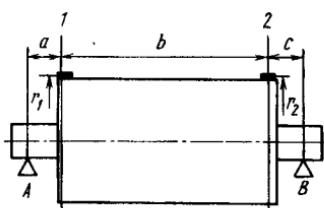


Рис. 6.2. Геометрические размеры ротора, набираемые на пульте измерительного устройства, выполненного по схеме a , b , c

ции до каждой из опор ротора. Расстояние $a + c$ равно расстоянию между опорами. Если плоскость расположена на консолях, то $a - c$ равно расстоянию между опорами. Первый индикатор будет показывать значение и угол корректирующей массы по главному вектору дисбалансов.

Второй индикатор настраивают на показания моментной неуравновешенности. Переключателем b набирают число, равное расстоянию между плоскостями коррекции главного момента дисбалансов. Переключателем r_2 набирают число, равное радиусу одной из плоскостей коррекции. При такой настройке индикатор будет показывать значение и угол корректирующей массы только в выбранной плоскости. Чтобы найти корректирующую массу в другой плоскости, нужно выполнить несложный расчет:

$$m_{k3} = m_{k2} r_2 / r_3,$$

где r_3 — радиус коррекции в другой плоскости. Угол массы m_{k3} отличается от угла m_{k2} на 180° . Если измеряют только главный момент дисбалансов, то переключателями r_2 и b набирают фиктивные числа, например, $r_2 = b = 100$ мм. Значения главного момента вычисляют по формуле.

$$M_D = \text{показания индикатора} \cdot \text{цена деления} \cdot 10\,000 \text{ (г} \cdot \text{мм}^2\text{)}.$$

Устанавливают переключатель знака (+/-) в соответствующее положение для каждой плоскости, а переключатель диапазонов частот вращения ставят на выбранный диапазон.

Тарирование зарезонансного балансировочного станка — процесс регулировки станка, при котором цену деления индикатора дисбаланса связывают с единицами коррекции, выбранными для плоскостей коррекции определенного ротора. При тарировании станка проводят регулировку индикатора угла дисбаланса, определяют:

- порог чувствительности по значению и углу дисбаланса;
- цену деления индикаторов дисбаланса;
- линейность шкалы индикаторов;
- диапазон показаний станка.

Регулировку индикатора угла дисбаланса выполняют на станках, в измерительном устройстве которых имеется фазовращатель. В плоскости коррекции тарировочного ротора прикрепляют максимально допустимую точечную неуравновешенную массу против нулевой отметки, нанесенной на роторе. Включают привод станка и на постоянной частоте вращения ротора находят цифры меток, совпадающие с индикатором угла дисбаланса. Поворачивая ручку фазовращателя, приводят его к нулевой метке. При определении угла дисбаланса с помощью врачающейся шкалы находят деления подвижной шкалы и после остановки ротора поворачивают внешнюю шкалу (неподвижную) до совмещения с подвижной шкалой.

В измерительных устройствах с генератором опорного сиг-

нала опорные токи смещены на 90° . Соответствие между фазами опорных токов и определенным угловым положением на роторе при необходимости может быть восстановлено поворотом статора генератора. В плоскости коррекции тарировочного ротора прикрепляют точечную неуравновешенную массу в угловом положении 0° . Включают привод станка и находят угол дисбаланса. Если он не равен 0° , то отпускают винты зажимного кольца, поворачивают статор генератора на этот угол и снова зажимают винты. Точность регулировки индикатора дисбаланса проверяют перестановкой массы на 90° .

Для определения порога чувствительности станка по значению дисбаланса в плоскости коррекции в тяжелом месте на радиусе r_k прикрепляют такую точечную неуравновешенную массу $m_{\text{мин}}$, которая при вращении ротора вызовет наименьшее изменение показаний индикатора дисбаланса. Эту массу подбирают при нескольких пробных пусках ротора. За наименьшее изменение показаний индикатора дисбаланса принимают одно деление шкалы. Порог чувствительности по дисбалансу рассчитывают по формуле

$$\Delta D = m_{\text{мин}} r_k.$$

Порог чувствительности станка по углу дисбаланса находят с помощью такой точечной неуравновешенной массы, которая вызывает устойчивые показания индикатора угла. В тяжелом месте в плоскости коррекции прикрепляют на радиусе r_k эту массу m , включают привод станка и фиксируют показания индикатора угла. Последовательно перемещают массу m по окружности радиусом r_k и находят такое ее положение, при котором наблюдаются минимальные изменения угла дисбаланса $\Delta\varphi$.

Цену деления индикатора дисбаланса определяют как отношение изменения измеряемого значения дисбаланса к изменению показаний индикатора. Обратную величину цены деления называют чувствительностью по дисбалансу. В тяжелом месте в плоскости коррекции на радиусе r_k прикрепляют точечную неуравновешенную массу m , вызывающую допустимый начальный дисбаланс ротора в данной плоскости коррекции. Включают привод станка и фиксируют показания индикатора дисбаланса. Подсчитывают изменение значения дисбаланса как разность между допустимым начальным и остаточным дисбалансами и изменение показаний индикатора при остаточном и допустимом начальном дисбалансах.

$$\text{Цена деления} = \frac{\text{изменение значения дисбаланса}}{\text{изменение показаний индикатора}}.$$

Цену деления измеряют в грамм-миллиметрах на деление ($\text{г}\cdot\text{мм}/\text{дел}$) или связывают с другими единицами коррекции,

например, корректирующей массой, глубиной сверления и т.п. Цену деления используют для отсчета дисбалансов, если шкала индикатора линейна во всем диапазоне показаний станка.

Диапазоном показаний станка называют наибольший и наименьший дисбалансы, измеряемые станком в заданных условиях. Наибольший дисбаланс определяют по предельному отклонению показаний индикатора дисбаланса. Наименьший дисбаланс соответствует минимально достижимому остаточному дисбалансу.

Линейность шкалы индикатора дисбаланса находят опытным путем. В тяжелом месте в плоскости коррекции последовательно прикрепляют 5...7 различных точечных неуравновешенных масс и фиксируют показания индикатора дисбаланса при вращении ротора. Дисбалансы, создаваемые этими массами, должны охватывать весь диапазон показаний станка. Рассчитывают цену деления индикатора для каждой неуравновешенной массы $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ и среднюю цену деления в диапазоне показаний по формуле

$$\Pi_{cp} = \frac{1}{n}(\Pi_1 + \Pi_2 + \dots + \Pi_n).$$

Находят отклонение от среднего значения в процентах для каждой неуравновешенной массы

$$\frac{\Pi_{cp} - \Pi_i}{\Pi_{cp}} = \left(1 - \frac{\Pi_i}{\Pi_{cp}}\right) 100 \text{ \%}.$$

Если отклонение от среднего значения во всех точках не превышает 5%, то шкалу индикатора дисбаланса считают линейной. В противном случае диапазон показаний станка делят на поддиапазоны, где сохраняется линейность шкалы.

Тарирование станка при статико-моментной балансировке проводят по главному вектору и главному моменту дисбалансов. В плоскостях коррекции или измерения прикрепляют точечные неуравновешенные массы, создающие соответственно статическую и моментную неуравновешенность. Значения неуравновешенных масс рассчитывают по тем же формулам, что и при разделении плоскостей коррекции. Сам процесс тарирования станка аналогичен рассмотренному выше.

Тарирование балансировочного станка выполняют для каждой плоскости коррекции. Полученные результаты заносят в карту настройки балансировочного станка.

Тарирование дорезонансного балансировочного станка состоит в выборе цены деления индикатора дисбаланса. В станках данного типа цену деления индикатора указывает переключатель диапазонов частот вращения. Однако она может быть не удобной для балансировки ротора данной массы и геометрии.

Поэтому на пульте измерительного устройства имеется переключатель чувствительности.

В плоскости коррекции тарировочного ротора в тяжелом месте прикрепляют на радиусе r точечную неуравновешенную массу m , создающую допустимый начальный дисбаланс. Включают привод станка и фиксируют показания индикатора дисбаланса. Переключатель чувствительности устанавливают в необходимое положение, дающее наибольшее численное значение показаний в пределах шкалы.

При балансировке на низкой частоте вращения легких роторов чувствительность станка может быть недостаточной для осуществления высокоточной балансировки. Для повышения чувствительности станка действительные радиусы коррекции заменяют фиктивными, уменьшенными в произвольно выбранном масштабе. Цена деления уменьшается пропорционально уменьшению радиусов коррекции. Новая цена деления дисбаланса будет

$$\text{Новая цена деления} = \\ = \text{цена деления} \cdot \frac{\text{фиктивный радиус коррекции}}{\text{действительный радиус коррекции}} .$$

Пример. Цена деления составляет 2 г/дел. Действительные радиусы коррекции соответственно равны: $r_1 = 150$ мм, $r_2 = 200$ мм. Введем фиктивные радиусы: $r_1 = 30$ мм, $r_2 = 20$ мм и определим новую цену деления для каждой плоскости.

$$\text{Цена деления в 1-й плоскости коррекции } 2 \frac{30}{150} = 0,4 \text{ г/дел.}$$

$$\text{Цена деления во 2-й плоскости коррекции } 2 \frac{20}{200} = 0,2 \text{ г/дел.}$$

Контроль качества настройки дорезонансного балансировочного станка проводят с помощью тарировочного ротора. В плоскости коррекции в тяжелом месте прикрепляют точечную неуравновешенную массу. Включают привод станка и фиксируют показания индикатора дисбаланса. Сравнение показаний индикатора с учетом цены деления и внесенной массы с учетом остаточного дисбаланса в данной плоскости показывает качество настройки.

В процессе настройки станка находят продолжительность измерительного цикла. Измерительный цикл включает в себя: настройку балансировочного станка; подготовку ротора к балансировке; разгон; считывание показаний; торможение; преобразование показаний балансировочного станка к виду, удобному для уменьшения дисбалансов; прочие операции, например, требуемые для обеспечения безопасности.

Для исключения субъективных ошибок настройку станка выполняют несколько раз.

6.3. БАЛАНСИРОВКА ПАРТИИ РОТОРОВ

Балансировку партии роторов проводят на полностью настроенном станке. Вначале балансируют 5...7 роторов, произвольно выбранных из партии, так называемую установочную партию роторов. Балансировку каждого ротора установочной партии выполняют следующим образом.

Измеряют значения и углы начальных дисбалансов в каждой плоскости коррекции. Рассчитывают значения корректирующих масс.

Проводят корректировку масс и вновь измеряют значения и углы дисбалансов ротора. Если дисбалансы ротора больше допустимых значений, то балансировочный цикл повторяют до тех пор, пока не будут достигнуты допустимые дисбалансы. Определяют остаточные дисбалансы в плоскостях коррекции ротора заданным способом. Снимают ротор со станка, вновь устанавливают на станок и определяют остаточные дисбалансы. Этот цикл повторяют несколько раз.

При выполнении работ фиксируют время, необходимое для проведения балансировочного цикла. Время, необходимое для настройки станка, не учитывают.

Вычисляют средние значения x_{cp} и дисперсии σ^2 совокупности полученных значений x_1, x_2, \dots, x_n :

$$x_{cp} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n);$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}[(x_1 - x_{cp})^2 + (x_2 - x_{cp})^2 + \dots + (x_n - x_{cp})^2].$$

По табл. 32 находят коэффициент Стьюдента t для принятой доверительной вероятности W , числа опытов или количества роторов установочной партии n . Вычисляют значение

$$x_0 = x_{cp} + t \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}.$$

В результате расчетов находят следующие величины:

начальные дисбалансы партии роторов;

остаточные дисбалансы партии роторов при однократной установке на станке;

остаточные дисбалансы при многократной установке роторов на станке, при расчете которых в качестве значений принимают средние значения для каждого ротора;

продолжительность балансировки одного ротора партии, т.е. средняя норма времени на операцию.

По полученным максимальным начальным дисбалансам ротора уточняются параметры настройки станка. Остаточные дисбалансы при однократной установке ротора на станке служат обоснованием выбранного способа контроля и порога чувствитель-

ности станка. Остаточные дисбалансы при многократной установке роторов на станке характеризуют погрешности, вносимые средствами балансировки.

Вычисление значений $x_{ср}$ и σ^2 выполняют по прикладной программе 3.4. (с. 99).

6.4. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Техническое обслуживание станков для динамической балансировки в процессе эксплуатации разделяют на три вида: ежедневное, ежемесячное и полугодовое.

Ежедневное техническое обслуживание предусматривает осмотр устройств станка; проверку надежности крепления его элементов; проверку правильности работы отдельных узлов (плавность вращения вала, колебаний опор и т.п.); очистку и смазку рабочих поверхностей станины, приводного и балансировочного устройств.

При ежемесячном техническом обслуживании проверяют правильность работы всех устройств станка. Регулируют и смазывают приводное устройство, очищают от пыли измерительный пульт станка. Проводят контроль настройки станка по тарировочному ротору.

Полугодовое техническое обслуживание включает проверку станка и приспособлений на соответствие паспортным данным. Выполняют все работы, необходимые для ввода станка в эксплуатацию. Производят замену смазки, проверяют силовое электрооборудование, заземление, рабочие характеристики измерительного пульта и датчиков, выполняют необходимый профилактический ремонт. Настраивают станок на балансировку ротора определенной массы и геометрии, балансируют установочную партию роторов.

Все виды технического обслуживания станка оформляют соответствующими документами.

Техническое обслуживание основных узлов станка. Плоскую станину балансировочного станка достаточно периодически очищать от пыли, смазывать направляющие маслом, проверять надежность ее крепления к фундаменту. Нерабочие поверхности станины красят для предотвращения коррозии.

Опорные узлы балансировочных станков с горизонтальной осью вращения требуют минимального технического обслуживания. Их достаточно периодически протирать и смазывать.

Однако в процессе длительной эксплуатации возможны случайные удары по опорам, что может вызвать деформации, трещины, забоины упругих элементов. При наличии на лентах или стержнях забоин, трещин, глубоких царапин, остаточных деформаций, а также ржавчины они подлежат замене. Методом стати-

ческого нагружения у динамометрических опор определяют жесткость.

Шпинделы станков с вертикальной осью вращения требуют тщательного технического обслуживания. В процессе эксплуатации происходит износ вала и подшипников. Наибольшее влияние на износ оказывают многоократные пуски и остановки шпинделя при балансировке деталей. Величину износа измеряют в микрометрах на тысячу часов работы. Согласно классам износа шпинделы балансировочных станков должны заменяться или подвергаться ремонтам при скорости изнашивания вала 2 мкм/тыс. ч и подшипника — 10 мкм/тыс. ч. Надежное смазывание подшипников уменьшает их износ. В процессе обслуживания шпинделя необходимо периодически контролировать наличие смазочного материала и производить его замену, строго следуя указаниям завода-изготовителя.

Отсутствие люфта в подшипниках, величины радиальных и торцовых биений вала определяют пригодность шпинделя для балансировки. Вал шпинделя должен вращаться без заеданий, иметь постоянный момент трогания в процессе всей эксплуатации. Эти параметры подлежат контролю при ежемесячном техническом обслуживании станка.

Необходимо смазывать подшипники электродвигателя. В зависимости от мощности и частоты вращения электродвигателя замену смазочного материала производят через 5000...10 000 ч работы. При этом снимают подшипники, промывают их в чистом бензине и просушивают, а затем смазывают свежим консистентным маслом. При этом количество масла не должно превышать половину объема пространства между внутренним и наружным кольцами подшипника.

После переборки электродвигателя проверяют его дисбаланс и при необходимости проводят балансировку якоря.

В клиноременных передачах регулируют натяжение ремней, контролируют их износ и при необходимости заменяют новыми.

В шестеренчатых редукторах с проточной системой смазывания промывают фильтр, заменяют масло и регулируют его расход.

При смазывании методом окунания уровень масла в полости редуктора не должен превышать центра шестерни, занимающей нижнее положение. По указателю уровня масла судят о его количестве, а по наличию стружки в отстойнике принимают решение о замене масла. Долив масла в редуктор проводят с помощью ручной масленки и шприца.

Тормозное устройство регулируют с помощью винтов, сжимающих пружину тормоза. По мере изнашивания заменяют колодки тормозного барабана.

Техническое обслуживание аппаратуры управления привод-

ным устройством осуществляет соответствующая служба главного энергетика.

Измерительный пульт станка очищают от пыли при ежемесячном техническом обслуживании пылесосом. Вскрывают потенциометры и промывают обмотку и контакты тетрахлоридом. Проверяют электронные лампы. Неисправные лампы заменяют новыми. Проверку индикатора дисбаланса, ремонт измерительного пульта выполняет служба главного метролога.

Бесконтактные токовихревые и пьезоэлектрические датчики градуируют при полугодовом техническом обслуживании.

У индукционных датчиков проверяют правильность положения подвижных катушек. Для проверки положения катушек отсоединяют тягу от опоры станка и передвигают катушку вперед и назад на несколько миллиметров. Если движение происходит с заеданием, то датчик снимают. Осторожно выдвигают катушку из кольцевого паза магнита и осматривают кольцевой паз. В случае загрязнения кольцевого паза его прочищают латунной пластинкой, покрытой изоляционной лентой. При обратной постановке катушки на место ее положение регулируют так, чтобы при перемещении катушки от среднего положения не было заедания.

Проверяют сопротивление между зажимами катушки. Если величина сопротивления отличается от номинального значения более чем на $\pm 5\%$, то катушку следует заменить.

Вибродатчики некоторых типов разборке не подлежат. Их заменяют новыми по мере необходимости. Эту работу выполняют следующим образом. Снимают вибродатчик с соединительной тягой. Затем отвинчивают стопорную гайку и снимают соединительную тягу.

На задней стенке нового датчика вывинчивают установочный винт, снимают подкладку под этим винтом и вталкивают его в отверстие до упора. Ввинчивают соединительную тягу в датчик и контрят ее стопорной шайбой.

Вибродатчик закрепляют на стойке станка, а соединительную тягу устанавливают на опоре. Затем обратно возвращают подкладку под установочный винт и закрепляют ее.

Неисправности, возникающие в процессе эксплуатации балансировочных станков, можно разделить на два вида:

исключающие работу каких-либо устройств станка;

нарушающие нормальный режим работы станка.

К первому виду неисправностей относят: отсутствие вращения приводного устройства в целом или его отдельных узлов; отсутствие показаний индикатора дисбаланса при вращении ротора или наличие больших показаний (зашкаливание) индикаторов при неподвижном роторе. Причинами этих неисправностей являются дефекты устройств балансировочного станка, которые определяются при комплексных проверках, а также с помощью тарировочного или контрольного ротора.

Второй вид неисправностей чаще всего обусловлен неправильной эксплуатацией станка или дефектами балансируемого ротора. Типичными неисправностями при балансировке являются:

- 1) отсутствие вращения балансируемого ротора;
- 2) ротор не разгоняется до балансировочной частоты вращения;
- 3) нет показаний индикаторов дисбаланса при вращении неуравновешенного ротора;
- 4) зашкаливание индикаторов дисбаланса при вращении ротора;
- 5) низкая чувствительность балансировочного станка;
- 6) большие периодические или случайные колебания показаний индикаторов дисбаланса;
- 7) различные показания индикаторов дисбаланса при повторных пусках одного и того же ротора;
- 8) порог чувствительности по дисбалансу выше допустимых значений.

Причины типичных неисправностей (1–8)

- [1.] Отсутствует соединение приводного устройства с балансируемым ротором. Приводной вал не закреплен на роторе. Нет натяжения ремня. Заклиниены технологические подшипники.
- [2.] Неправильно установлен переключатель диапазона частот вращения или рукоятка коробки передач. Неисправность пусковой аппаратуры приводного устройства. Проскальзывание ремня из-за слабого натяжения или плохого сцепления. Поверхность ремня или ротора покрыта маслом. Недостаточная смазка технологических подшипников, не закрыт защитный кожух, один из вращающихся элементов приводного устройства или ротор задеваются (трутся) за неподвижные части станка и другие причины, создающие большое сопротивление вращению ротора.
- [3.] Не включен измерительный пульт. Не расторможены опоры балансировочного устройства. Опоры балансировочного устройства не соединены тягами с датчиками. Неисправность датчиков, кабелей или измерительного пульта.
- [4.] Неправильно установлен переключатель чувствительности. Неуравновешенный ротор плохо закреплен в балансировочном устройстве. Неправильно собран ротор для балансировки, не закреплены или отсутствуют некоторые детали. Начальные дисбалансы ротора превышают допустимые значения.
- [5.] Нарушена настройка измерительного пульта станка. Частота вращения ротора отличается от заданной. Существует препятствие колебаниям опор балансировочного устройства. Неисправность датчиков, кабелей или измерительного пульта.
- [6.] Нестоная частота вращения при балансировке из-за колебания напряжения питающей сети, отрыва воздушных вихрей, проскальзывания ремней, недостаточного смазывания технологических подшипников, заеданий вращающихся частей при-

вода или колеблющихся опор балансировочного устройства. Плохо закреплены тяги датчиков, смещена катушка или сам датчик относительно среднего положения почти до упора. Помехи от приводного соединения, технологических подшипников, неправильного монтажа ротора в балансировочном устройстве. Колебания деталей ротора, термическая деформация. Производственные помехи (удары, вибрации, электромагнитные поля). Неисправен измерительный пульт станка.

[7.] Изменяется положение деталей ротора, установленных с зазорами или плохо закрепленных (лопаток в диске, колец, проставок и т.п.). Пластические деформации ротора или его отдельных частей. Плохо закреплены подшипники на опорах станка — изменяется торцовое биение наружных колец подшипников. Термическая деформация. Наличие в полостях ротора жидкости, стружки, песка и т.д.

[8.] Повышенные производственные помехи, возрастание погрешностей балансировочных устройств и приспособлений, связанных с длительной эксплуатацией, неправильное техническое обслуживание. Пластические деформации ротора при корректировке масс. Неблагоприятное сочетание значений и углов начальных дисбалансов.

Диагноз неисправностей и способы их устранения зависят от типа балансировочного станка, приспособлений, конструкции ротора.

Необходимо учитывать, что многочисленные пуски ротора для окончательной балансировки часто объясняются несовершенством применяемых методов и средств балансировки, излишне высокой заданной точностью.

6.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Соблюдение правил техники безопасности способствует предотвращению производственного травматизма. К работе на балансировочных станках допускаются лица, изучившие техническое описание и инструкцию по эксплуатации, технологию балансировки определенного ротора, прошедшие инструктаж. Балансировщик деталей и узлов проходит специальное обучение и аттестацию правилам техники безопасности и пожарной безопасности при работе в цехах промышленных предприятий.

Перед началом работы необходимо надеть спецодежду. Она должна быть застегнута на все пуговицы, рукава должны иметь застегивающиеся манжеты, плотно охватывающие запястье; надеть головной убор, под который тщательно убрать волосы. На спецодежде и головном уборе не должно быть висящих темечков, которые могут быть захвачены врачающимися частями станка.

Освободить площадь для работы, удалив посторонние предметы. Разложить детали, приспособления, инструмент, документацию.

Проверить исправность изоляции и заземления станка. Провода не должны иметь повреждений. На корпусе станка должен быть винт заземления с двумя оцинкованными или лужеными шайбами, между которыми закреплен заземляющий провод. Если шкаф управления приводным устройством и измерительный пульт изолированы от станины станка, то они должны быть заземлены самостоятельно.

Осмотреть основные узлы балансировочного станка, проверить надежность их крепления, наличие и исправность защитных устройств.

Проверить плавность вращения шпинделя, проворачивая его вручную на один-два оборота.

Во время работы балансируемую деталь необходимо надежно закреплять на опорах станка. При балансировке на подшипниках скольжения предусматриваются ограничители осевого перемещения, которые должны исключать возможность скользования детали и ее задевание на неподвижные части станка.

Проверить надежность крепления детали, сделав 1...2 кратковременных пуска. До начала вращения закрыть защитный кожух.

При вращении ротора запрещается: находиться в плоскости, перпендикулярной оси вращающегося ротора и приводного устройства; касаться вращающихся частей станка руками; открывать защитный кожух.

Техническое обслуживание и ремонт устройств станка проводить только при отключенном вводном пакетном выключателе.

По окончании работы отключить станок от питающей сети.

Привести в порядок рабочее место и станок, убрать обтирочный материал в специальные металлические емкости.

■ ■ ■

КОРРЕКТИРОВКА МАСС

Описываются способы и корректирующие устройства; приводятся формулы, прикладные программы вычислений, номограммы для расчета корректирующих масс и параметров резания при съеме металла; простейшие приемы выполнения слесарных и сборочных работ.

7.1. СПОСОБЫ КОРРЕКТИРОВКИ МАСС

Все существующие способы корректировки масс в принципе осуществляются: добавлением массы; перемещением массы; уменьшением массы; динамической центровкой.

Процесс корректировки масс выполняют вручную с помощью универсального или специального оборудования и автоматически.

Добавление массы осуществляют путем прикрепления к поверхности ротора в плоскости коррекции специальных балансировочных грузов (корректирующих масс), а также наплавного материала.

Конструкции балансировочных грузов весьма разнообразны. Наиболее часто используют плоские пластины, болты, винты и т.п. Для корректировки масс изготавливают комплекты балансировочных грузов, отличающихся между собой массой. Форма груза и поверхность, по которой груз соединяется с ротором, у всех грузов одинаковы.

В плоскости коррекции наплавляют различные металлы и пластмассы. Для этих целей используют олово, свинец, смолу и другие материалы. Пластичные массы применяют для корректировки масс роторов, изготовленных из неметаллических материалов. Корректирующая масса для наплавки представляет собой бруски, прутки, проволоку или расплавленный материал.

Соединение специальных балансировочных грузов с поверхностью ротора осуществляют: склеиванием, свариванием, паянием, склеиванием, запрессовкой, резьбовыми крепежными деталями.

Массу уменьшают путем съема материала с поверхности ротора в плоскости коррекции. Съем материала производят лез-

вийным и абразивным режущим инструментом, а также травлением, выжиганием и другими методами физико-химической обработки.

Материал удаляют: сверлением, фрезерованием, шлифованием, рубкой, резкой, опиливанием и шабрением.

Изменение массы ротора выполняют в специальных плоскостях коррекции, имеющих отверстия, выточки, приливы, пояски и т.п. Конструкция этих плоскостей обеспечивает необходимую жесткость и массу для уменьшения допустимого начального дисбаланса.

Перемещение масс осуществляется путем перестановки лопаток, дисков, проставок и других деталей или материала ротора, а также перемещением специальных постоянных по массе балансировочных грузов в плоскости коррекции. Однаковые детали узла, например лопатки, отличаются друг от друга по массе не более чем на 2%. Взвесив лопатки, расположенные в легком и тяжелом месте рабочего колеса, можно произвести их перестановку таким образом, чтобы в легком месте стояли лопатки максимального, а в тяжелом минимального веса. В этом случае отклонения по массе в противоположных точках рабочего колеса могут достигнуть 4%, что во многих случаях оказывается достаточным для компенсации дисбаланса. Измерив статические моменты лопаток в легком и тяжелом месте (например, по 3...5 лопаток с каждой стороны), рассчитывают их новое положение, уменьшающее начальный дисбаланс рабочего колеса.

Перемещение масс роторов сборной конструкции осуществляют поворотом дисков друг относительно друга. При этом из-за биений посадочных поверхностей дисков изменяется положение главной центральной оси инерции относительно геометрической оси. Расчетным или экспериментальным путем находят такое положение дисков, при котором уменьшаются начальные дисбалансы ротора.

В точном приборостроении массу ротора корректируют перемещением материала. При этом обычно на внутреннюю поверхность ротора наносят слой легкоплавкого материала. В тяжелом месте плоскости коррекции нагревают ротор и расплавляют некоторое количество материала. Расплавленный материал под действием центробежных сил переместится в направлении большего расстояния от оси вращения, т.е. в легкое место, что приведет к уменьшению начального дисбаланса.

Перемещение масс ротора применяют в качестве предварительной корректировки, так как фактические массы деталей не перекрывают всего возможного диапазона неуравновешенных масс. Для окончательной корректировки масс используют две (три) специальные массы, которые можно перемещать в плоскости коррекции в любое угловое положение, что позволяет корректировать массу ротора в широком диапазоне.

В отличие от первых трех способов корректировки масс, совмещающих главную центральную ось инерции с осью ротора, динамическая центровка направлена на совмещение геометрической оси с ГЦОИ ротора. Обычно центровке подвергают заготовки деталей (коленчатые валы, крыльчатки). По начальным дисбалансам детали рассчитывают смещения упомянутых осей в плоскостях опор и проводят их обточку до совмещения осей. Например, по центрам на заготовке коленчатого вала обтачивают шейки и другие элементы. В результате съема металла наряду с уменьшением начального дисбаланса повторно вносится неуравновешенность. Однако динамическая центровка позволяет уменьшить начальный дисбаланс в 3-4 раза. Этот способ перспективен для корректировки масс сложных тонкостенных деталей, которые могут деформироваться приложении к ним значительных местных усилий резания.

7.2. КОРРЕКТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Корректировку масс выполняют с помощью универсального и специального оборудования, ручного и механизированного инструментов, автобалансирующих, электрофизических и электрохимических устройств.

К универсальному и специальному оборудованию относят: металлорежущие станки, сварочные агрегаты, лазеры и т.п. Из металлорежущих станков применяют токарные, сверлильные, фрезерные и шлифовальные станки. На токарных станках производят динамическую центровку деталей. При выполнении токарных работ применяют оправки, патроны, планшайбы и другие приспособления токарного типа; резцы для чернового, чистового, тонкого точения; скобы-калибры, рычажно-измерительный инструмент.

Сверлильные станки применяют при корректировке путем уменьшения массы сверлением радиальных или осевых отверстий в роторе. В зависимости от размеров деталей, диаметров и глубины сверления используют вертикально-сверлильные, радиально-сверлильные и настольные сверлильные станки.

Сверлильные работы выполняют с помощью приспособлений и вспомогательного инструмента. Значительную часть приспособлений для сверлильных станков составляют кондукторы, снабженные втулками для направления сверл. Накладные кондукторные плиты помещают на деталь. Центрирование плиты осуществляют по поверхностям детали или по центрирующим элементам приспособлений. При работе инструментами разного диаметра в кондукторах применяют быстросъемные втулки. Для их извлечения из кондуктора достаточно повернуть втулку на небольшой угол вокруг оси, чтобы головка винта прошла через прорезь, сделанную в бурте втулки.

На фрезерных станках снимают металл фрезерованием плоских или цилиндрических поверхностей коррекции. На попечные салазки горизонтально или вертикально-фрезерного станка устанавливают деталь в универсальное (машинные тиски) или специальное приспособление. Съем металла производят цилиндрическими, дисковыми или концевыми фрезами.

Съем металла (лыски) с цилиндрической поверхности производят также на поперечно-строгальных станках.

Корректировка масс мерным режущим инструментом (сверлами, фрезами) обеспечивает тарированный съем металла. По параметрам резания, таким, как: глубина резания, ширина, число отверстий — можно достаточно точно определить снятую массу металла. Поэтому сверлильные и фрезерные станки включают в состав автоматизированных корректирующих устройств.

Круглошлифовальные станки применяют для динамической центровки (например, для шлифования шеек коленчатого вала). На плоскошлифовальных станках производят съем металла с труднообрабатываемых роторов. Ротор устанавливают с помощью приспособления на магнитном столе станка. Шлифование выполняют торцом или периферией шлифовального круга.

Работы по съему металла на металлорежущих станках, как правило, выполняют станочники соответствующих профессий. Съем металла ручным и механизированным инструментом, а также на сверлильных станках часто выполняет балансировщик деталей и узлов, совмещая профессии слесаря, сверловщика и некоторые другие.

Корректировку масс в крупносерийном производстве объединяют с измерением дисбалансов ротора. Для этих целей создано специальное оборудование, в состав которого входят как устройства балансировочного станка, так и дополнительные устройства (например, корректирующее, транспортное или управляющее). Устранение дисбаланса осуществляют одним из рассмотренных выше способов с неподвижной или с врашающейся детали.

Устранение дисбаланса с неподвижной детали производят лезвийным инструментом корректирующими устройствами, созданными на базе металлорежущих станков. Принцип действия корректирующих устройств для корректировки масс при вращении детали основан на электрофизических и электрохимических методах обработки: электроэрозионным, лазерным, электронно-лучевым, плазменного напыления и некоторых других.

Лазерное корректирующее устройство удаляет неуравновешенную массу при вращении ротора. Световой луч лазера (оптического квантового генератора ОКГ) позволяет обрабатывать поверхности, выполненные как из металлических, так и неметаллических материалов с высокими физико-механическими свойствами. Корректировка масс основана на принципе много-

импульсной обработки. Каждый последующий импульс имеет энергию излучения меньшую, чем предыдущий. Величина энергии регулируется пропорционально изменению дисбаланса ротора. После обработки на поверхности образуется след в виде глухого отверстия различной формы. Такие устройства работают в автоматическом режиме с достаточно высокой точностью и производительностью. Балансировочный станок с лазерным корректирующим устройством с твердотельным лазером обеспечивают балансировку 10...20 роторов в час массой от 20 до 300 г с точностью 0,2...0,02 г·мм/кг.

Электронно-лучевое корректирующее устройство удаляет материал из зоны действия луча. Балансируемый ротор вращается в вакуумной камере, куда направлены электронные лучи. Электрический сигнал от вибропреобразователя запускает электронно-оптическую систему в момент прохождения тяжелого места через линию действия луча. За счет большой удельной мощности электронного луча металл в зоне тяжелого места нагревается до 6000°С и испаряется. Остальные участки ротора имеют нормальную температуру.

Корректирующее устройство, основанное на методе взрыва проволочек в магнитном поле (плазменное напыление), добавляет массу при вращении ротора. В момент прохождения легкого места против щели устройства подается высокое напряжение (1000...1100 В) на контакты, между которыми закреплена тонкая проволочка. Вызванный этим напряжением ток (2000 А) расплавляет материал за 15 мкс, т.е. расплавлениеносит характер взрыва. Электромагнитные силы выбрасывают расплавленный металл из щели на поверхность ротора в его легкое место. Производительность корректировки масс такого устройства составляет 0,006...1 г·мин⁻¹. Автоматические балансировочные станки, в которых использован метод взрыва проволочек в магнитном поле (мод. ЭЗ-105, ЭЗ-90, ЭЗ-84), успешно применяют для балансировки роторов асинхронных электродвигателей, якорей электробритв, ограночных дисков. Так производительность специализированного станка для автоматической балансировки асинхронных электродвигателей мод. ЭЗ-105 составляет 40...100 роторов в час.

Электрохимическое корректирующее устройство осуществляет съем металла анодным растворением. Электролит подводится в зазор между ротором и электродами через их отверстия. При прохождении мимо электрода тяжелого места по команде от датчика балансировочного станка подается электролит. Вращение ротора способствует удалению продуктов анодного растворения. Производительность электрохимического устройства значительно превышает производительность электрофизических корректирующих устройств.

Автобалансирующие устройства автоматически компенсируют изменение дисбалансов ротора в эксплуатационных усло-

виях. Барабаны стиральных машин, центрифуги, шлифовальные круги оснащают автобалансирующими устройствами.

7.3. РАСЧЕТ КОРРЕКТИРУЮЩИХ МАСС

Корректирующей массой может быть любая локальная или распределенная масса, расположенная в плоскости коррекции. При корректировке масс путем добавления или перемещения материала применяют пластины, шайбы, прутки различного сечения, болты, винты, гайки и т.п. В этом случае производится расчет размеров, числа и углового положения уравновешивающих масс.

При корректировке масс путем уменьшения материала определяют глубину и диаметр сверления, число отверстий или пазов, диаметр фрезы, глубину резания и другие параметры резания.

Корректировка масс добавлением массы. В качестве заготовок для изготовления корректирующих масс применяют *пластины* (полосы) постоянной толщины и ширины, а также *прутки* постоянного сечения. Наиболее употребительными материалами является сталь, медь, алюминий, свинец.

Значение корректирующей массы

$$m_k = D_{\text{ нач }} / (R + \Delta R),$$

где $D_{\text{ нач }}$ — начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции; R — радиус плоскости коррекции; ΔR — половина толщины пластины или диаметра прутка. Сумма $R + \Delta R$ представляет собой радиус коррекции.

Длину корректирующей массы (рис. 7.1) определяют по приближенным формулам:

для прутка (рис. 7.1, а) $b = \frac{4 m_k 10^3}{\rho \pi d^2};$

для пластины (рис. 7.1, б) $b = \frac{m_k 10^3}{\rho h l}$

Приближенные формулы справедливы до b не более $0,785 R$. Если в результате расчета получаются большие значения длины корректирующей массы, то следует изготавливать две мас-

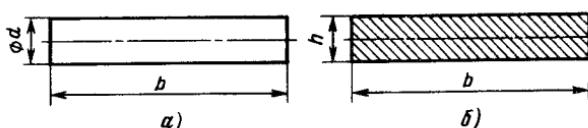


Рис. 7.1. Размеры корректирующих масс

сы, каждая из которых равна $0,5 m_k$. Расчет повторяют для новых корректирующих масс.

Пример. Начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции радиусом $R = 150$ мм составляет $D_{\text{нач}} = 1500$ г·мм. Корректирующие массы изготавливают из стальной полосы толщиной $h = 5$ мм и шириной $l = 10$ мм. Рассчитать длину полосы.

Находим значение корректирующей массы:

$$m_k = \frac{D_{\text{нач}}}{R + \frac{h}{2}} = \frac{1500}{150 + 2,5} = 9,836 \text{ г}$$

и рассчитываем длину полосы:

$$b = \frac{m_k \cdot 10^3}{\rho h l} = \frac{9,836 \cdot 10^3}{7,85 \cdot 5 \cdot 10} = 25,06 \text{ мм.}$$

Проверяем соотношение

$$b / R = 25,06 / 150 = 0,17,$$

что меньше допустимого значения 0,785.

Для изготовления корректирующих масс широко используют также наборы шайб, болтов, винтов и других крепежных деталей. Наборы составляют из деталей одинаковой или различной массы. Их массы в наборе, обычно, образуют последовательность чисел, в которой разность между последующими и предыдущими значениями остается неизменной. Такую последовательность называют арифметической прогрессией. Например, набор из 20 болтов с массами: 1; 1,5; 2; 2,5; ...; 10,5 — образует арифметическую прогрессию с разностью 0,5 г. Балансировочные грузы маркируют порядковым номером.

По расчетному значению корректирующей массы для наборов с постоянной массой определяют число балансировочных грузиков

$$n = \frac{m_k - m_0}{m_{\text{дет}}} ,$$

где m_0 — постоянная масса детали, фиксирующей набор; $m_{\text{дет}}$ — масса одной детали из набора.

Порядковый номер балансировочного груза в наборе вычисляют по формуле

$$n = \frac{m_k - m_0 - m_1}{d} + 1 ,$$

где m_1 — масса первого балансировочного груза; d — разность прогрессии. Если в результате расчета получается n больше числа грузов в наборе, то новое число грузов N находят как корень квадратного уравнения

$$a N^2 + bN + c = 0;$$

здесь $a = d$; $b = 2m_1 - d$; $c = -2(m_k - m_0)$. Корни этого уравнения находят по прикладной программе для микроЭВМ.

Прикладная программа для микроЭВМ. Вычисление корней квадратного уравнения. Исходные данные для вычислений: a , b , c .

Программа 7.1 для микроЭВМ "Электроника" Б3-34, МК-54, МК-56-III-II

Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код
00	ПО	40	18	\Rightarrow	14
01	С/П	50	19	$Fx < 0$	5C
02	\uparrow	OE	20	23	23
03	2	02	21	\Rightarrow	14
04	:	13	22	$/-$	0L
05	$/-$	0L	23	+	10
06	\uparrow	OE	24	:	13
07	Fx^2	22	25	FBx	0
08	ИПО	60	26	БП	51
09	С/П	50	27	33	33
10	X	12	28	$/-$	0L
11	FBx	0	29	$F\sqrt{-}$	21
12	F,	25	30	ИПО	60
13	-	11	31	:	13
14	$F\sqrt{ }$	21	32	\Rightarrow	14
15	КНОП	54	33	ИПО	60
16	$Fx \geq 0$	59	34	:	13
17	28	28	35	С/П	50

Инструкция балансировщику

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
1. Включите калькулятор			
2. Введите программу 7.1		ФПРГ ввод	
3. Проверьте правильность набора программы		ФАВТ	
3.1. Занесите величины	1 1 -2	В/О С/П С/П С/П	1 1 -2
3.2. Выведите результат			-2 – в регистре x, 0 1 – в регистре y, 1
4. Очистите программный счетчик		В/О	
5. Вычислите корни			
5.1 Занесите величины a , b , c ,	a b c	В/О С/П С/П С/П	a b c
5.2. Вычислите корни		С/П	N_1 – в регистре x, 0 N_2 – в регистре y, 1

З а м е ч а н и е. В качестве искомого значения N выбирают больший положительный корень, который округляют до ближайшего целого числа.

Пример. Начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции радиусом $R = 150$ мм составляет $D_{\text{нач}} = 1500$ г·мм. Корректирующие массы подбирают из набора винтов. Первый груз в наборе имеет массу $m_1 = 2$ г, разность прогрессии $d = 0,5$ г, число грузов 20 шт. Необходимо рассчитать порядковый номер балансировочного груза для изготовления корректирующей массы.

Находим значение корректирующей массы

$$m_k = \frac{D_{\text{нач}}}{R} = \frac{1500}{150} = 10 \text{ г.}$$

Рассчитываем порядковый номер балансировочного груза по формуле

$$n = \frac{m_k - m_0 - m_1}{d} + 1 = \frac{10 - 0 - 2}{0,5} + 1 = \frac{8}{0,5} + 1 = 17.$$

Отсюда корректирующей массой является винт с порядковым номером 17.

Рассчитанные по этим формулам балансировочные грузы не должны занимать более 1/8 части окружности.

В некоторых конструкциях роторов корректирующие массы допускается устанавливать только в определенные места плоскости коррекции, заданные чертежом, например, на лопасти трехлопастного вентилятора. Часто угол дисбаланса не совпадает с этими местами, поэтому корректировку масс выполняют двумя балансировочными грузами (рис. 7.2). Значения масс грузов находят с помощью теоремы синусов по формулам:

$$m_1 = \frac{D_{\text{нач}}}{r_k} \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_3}; \quad m_2 = \frac{D_{\text{нач}}}{r_k} \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_3},$$

где φ_1 — угол между линией действия дисбаланса и первым балансировочным грузом; φ_2 — угол между линией действия дисбаланса и вторым балансировочным грузом;

$$\varphi_3 = 180^\circ - (\varphi_1 + \varphi_2).$$

Значения m_1 и m_2 вычисляют по прикладной программе для микроЭВМ.

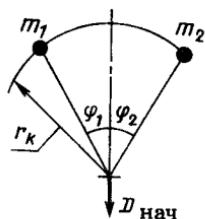


Рис. 7.2. Корректировка масс в заданных местах плоскости коррекции

Прикладная программа для микроЭВМ. "Вычисление двух корректирующих масс в плоскости коррекции".

Исходные данные для вычислений:

m_k — значение корректирующей массы в плоскости коррекции; φ_1, φ_2 — углы между линией действия дисбаланса (легким местом) и балансировочными грузами.

Программа 7.2 для микроЭВМ "Электроника" Б3-34, МК-54, МК-56.

Адрес	Команда	Код	Адрес	Команда	Код
00	П1	41	17	:	13
01	С/П	50	18	Х	12
02	ПА	4-	19	П2	42
03	С/П	50	20	С/П	50
04	ПС	4C	21	FBх	0
05	+	10	22	ИПС	6C
06	F cos	1Г	23	F sin	1C
07	/-/-	0L	24	Х	12
08	F arc cos	1-	25	П3	43
09	ПВ	4L	26	С/П	50
10	С/П	50	27	Х	12
11	F sin	1C	28	Х	12
12	ИПА	6-	29	2	02
13	F sin	1C	30	:	13
14	≥	14	31	ПД	4Г
15	ИП1	61	32	С/П	50
16	FBх	0			

Инструкция балансировщику

Содержание	Набрать число	Выполнить команды	Результат
1. Включите калькулятор			
2. Введите программу 7.2		FПРГ ввод	
3. Проверьте правильность набора программы		FABT	
3.1. Занесите величины	1 46 69	B/O С/П С/П С/П	1 46 69
3.2. Выведите результат		С/П С/П С/П	65 1,259 1,298
4. Очистите программный счетчик		B/O	
5. Вычислите корректирующие массы			
5.1. Введите исходные данные	m_k φ_1 φ_2	C/П C/П C/П	m_k φ_1 φ_2
5.2. Выведите результаты вычислений		B/O C/П C/П	φ_3 m_1 m_2

Корректировка масс перемещением массы. При корректировке масс двумя постоянными по значению m и переменными по положению (угол φ) балансировочными грузами вычисляют угол между ними по формуле

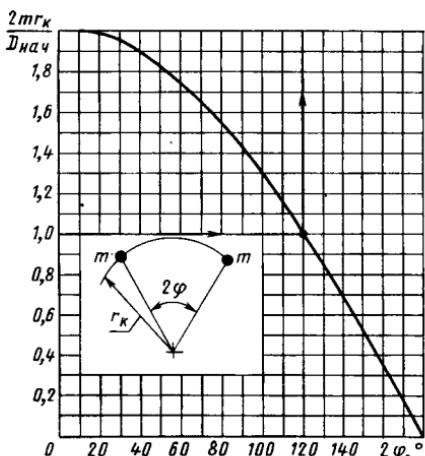


Рис. 7.3. Номограмма для определения угла между двумя постоянными по массе и переменными по положению балансировочными грузами

Пример. Начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции радиусом $r_k = 150$ мм составляет $D_{\text{нач}} = 1500$ г·мм, угол дисбаланса равен 100° . Конструкцией ротора предусмотрена корректировка масс двумя постоянными грузами массой $m = 5$ г каждый на радиусе $r_k = 150$ мм. Определить положение корректирующих масс.

Вычисляем отношение

$$\frac{2mr_k}{D_{\text{нач}}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 150 \text{ мм}}{1500 \text{ г·мм}} = 1.$$

По кривой на рис. 7.3 находим угол между корректирующими массами, соответствующими отношению 1. Угол составляет 120° . Следовательно, первую корректирующую массу нужно установить под углом $\varphi_{k_1} = 100^\circ + 180^\circ - 60^\circ = 220^\circ$, а вторую корректирующую массу — под углом $\varphi_{k_2} = 100^\circ + 180^\circ + 60^\circ = 340^\circ$ относительно начала отсчета углов в плоскости коррекции.

Корректировка масс уменьшением массы. Уменьшение массы производится съемом материала с поверхностей ротора режущим инструментом. Обработку цилиндрических поверхностей выполняют по круговому кольцу и сегменту.

При съеме металла по кольцу (рис. 7.4) прямоугольного сечения $h \cdot l$ вначале находят массу на угловую единицу (радиан):

$$m_\varphi = \rho h l R \left(1 - \frac{h}{2R}\right).$$

Если отношение $h/2R$ не более $0,01 \dots 0,03$, то эту массу можно вычислять по приближенной формуле

$$m_\varphi = \rho h l R.$$

$$2\varphi = \arccos \frac{2mr_k}{D_{\text{нач}}}$$

или с помощью номограммы (рис. 7.3). При пользовании номограммой вычисляют отношение $2mr_k/D_{\text{нач}}$ и по оси ординат откладывают полученное значение, из которого проводят прямую, параллельную оси абсцисс до пересечения с кривой. Из точки пересечения проводят прямую, параллельную оси ординат до пересечения с осью абсцисс. Точка пересечения этой прямой с осью указывает искомый угол 2φ .

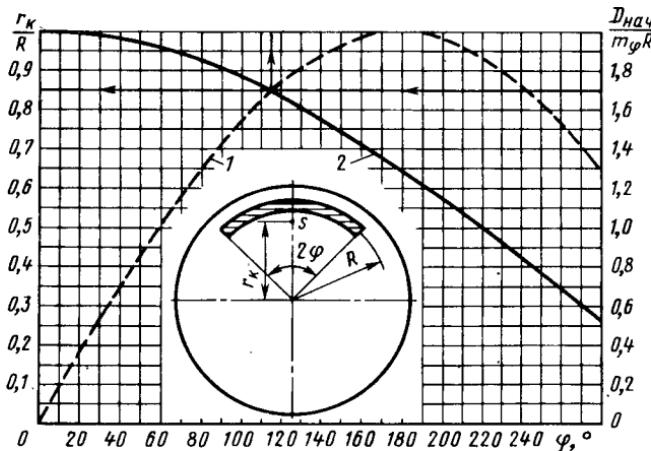


Рис. 7.4. Номограмма для определения размеров кольца при корректировке масс:
с – центр масс части кольца

Затем рассчитывается отношение $D_{\text{нач}}/m_\varphi R$ и по кривой 1 находят центральный угол 2φ в градусах. По кривой 2 определяют отношение r_k/R .

Полученный центральный угол полностью определяет корректирующую массу ротора. Действительный радиус коррекции r_k используют для проверки правильности вычислений:

$$D_{\text{нач расч}} = m_\varphi 2\varphi r_k.$$

Пример. Начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции радиусом $R = 150$ мм составляет $D_{\text{нач}} = 1500$ г·мм. Корректировка масс допускается по стальному круговому кольцу прямоугольного сечения $h = 5$ мм, $l = 10$ мм. Определить центральный угол.

Массу кольца находим по приближенной формуле
 $m_\varphi = \rho h l R = 7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10 \cdot 150 = 58,9$ г/рад.

Определяем отношение

$$\frac{D_{\text{нач}}}{m_\varphi R} = \frac{1500}{58,9 \cdot 150} = 1,7.$$

По кривой 1 (рис. 7.4) находим центральный угол $2\varphi = 115^\circ = 2,02$ рад. По кривой 2 и углу $2\varphi = 115^\circ$ определяем отношение $r_k/R = 0,84$, откуда получаем фактический радиус коррекции $r_k = 0,84R = 0,84 \cdot 150 = 126$ мм.

Проверяем точность выполненных расчетов $m_\varphi 2\varphi r_k = 58,9 \cdot 2,02 \cdot 126 = 1499$ г·мм.

При корректировке масс по сегменту (рис. 7.5) зададимся шириной резания l . Обычно эта величина указана в технической документации. Затем находим отношение начального дисбаланса ротора в плоскости коррекции к постоянным параметрам.

$$D_{\text{нач}}/\rho l R^3.$$

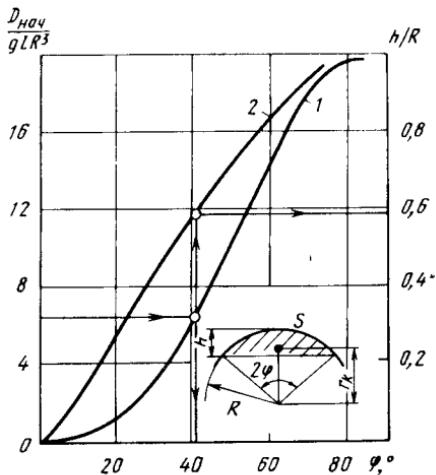


Рис. 7.5. Номограмма для определения размеров сегмента при корректировке масс:
с — центр тяжести сегмента

По кривой 1 находим вспомогательный угол φ (половина центрального угла сектора), зная который по кривой 2 определим относительную высоту сегмента h/R . Высота h является необходимым и достаточным параметром для съема неуравновешенной массы.

Пример. Начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции радиусом $R = 25$ мм составляет $D_{\text{нач}} = 1500$ г·мм. Допустима кор-

ректировка масс съемом металла с цилиндрической поверхности шириной $l = 5,5$ мм, плотность металла $\rho = 2,7 \cdot 10^{-3}$ г/мм³. Необходимо определить глубину резания.

Находим отношение

$$\frac{D_{\text{нач}}}{\rho l R^3} = \frac{1500}{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 5,5 \cdot (2,5)^3 \cdot 10^3} = \frac{1500}{2,7 \cdot 5,5 \cdot 15,62} = 6,47.$$

По кривой 1 (см. рис. 7.5) определим угол $\varphi = 41^\circ$, а по кривой 2 — относительную высоту сегмента $h/R = 0,59$; откуда высота сегмента $h = 0,59 R = 0,59 \cdot 25 = 14,75$ мм. Эта величина и будет глубиной резания.

Корректировка масс ротора сверлением отверстий в плоскости коррекции — наиболее распространенный способ уменьшения массы. При сверлении отверстий вдоль оси ротора (рис. 7.6) удаляемую массу вычисляют по формуле

$$m_k = D_{\text{нач}} / r_k.$$

Диаметр отверстия d , глубину сверления h и число отверстий n определяют из выражения

$$m_k = \rho \pi \frac{d^2}{4} \left(h - \frac{\sqrt{3}}{9} d \right) n.$$

Приближенный расчет выполняется в следующем порядке.

Задаются диаметром отверстия из допустимых диаметров, указанных в технических требованиях на балансировку. Рассчитывается удаляемая масса m_d при сверлении одного отверстия диаметром d и глубиной h :

$$m_d = \rho \pi d^3 / 4.$$

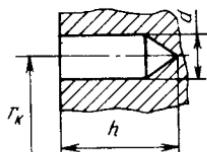


Рис. 7.6. Осевое отверстие для корректировки масс

Вычисляется отношение $D_{\text{нач}} / 5m_d r_k$ и выбирается необходимое число отверстий. Если это отношение меньше 1, то достаточно одно отверстие ($n = 1$), если больше 1, то оно округляется в большую сторону до целого числа, определяющего необходимое число отверстий n . Следует иметь в виду, что произведение dn должно быть меньше $0,785r_k$, иначе погрешность расчета превысит допустимое значение.

Затем вычисляется глубина сверления каждого отверстия:

$$h = \left[\left(\frac{D_{\text{нач}}}{5m_d r_k} \right) \frac{5}{n} + 0,19 \right] d.$$

Пример. Начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции составляет $D_{\text{нач}} = 1500$ г·мм. Допустима корректировка масс сверлением осевых отверстий диаметром до $d = 6$ мм на радиусе $r_k = 100$ мм, глубиной не более $h = 30$ мм (плотность материала $\rho = 7,85 \cdot 10^{-3}$ г/мм³). Необходимо определить число отверстий, диаметр и глубину сверления.

Принимаем диаметр сверления $d = 6$ мм. Рассчитываем массу

$$m_d = \frac{\rho \pi d^3}{4} = \frac{7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 6^3}{4} = 1,33 \text{ г.}$$

Найдем отношение

$$\frac{D_{\text{нач}}}{5m_d r_k} = \frac{1500}{5 \cdot 1,33 \cdot 100} = 2,25$$

и определяем число отверстий $n = 3$. Вычисляем глубину сверления каждого отверстия

$$h = \left[\left(\frac{D_{\text{нач}}}{5m_d r_k} \right) \frac{5}{n} + 0,19 \right] d = [2,25 \cdot \frac{5}{3} + 0,19] 6 = 23,7 \text{ мм.}$$

Параметры радиальных отверстий находим по номограмме, приведенной на рис. 7.7. Задаваясь диаметром отверстия d , вы-

числим массу на единицу длины (за единицу длины h принимаем $h = R/10$):

$$m_h = \rho \pi \frac{d^2}{4} \frac{R}{10}.$$

Определяем отношение

$$D_{\text{нач}} / m_h R.$$

По кривой 1 находим относительную глубину сверления

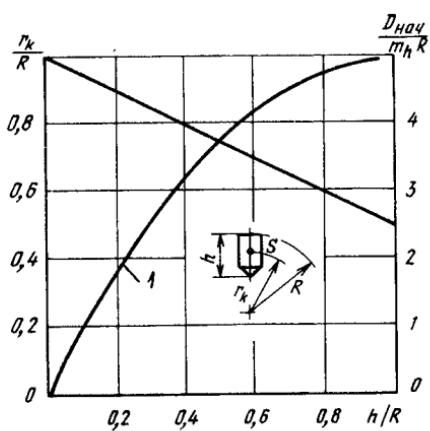


Рис. 7.7. Номограмма для определения параметров радиального отверстия:
s – центр тяжести отверстия

h/R . Если $D_{\text{нач}}/m_h R < 5$, то достаточно одного отверстия, в противном случае полученное значение делят на 5 и округляют в большую сторону до целого числа, которое и определит необходимое число отверстий. Следует учитывать длину дуги, которую занимают отверстия, и калибр сверления. Дуга не должна превышать $0,785R$, а калибр — $h/d < 5$.

Пример. Начальный дисбаланс ротора в плоскости коррекции радиусом $R = 100$ мм составляет $D_{\text{нач}} = 1500$ г·мм. Допустима корректировка масс сверлением радиальных отверстий диаметром не более $d = 6$ мм, глубиной не более $h = 30$ мм (плотность материала $\rho = 7,85 \cdot 10^{-3}$ г/мм³). Необходимо определить число отверстий, диаметр и глубину сверления.

Принимая диаметр сверления $d = 6$ мм, находим массу одного отверстия глубиной $R/10$ по формуле

$$m_h = \rho \pi \frac{d^2}{4} \frac{R}{10} = 7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot \frac{6^2}{4} \cdot \frac{100}{10} = 2,22 \text{ г.}$$

Определим отношение

$$\frac{D_{\text{нач}}}{m_h R} = \frac{1500}{2,22 \cdot 100} = 6,76 < 5.$$

Отсюда число отверстий

$$n = 6,76/5 = 1,35.$$

Полученную величину округлим до 2, т.е. $n = 2$.

Вновь определим отношение

$$\frac{D_{\text{нач}}}{2m_h R} = \frac{1500}{2 \cdot 2,22 \cdot 100} = 3,38.$$

По рис. 7.7 находим глубину сверления ($h/R = 0,44$) $h = 44$ мм. Так как глубина сверления превышает допустимое значение ($h = 30$ мм), то расчет повторим для большего числа отверстий $n = 4$. В результате получим отношение $6,76/4 = 1,69$ и относительную глубину сверления $h/R = 0,19$. Откуда глубина сверления каждого из четырех отверстий будет $h = 0,19R = 19$ мм. При шаге отверстий $2d$ они занимают дугу окружности $2dn = 2 \cdot 6 \cdot 4 = 48$ мм, что составляет

$$48/(R - h) = 48/(100 - 19) = 0,59 < 0,785.$$

Для расчетов корректирующих масс роторов на производстве используют таблицы, графики, номограммы, прикладные программы для микроЭВМ, связывающие начальный дисбаланс с конкретными параметрами корректирующей массы, которые должны быть указаны в технических требованиях на балансировку.

7.4 ПРИЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Основными видами работ, выполняемыми при корректировке масс, являются: разметка, рубка, резка, опиливание, сверление, нарезание резьбы, клепка, пайка, сборка. Приступая к работе, необходимо подготовить рабочее место. На рабочем месте должны находиться только те инструменты и приспособления, которые необходимы для выполнения задания. Инструменты, приспособления и материалы располагают в удобных местах. Измерительные инструменты размещают отдельно от рабочего инструмента на специальной полочке, а чертежи на планшете-подставке.

Инструменты должны удовлетворять следующим требованиям:

молотки должны быть прочно насажены на рукоятки и расклиниены в отверстия стальными клиньями;

поверхности рукояток молотков, напильников, отверток должны быть чистыми, без сучков, трещин и отковов;

ударные части кернеров, выколоток, зубил не должны быть сбиты или скошены от ударов;

рабочие части инструментов должны быть правильно заточены.

Перед заточкой инструмента проверяют прочность закрепления ограждения шлифовального круга, ременной передачи, правильность закрепления подручника (зазор между подручником и шлифовальным кругом не должен превышать 3 мм), состояние шлифовального круга, исправность работы заточного станка.

При работе на заточных и сверлильных станках, с пневматическими или электрическими машинками, рубке, клепке, пайке рабочий должен пользоваться защитными очками.

Разметка. Разметочные работы при корректировке масс являются вспомогательной технологической операцией, заключающейся в переносе размеров корректирующей массы на плоскость коррекции. Разметку обычно выполняют на плоской и цилиндрической поверхности.

На плоских поверхностях (торце ротора, пластине) наносят риски, дуги окружностей, кернят разметочные линии, по которым будет проводиться резка, рубка, опиловка. На цилиндрических поверхностях в основном наносят риски, ограничивающие обрабатываемый участок поверхности.

Перед разметкой подготавливают поверхности: очищают их от пыли, грязи, окалины. Необработанные поверхности окрашивают меловым раствором, чисто обработанные поверхности ротора окрашивают раствором медного купороса или специальным лаком для разметки. Краситель наносят тонким равномерным слоем перекрестными вертикальными и горизонталь-

ными движениями кисти. После окончания окрашивания поверхность просушивают.

Риски наносят разметочными инструментами — угольником, линейкой и чертилкой. При нанесении рисок острие чертилки плотно прижимают к ребру угольника (или линейки), одновременно наклоняя чертилку в сторону направления движения. Для получения четкой прямой линии следует проводить риску с небольшим нажимом, не изменяя наклона чертилки относительно ребра угольника. Нельзя по одной и той же риске проходить 2 раза, так как линия получится раздвоенной.

При разметке углов применяют циркуль, линейку и чертилку.

Нанесение окружности (дуги окружности), деление ее на части и построение многоугольников выполняют относительно центра или с отложением размеров от внутреннего или наружного диаметра детали.

В первом случае находят центр окружности с помощью угольника центроискателя. Угольник состоит из двух планок, соединенных под углом 90° , и жестко закрепленной линейки, рабочее ребро которой делит угол 90° пополам. На размечаемый торец детали накладывают угольник — центроискатель так, чтобы обе его планки касались цилиндрической поверхности детали. Прижимая линейку угольника к поверхности торца, проводят чертилкой первую диаметральную риску. Угольник-центроискатель поворачивают по цилиндрической поверхности на угол 90° (приблизительно) и проводят чертилкой вторую риску. Точка пересечения двух рисок является центром размеченной окружности. Из этого центра циркулем проводят дуги (окружности) требуемого радиуса, которую делят на необходимые части.

При отложении размеров от кромок детали применяют штангенциркуль. С помощью микрометрического винта рамку устанавливают на требуемый размер. Плотно прижимая неподвижную губку к цилиндрической поверхности, подвижной губкой проводят окружность.

Для нанесения горизонтальных линий на цилиндрической и торцовой поверхности детали применяют штангенрейсмус с чертилкой.

Для контроля правильности производственной разметки кернят разметочные линии. Операция кернения заключается в выполнении керном небольших углублений по рискам. Рабочая часть разметочных кернов имеет угол заострения 45 или 60° . Обязательно кернят точки пересечения и сопряжения линий. На прямых линиях керновые углубления делают на расстоянии $15...20$ мм; на окружностях и дугах — на расстоянии $5...10$ мм. Сначала кернер устанавливают на риску наклонно от себя. Затем, не сдвигая кернер с риски, ставят его перпенди-

кулярно разметочной плоскости и наносят по кернеру легкий кистевой удар молотком.

Рубка. В некоторых конструкциях роторов для съема металла при корректировке масс в плоскости коррекции предусмотрены специальные пояски. Съем металлов производят зубилами или крейцмейселями, представляющими собой род узких зубил. В зависимости от твердости обрабатываемого материала угол заточки зубил может быть: 70° — для чугуна и бронзы; 60° — для стали; 45° — для меди и латуни. Величину угла заточки контролируют на просвет с помощью плоского шаблона с угловыми вырезами $70, 60, 45^\circ$; прямолинейность кромки проверяют линейкой. Удары по зубилам производят молотками массой $0,4\ldots 0,8$ кг. Угол наклона зубила к горизонту должен быть $30\ldots 35^\circ$. Материал толщиной $3\ldots 5$ мм разрубают в два приема. Сначала делают глубокое надрубание с одной стороны, а затем переворачивают деталь другой стороной и разрубают окончательно.

Если невозможно применить рубку в тисках, то, например, полосовой металл укладывают на наковальню; режущие кромки зубила устанавливают на риску при вертикальном положении зубила; предварительно надрубают полосу до половины толщины, переворачивают ее и надрубают с другой стороны. Устанавливают место надруба у края плиты и, нажимая руками, производят надлом.

Вырубание слоев металла прямой или криволинейной формы выполняют крейцмейселям. За один прием вырубают не более 1 мм, оставляя припуск на чистовую рубку около $0,5$ мм. Главным условием в прорубании пазов является заточка крейцмейселя с поднутрением, что обеспечивает получение чистых кромок канавок.

Для механизации рубки применяют пневматические рубильные молотки.

Резка. Разрезание металлов вручную применяют в основном при изготовлении балансировочных грузов из листового и полосового материалов. Резку проводят ручными слесарными ножовками, острогубцами (для проволоки), ручными ножницами.

Особенности процесса резки полосового металла состоят в том, что резание выполняют по узкой стороне полосы при условии, что резание производят не менее трех зубьев ножовочного полотна. Резку заготовок толщиной менее шага зубьев полотна следует осуществлять ножовкой в вертикальном положении, со слабым нажимом на инструмент. Ножовкой работают с использованием всей длины ножовочного полотна.

Листовой материал толщиной $0,5 \ldots 0,8$ мм режут ручными ножницами, а толщиной до 4 мм — ручными рычажными ножницами. Ножницы подбирают в зависимости от вырезаемого контура:

для прямолинейного резания — с прямыми и широкими лезвиями;

для наружной криволинейной резки с изогнутыми широкими лезвиями;

для вырезания по внутренним кривым линиям — с изогнутыми узкими лезвиями.

Опиливание поверхностей широко распространено при корректировке масс как для съема металла с поверхности ротора, так и для подгонки корректирующей массы при ее изготовлении. Опиливание плоских и фасонных поверхностей производится по разметке. При этом применяют ручной (напильники) и механизированный (пневматические и электрические машинки) инструмент.

Перед пуском машинки проверяют надежность заземления и наличие смазочного материала. Исправность машинки устанавливают путем пробного пуска в холостую в течение 1 мин.

Грубую обдирку поверхностей производят фрезами-шарошками.

Режущий инструмент необходимо плавно и равномерно перемещать по обрабатываемой поверхности, не допуская волнистой поверхности.

Опиливание и зачистку поверхностей выполняют круглыми напильниками. При обработке необходимо правильно выбирать силу нажима на напильник: чем меньше насечка напильника, тем меньше должна быть сила нажима. От стружки напильники очищают стальными щетками, при засаливании напильники очищают мелом, натирая поверхность в направлении насечек.

Для шлифования и зачистки поверхностей применяют шлифовальные круги и абразивные фасонные головки, конфигурация которых зависит от профиля обрабатываемой поверхности. Процесс шлифования выполняют в такой же последовательности, как опиливание поверхностей круглыми напильниками. Для достижения требуемой шероховатости поверхностей их полируют каучуковыми, войлочными и каучукоабразивными кружками.

Сверление. Обработку отверстий проводят на сверлильных станках, электрическими и пневматическими машинками, дрелями.

Подготовка сверлильного станка к работе заключается в установке и закреплении режущего инструмента и детали, в определении скорости и подачи резания. Сверло выбирают в соответствии с заданным диаметром отверстия. Следует учитывать, что в результате бieniaия сверла при работе диаметр отверстия получается несколько больше диаметра сверла:

Диаметр сверла, мм	5	10	25	50
Диаметр полученного отверстия, мм	5,08	10,12	25,2	50,28

Для получения отверстий диаметром более 20 мм предварительно сверлят отверстие сверлом меньшего диаметра, а затем рассверливают его под размер сверлом большего диаметра. Диаметр меньшего сверла должен быть больше длины перемычки сверла, которым будет просверлено заданное отверстие.

В зависимости от формы хвостовика сверла подбирают сверлильный патрон или переходную втулку.

На столе сверлильного станка закрепляют деталь с приспособлением: в ручных тисках, призмах, кондукторе. Сверление отверстий производят по разметке, кондуктору или шаблону. Сверление по разметке выполняют в два приема — пробное сверление, при котором засверливают небольшие углубления для контроля правильности положения сверла, и окончательное сверление по центру намеченного отверстия. Полученный диаметр отверстия проверяют калибром-пробкой и штангенциркулем, глубину сверления глухих отверстий — глубинометром.

Использование кондукторов исключает необходимость разметки и накернивания центров. Точность сверления обеспечивают направляющие втулки кондуктора.

При сверлении ряда отверстий вместо кондуктора применяют шаблон. Шаблон представляет собой стальную пластину по форме поверхности с необходимым рядом отверстий. Шаблон накладывают на деталь, фиксируют в определенном положении и закрепляют. Сверление выполняют в следующем порядке. Через шаблон сверлят одно отверстие и фиксируют контрольным штифтом. Затем сверлят второе отверстие на другом конце детали и также фиксируют штифтом. Поочередно сверлят по шаблону остальные отверстия. Снимают шаблон и напильником удаляют заусенцы, образовавшиеся при сверлении.

Особенности сверления отверстий под резьбу заключаются в правильном выборе диаметра сверла. Диаметр сверла можно выбрать по табл. 7.1, для других резьб по ГОСТ 19257—73. Глубина глухих отверстий под резьбу должна быть больше длины нарезаемой части, чтобы калибрующая часть метчика немножко зашла за ее пределы.

Наладку сверлильного станка на расчетную глубину сверления осуществляют по втулочным упорам на сверле или измерительной линейке, закрепленной на станке. Для наладки сверло подводят к поверхности детали, сверля на глубину конуса сверла. На линейке отмечают начальное показание. К этому показанию прибавляют расчетную глубину сверления и получают отметку, до которой следует производить сверление. Сверление по втулочным упорам преимущественно применяют при работе электрическими и пневматическими машин-

Таблица 7.1

Диаметр сверла для отверстий под нарезание метрической резьбы, мм

Номинальный диаметр резьбы	Шаг резьбы	Диаметр сверла	Номинальный диаметр резьбы	Шаг резьбы	Диаметр сверла
1	0,2	0,80	6	0,75	5,25
	0,25	0,75		1	5,00
	0,25	1,75		0,75	6,25
2	0,4	1,60	7	1	6,0
	0,35	2,65		0,75	7,25
3	0,5	2,50	8	1	7,00
	0,5	3,50		1	8,00
4	0,7	3,30	9	1,25	7,80
	0,5	4,50		1	9,00
5	0,8	4,20	10	1,25	8,80
				1,5	8,50

ками. Втулку закрепляют на сверле на расчетном расстоянии от конуса сверла.

Для повышения стойкости режущего инструмента и получения чистой поверхности отверстия при сверлении металлов и сплавов используют смазочно-охлаждающие жидкости: мыльную эмульсию, смесь минеральных и жирных масел, керосин с касторовым или сурепным маслом.

При работе на сверлильных станках электрическими и пневматическими машинками необходимо соблюдать требования безопасности труда:

1) до начала работы внимательно осмотреть и проверить исправность защитных устройств; исправность пусковых приспособлений и распределительных устройств; надежность заземления; осмотреть инструмент и приспособления; работать можно только исправным инструментом;

2) во время работы запрещается чистить, обтирать и смазывать движущиеся и вращающиеся части, переставлять ремень при работающем электродвигателе; нельзя сдувать или удалять стружку руками, пользоваться тампонами или ветошью для подачи охлаждающей жидкости в обрабатываемое отверстие, прикасаться к вращающемуся сверлу; при сверлении хрупких металлов (бронза, чугун) необходимо надевать защитные очки;

3) после окончания работы следует очистить станок от стружки и грязи волосянной щеткой, протереть хлопчатобумажной ветошью, смазать ручной масленкой в местах, указанных в карте смазки.

Нарезание резьбы. В машиностроении широко используют высокопроизводительные методы нарезания резьбы с помощью резьбонарезного инструмента. Однако на практике при корректировке масс в большинстве случаев нарезают резьбу вручную.

Наружную резьбу нарезают круглыми плашками. Диаметр стержня под резьбу выбирают по табл. 7.2. Для уменьшения трения при нарезании резьбы и получения малой шероховатости резьбы применяют смазочные материалы: для стали — вареное масло; для чугуна и алюминия — керосин; для меди — скрипидар; для бронзы смазка не требуется.

Таблица 7.2

Диаметр стержней под метрическую резьбу
при нарезании плашками, мм

Диаметр резьбы	Шаг резьбы	Диаметр стержня	
		наименьший	наибольший
M 6	1,00	5,80	5,80
M 8	1,25	7,80	7,90
M 10	1,50	9,75	9,85
M 12	1,75	11,76	11,88
M 14	2,00	13,70	13,82
M 16	2,00	15,70	15,82
M 18	2,50	17,70	17,82
M 20	2,50	19,72	19,86

Внутреннюю резьбу нарезают комплектом из трех метчиков. Нарезанную резьбу проверяют предельным резьбовым калибром-пробкой.

Нарезание резьбы на сверлильных станках электрическими и пневматическими машинками выполняют с применением специального предохранительного патрона. В патроне предусмотрено закрепление метчика с регулируемым допустимым усилием. Особенностью машинок для нарезания резьбы является реверсивный механизм.

Клепка. Корректирующую массу с тонкостенной поверхностью ротора соединяют заклепками с потайной или полукруглой головкой. Диаметр заклепки зависит от толщины склеиваемых деталей: $d = 2b$, где b — наименьшая толщина склеиваемой поверхности (листа). Заклепки размещают на шве в один или несколько рядов. Шаг между центрами заклепок в однорядном шве $t = 3d$, в двухрядном шве $t = 4d$. Клепку выполняют молотками массой 300 ... 500 г.

Разметку обычно производят на пластине (корректирующей массе) нанесением рисок. В месте пересечения рисок накернивают центры отверстий. Сверлят и зенкуют отверстия в пластине, причем диаметр отверстия должен быть больше диаметра заклепки на 0,1 ... 0,2 мм. Пластины с просверленными отвер-

стиями используют в качестве шаблона для сверления отверстий в роторе.

Зенковку производят в соответствии с конусностью головки заклепки.

Длина стержня для образования головки в потай определяется по формуле $l = a + 1,2 d$, где a — общая толщина склеиваемых деталей. Общая длина стержня для образования полукруглой головки равна $l = a + 1,5d$.

При клепке заклепок с полукруглой головкой отверстия раззенковывают на глубину 1 мм. Вставляют заклепку, осаживают листы, стержень заклепки, формируют и отделяют замыкающую головку. Закладную головку заклепки при этом вкладывают в лунку поддержки, а отделку замыкающей головки до образования гладкой сферической формы выполняют с помощью обжимки.

Клепку пластин на крупногабаритных деталях, например вентиляторах, выполняют двое рабочих. Один из работающих удерживает массивную поддержку, а второй наносит удары молотком по обжимке, осаживая и формируя головку заклепки. В этом случае применяют также пневматические клепальные молотки.

Пайка. Пайкой жестко соединяют металлические детали или наносят необходимое количество массы припоя в легкое место ротора. Этот процесс применяют при корректировке масс небольших роторов, так как пайка не обеспечивает большой механической прочности соединения деталей.

Припой является сплавом нескольких металлов, хорошо растекается по поверхности, надежно сцепляется с металлом и обладает сравнительно низкой температурой плавления. Применяют оловянно-свинцовые припои (ПОС-10, ПОС-30 и т.п.). Для удаления окислов, лучшего растекания припоя, для предохранения от окисления во время пайки на поверхность вводят флюс: травленую кислоту или канифоль.

Пайку обычно производят электрическими паяльниками. Стержень паяльника имеет клинообразную рабочую часть, на которой поддерживается постоянная температура во время работы. Рабочая часть паяльника должна быть чистой, без заусенцев и иметь слегка притупленную вершину. Заправку рабочей части производят плоским личным напильником.

Перед пайкой поверхность детали очищают шабером, напильником или надфилем до металлического блеска. Волосяной кисточкой наносят жидкий флюс. Твердый флюс (канифоль) наносят разогретым паяльником.

Рабочую часть паяльника погружают на короткое время в сосуд с травленой кислотой для очистки от окислов. Другой способ очистки рабочей части паяльника состоит в погружении в канифоль. Очищенную рабочую часть вводят в соприкосно-

вение с припоем, забирая на жало паяльника две-три капли расплавленного припоя.

Подносят припой к месту пайки, покрытому флюсом. Как только место прикосновения прогреется, припой будет стекать с жала. Медленно перемещая паяльник вдоль шва в одном направлении, равномерным слоем наносят припой. При остывании припой имеет чистую блестящую поверхность.

Если пайка проводилась с применением кислоты, то ее остатки удаляют промывкой шва теплой водой.

Правила техники безопасности при пайке предусматривают: пайку необходимо проводить под вытяжным зонтом;

строго соблюдать правила пользования кислотами, работая при этом в защитных очках, резиновых перчатках и спецодежде;

паяльники укладывать на специальные металлические подставки для предупреждения пожаров и ожогов;

после работы с оловянно-свинцовыми сплавами и кислотами необходимо тщательно мыть руки.

Сборка. Распространенными сборочными операциями при балансировке являются: сборка резьбовых соединений и соединений с гарантированным натягом.

Резьбовые соединения образуют крепежные детали. К ним относятся крепежные болты, винты, шпильки, гайки, шайбы и т.п. Сборку резьбового соединения выполняют следующим образом. Стыкуют собираемые детали, совмещая отверстия, в которые вставляют болт. Надевают на болт шайбу и навинчивают гайку от руки. Затем гайку затягивают простым ключом или специальным инструментом с заданным усилием.

В многоболтовом соединении необходимо обеспечить равномерность затяжки, не допуская коробления соединяемых деталей. Сначала все гайки завинчивают от руки. Затем гайки слегка затягивают ключом. Окончательное завинчивание гаек проводят в определенной последовательности, например, крестнакрест, по звездочке и т.п.

Для предотвращения самоотвинчивания гаек, болтов, винтов и шпилек обязательно предусматривается стопорение резьбового соединения. Применяют стопорение гайки относительно болта, стопорение крепежных деталей относительно стягиваемых деталей и взаимное стопорение нескольких гаек, болтов и т.п.

Стопорение гайки относительно болта или шпильки осуществляется контрвочныхными гайками, пружинящими шайбами, самоконтрящимися гайками, шплинтами, кернением и другими контрящими деталями.

Контровочные гайки навинчивают после затягивания основной гайки. Пружинную шайбу устанавливают под гайки, которую затягивают с заданным усилием. При затяжке деталей из цветных металлов и их сплавов сначала ставят обыкновен-

ную шайбу, а затем пружинную. Шплинты устанавливают двумя способами: один усик шплинта загибают вверх на торец болта, а другой — вниз на грань гайки; оба усика загибают на грани гайки. Надрывы, трещины, вмятины в местах изгиба не допускаются. Шплинт используют только один раз. Для фланцевых соединений широко применяют стопорение пластинчатыми замками и шайбами, которые устанавливают на фланцы под гайки. После затяжки соединения отгибают усики на грани гайки (болта).

Стопорение крепежных деталей относительно одной из стягиваемых деталей выполняют проволокой, специальными замками и т.п. После затягивания соединения стопорение выполняют следующим образом: проволоку пропускают через отверстия в болте (гайке) и детали, а затем закручивают; отгибают один усик в отверстие на детали, а другой — на грань болта (гайки); кернят резьбу в соединении в местах нахождения шлиц под отвертку.

Взаимное стопорение нескольких гаек, болтов, винтов осуществляют общей пластинкой с отгибными усиками, а также связывают общей проволокой.

При сборке резьбовых соединений и стопорении применяют слесарно-сборочный инструмент и смазывание крепежных деталей. У правильно затянутых крепежных деталей на выступающих концах болтов и шпилек резьба не должна иметь повреждений, они должны плотно прилегать к сопрягаемым деталям.

Соединения с гарантированным зазором или натягом являются основным видом соединений деталей балансируемого узла и ротора. При корректировке масс и подготовке ротора к балансировке приходится часто производить их сборку и разборку.

Сборка узлов с гарантированным зазором проводится вручную. Для предотвращения заедания детали ее посадочную поверхность перед сборкой тщательно протирают и смазывают тонким слоем жидкого масла. Перекос деталей при сборке исключают применением направляющих, по которым перемещается деталь.

Запрессовку деталей при гарантированном натяге в соединение производят ударами молотка по втулке, центрирующей деталь и передающей усилия запрессовки; винтовыми приспособлениями для запрессовки и прессами. Для уменьшения усилия запрессовки временно уменьшают натяг, нагревая деталь с отверстием или охлаждая деталь, входящую в отверстие. Распрессовку выполняют с помощью съемников.

Работоспособность подшипников, точность балансировки роторов во многом зависят от качества сборки подшипниковых узлов. Процесс сборки опор с подшипниками трения

качения и трения скольжения включает подготовительные, контрольные и сборочные операции.

Подготовка подшипников к сборке состоит в промывке, просушивании и смазывании. Перед сборкой контролируют действительные размеры подшипников, осматривают его на предмет выявления коррозии, забоин, трещин и других дефектов. Для облегчения напрессовки внутреннего кольца подшипника на вал его прогревают в масляной ванне до 100°C. Кольца подшипников напрессовывают до упора в торец сопрягаемых поверхностей с помощью сборочных приспособлений и инструмента. Подбором компенсаторных прокладок регулируют осевой зазор в радиально-упорном подшипнике; измеряют радиальные зазоры в подшипниках скольжения. Контроль качества сборки опор проверяют по легкости вращения вала ротора от руки или динамометрическим ключом. При выполнении указанных работ необходимо соблюдать чистоту сборки, не допуская попадания в подшипник посторонних частиц.



ТЕХНОЛОГИЯ БАЛАНСИРОВКИ

Даются краткие сведения о технологическом процессе балансировки как составной части производственного процесса изготовления изделия; об организации балансировочных работ на участке и в бригаде, о нормировании и тарификации работ, формах технологических документов; приводятся рекомендации по рациональному выбору средств балансировки и режимов работы оборудования, по выбору прогрессивной технологии.

8.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ БАЛАНСИРОВКИ

Технология — это совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, применяемых в процессе производства, для получения готовой продукции.

Технология — это наука о способах воздействия на сырье, материалы и полуфабрикаты соответствующими орудиями производства.

Производственным процессом завода, цеха, участка и т.п. называют весь комплекс процессов организации, планирования, снабжения, изготовления, контроля и т.д., необходимых для превращения поступающих на завод (участок, цех) полуфабрикатов или сырья в готовую продукцию.

Часть производственного процесса, непосредственно связанная с изменением формы, размеров или состоянием детали, есть технологический процесс. Технологические процессы различают по виду процесса и виду продукции: например, технологический процесс сборки масляного насоса, технологический процесс термической обработки вала, технологический процесс механической обработки шестерни.

Под технологическим процессом балансировки понимают последовательное изменение исходного состояния детали, узла или ротора в заданное путем добавления, уменьшения или перемещения масс. Основным элементом технологического процесса балансировки, так же как и любого технологического процесса, является операция. Операция есть часть технологи-

ческого процесса, выполняемая на одном рабочем месте до перехода к балансировке следующей детали (узла).

Если, например, процесс определения значений и углов дисбалансов и их уменьшение выполняется одновременно на одном станке, то процесс будет осуществляться в одну операцию. Но если сначала определить значения и углы дисбалансов ротора на балансировочном станке, а затем произвести корректировку масс на другом рабочем месте, например на сверлильном станке, то получатся две операции: первая — "определение дисбалансов", вторая — "корректировка масс".

Операция является неделимой в организационно-плановом отношении частью технологического процесса и служит основной единицей производственного планирования.

Балансировка детали может быть выполнена за одну операцию или же за несколько операций. В связи с этим различают два вида операций: предварительная и окончательная.

Коэффициент уменьшения дисбаланса зависит от точности определения значения и угла дисбаланса, а также точности уменьшения (добавления, перемещения) корректирующей массы. Для современных балансировочных станков считается приемлемым снижение начального дисбаланса в 15 ... 20 раз. При больших начальных дисбалансах может понадобиться несколько предварительных операций. Количество операций тем больше, чем выше точность балансировки.

Операцию расчленяют на *переходы* — определенные законченные действия рабочего. К ним относятся: пуск станка в ход, измерение значения дисбаланса в первой плоскости коррекции, установка и снятие детали и т.п.

Процесс балансировки одной и той же детали может быть осуществлен различными способами. Организация процесса балансировки определяется типом машиностроительного производства.

Тип производства выделяется по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объему выпуска изделий. Различают следующие типы производств: единичное, серийное и массовое.

Единичное производство характеризуется широкой номенклатурой изготавливаемых или ремонтируемых изделий и малым объемом их выпуска. По принципу единичного производства организованы опытные заводы и цехи основного производства, цехи и участки вспомогательного производства, ремонтные цехи и участки.

Серийное производство характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготавляемых или ремонтируемых периодически повторяющимися партиями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство. По принципу серийного производства организованы многие заводы и цехи.

Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавляемых или ремонтируемых в течение продолжительного времени. В массовом производстве преимущественно применяют автоматические балансировочные станки и линии. По принципу массового производства организована балансировка коленчатых валов, колес автомобилей, электродвигателей.

8.2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

Форма организации балансировочных работ зависит от установленного порядка выполнения операций технологического процесса, расположения технологического оборудования, количества изделий и направления их движения в процессе изготовления. Форма организации работ определяется типом производства, программой выпуска изделий, трудоемкостью и т.п. При этом могут быть установлены две формы: групповая и поточная.

Поточную форму организации работ применяют в массовом и крупносерийном производстве. За каждым рабочим местом закрепляется определенная операция. Например, рабочий только определяет дисбаланс детали или производит корректировку масс. Все операции выполняются согласованно и ритмично с соблюдением такта выпуска деталей. Если, например, трудоемкость операции определения дисбалансов составляет 5 мин, а корректировки масс — 15 мин, то для обеспечения ритмичности нужно создать три рабочих места для корректировки масс. Рабочие места размещают в последовательности, строго соответствующей технологическому процессу.

Поточная форма организации работ предусматривает невысокую квалификацию балансировщиков, так как широко используются автоматические и полуавтоматические балансировочные станки и специальные приспособления. Пределом поточной формы организации работ является автоматическая линия по балансировке определенной детали.

Групповая форма организации работ характеризуется специализацией рабочих мест, совмещением операций и профессий рабочих. Организуется бригада рабочих, полностью выполняющая весь технологический процесс балансировки различных деталей, узлов и роторов. В состав бригады включаются балансировщики деталей и узлов, слесари механосборочных работ, станочники. Число рабочих в бригаде и их профессии зависят от объема и сложности работ. Примерный состав бригады, выполняющей статическую и динамическую низкочастотную балансировку роторов сборной конструкции, может быть следующим:

1. Балансировщик деталей и узлов 5 ... 6-го разряда.
2. Балансировщики 2 ... 4-го разряда.
3. Слесари механосборочных работ 2 ... 4-го разряда.
4. Слесарь по контрольно-измерительным приборам и автоматике 4-го разряда.
5. Контролеры и контрольный мастер.
6. Вспомогательные рабочие.

В состав бригады при выполнении сложных работ входит также технолог. Члены бригады, как правило, совмещают 1 ... 2 профессии.

В единичном производстве, во вспомогательных цехах весь комплекс балансировочных работ выполняет высококвалифицированный балансировщик деталей и узлов.

Рабочее место балансировщика и бригады балансировщиков представляет собой часть производственной площади цеха или участка с необходимым оборудованием, технологической оснасткой, средствами измерений, сборочным и режущим инструментом, вспомогательными материалами, применяемыми рабочим для выполнения операций. Чаще всего на заводах организуют балансировочный участок, имеющий три зоны. В первой зоне устанавливают балансировочные станки; во второй зоне производят сборочные работы; в третьей зоне осуществляют корректировку масс ротора. Балансировочные станки должны быть удалены от оборудования, оказывающего на них вредное влияние (вибрации, электромагнитные поля и т.п.).

Помещение балансировочного участка должно быть светлым, иметь высоту не менее 3,2 м; полы и стены должны быть окрашены масляной краской или облицованы моющими-ся материалами. В помещении балансировочного участка должна поддерживаться относительная влажность не выше 70% и температура не ниже +15°C и не выше +30°C. Освещение рабочих мест, где производится определение дисбалансов, сборка узлов, съем металла, должно быть не менее 200 ... 300 люкс. В необходимых случаях применяют местное освещение.

На каждого рабочего должно приходиться не менее 4,5 ... 6 м². Площадь всего балансировочного участка определяется размерами технологического оборудования и видом выполняемых работ. Рабочее место балансировщика оснащают: балансировочным станком, верстаком, стеллажом, грузоподъемным механизмом и весами.

Верстак предназначен для выполнения механосборочных работ при подготовке ротора и станка к балансировке. На крыше верстака устанавливают и закрепляют необходимую оснастку для сборки роторов и узлов станка. При сборке крупногабаритных деталей вместо верстака используют тележки и инструментальный столик. В ящиках верстака хранятся техно-

логические документы, инструмент, небольшие приспособления, запасные детали к балансировочному станку.

Стеллаж предназначен для длительного или кратковременного хранения приспособлений для балансировки, а также балансируемых деталей и узлов, приспособлений и инструмента для их сборки.

Рабочее место для съема металла должно иметь местную приточно-вытяжную вентиляцию.

Охрана труда и противопожарные мероприятия на балансировочном участке направлены на создание безопасных условий высокопроизводительного труда. К вредным факторам относятся: производственные пыль, шум, вибрация и т.п.

Вредные воздействия на кожу оказывают некоторые смазочно-охлаждающие жидкости, в состав которых входят керосин, щелочь, скрипидар и различные масла. Станки оборудуют защитными экранами, препятствующими попаданию СОЖ на кожу рабочего. Для защиты от разъедающих жидкостей, растворителей и масел кожу смазывают мазями до и после работы.

Производственная пыль состоит из минеральных и металлических частиц, образующихся в процессе обработки материалов. Для борьбы с пылью устраивают местную пылеулавливающую вентиляцию, вводят обработку материала с увлажнением, защищают дыхательные пути респираторами.

Работа балансировщика постоянно сопровождается шумом и вибрациями от балансировочного станка и ручного механизированного инструмента. Устройство ограждений врачающихся частей станка и ротора, покрытие стен и потолка помещения звукоглощающими материалами, применение наушников, работа в рукавицах с мягкой накладкой значительно улучшают условия труда.

Плохое состояние инструмента, неисправность электрооборудования, незнание или невыполнение рабочим безопасных приемов работы, нарушение правил техники безопасности могут быть причинами производственного травматизма. Металлические части станков и отдельно стоящие электрические шкафы, пульты заземляют в соответствии с правилами устройства электроустановок. Следует лишь регулярно следить за исправностью заземления. Напряжение в сети 36 В относительно безопасно. Поэтому светильники местного освещения, ручной электрифицированный инструмент должны иметь напряжение не выше 36 В. Однако опасность поражения током увеличивается, если у рабочего мокрая одежда, влажные руки, если он стоит на мокром полу. На участке должны находиться резиновые рукавицы, галоши или резиновый коврик, используемые для безопасного выполнения работ при обращении с электрооборудованием.

Правильное применение индивидуальных и коллективных средств защиты от вредных производственных факторов, стро-

гое соблюдение правил техники безопасности исключают производственный травматизм.

Пожары в производственных помещениях возникают в большинстве случаев от халатного отношения к хранению воспламеняющихся производственных отходов (масляных тряпок, пакли, бумаги), используемых для очистки станков, инструмента и обтирания рук. Поэтому все воспламеняющиеся материалы необходимо хранить в отдельной металлической таре с крышкой и в специально отведенном месте. Пожары могут возникать также вследствие самовозгорания промасленных концов, неисправности электропроводов и электроизмерительных приборов.

Во избежание пожаров необходимо выполнять все противопожарные мероприятия, курить только в специально отведенных местах, хранить огнеопасные материалы в сосудах из мягких алюминиевых сплавов в отведенных местах хранения, следить за исправностью электросети. Каждый работник должен знать месторасположение сигнализации о пожаре, а также уметь пользоваться ручными средствами пожаротушения.

8.3. НОРМИРОВАНИЕ И ТАРИФИКАЦИЯ РАБОТ

Под технической нормой времени понимают продолжительность времени, необходимого для выполнения операции в предусмотренных для нее условиях. Время на балансировку одной детали (без наладки станка) складывается из нескольких частей:

$$T_{шт} = T_o + T_v + T_{об} + T_{пп},$$

где T_o — основное (машиноное) время; T_v — вспомогательное время; $T_{об}$ — время обслуживания рабочего места; $T_{пп}$ — время перерывов на отдых и личные надобности.

Основное время — это время, в течение которого непосредственно достигается цель операции. При операции определения дисбалансов детали основное время равно продолжительности измерительного цикла. При механосборочных работах это время, затрачиваемое непосредственно на осуществление сборки, съема металла и т.п.

Вспомогательное время представляет собой время, которое затрачивает рабочий на установку, закрепление и снятие детали, управление станком и другие действия, сопровождающие выполнение основной работы.

Основное и вспомогательное время в сумме составляет время оперативной работы для балансировочной операции, называемое продолжительностью балансировки. При нормировании сборочных и балансировочных операций T_o и T_v не разделяют и дают их в виде оперативного времени: $T_{оп} = T_o + T_v$.

Время обслуживания рабочего места, затрачиваемое рабочим в течение рабочего дня на уход за рабочим местом, техническое обслуживание станка, подготовку к работе приспособлений, инструментов, документации, исчисляют в процентах на одну деталь от оперативного времени. Обычно принимают $T_{об} = 0,02 T_{оп}$.

Время перерывов на отдых рабочего и личные надобности T_p принимают в размере 2 ... 7% $T_{оп}$ в зависимости от тяжести работ.

В серийном и единичном производстве учитывается еще *подготовительно-заключительное время* $T_{п.з.}$. Это время затрачивается рабочим на ознакомление с предстоящей работой, подготовку и наладку станка, приспособлений и инструментов, а также на снятие приспособлений и инструментов после балансировки партии деталей. Величина $T_{п.з.}$ не зависит от количества деталей в партии и ее устанавливают на всю партию деталей.

Норму времени в условиях партионной работы называют *калькуляционной нормой времени*

$$T_k = T_{шт} + T_{п.з.}/n,$$

где n — число деталей в партии.

Нормы на балансировочные работы устанавливают опытно-статистическим путем при балансировке установочной партии деталей, хронометрируя отдельные операции. При установившемся производстве нормы уточняют хронометражным путем. Подготовительно-заключительное время не включают в норму времени на одну деталь и оплачивают отдельно.

Вместе с технической нормой времени устанавливают профессию, разряд работы, выполняемой на операции, и тарифную сетку, определяющую условия работы (например, горячие, холодные и др.).

Профессия "Балансировщик деталей и узлов" имеет 5 разрядов (2 ... 6-й разрад). Рассмотрим характеристики и примеры работ, а также перечень необходимых навыков и знаний для балансировщика по каждому разряду.

Балансировщик 2-го разряда должен знать:

1. Способы определения значений и углов главного вектора начальных и остаточных дисбалансов на станках для статической балансировки при помощи силы тяжести на невращающемся роторе. Способы определения массы, центра массы и статических моментов.

2. Способы корректировки масс добавлением материала и уменьшением массы сверлением отверстий, опиловкой поверхностей. Простые приемы выполнения работ при корректировке масс.

3. Устройство, принцип действия, конструкцию, подготовку к работе и техническое обслуживание станков для статической балансировки типа СБС.

4. Назначение и правила применения простых средств балансировки.

5. Типовой технологический процесс статической балансировки.

Должен выполнять следующие работы:

подготавливать к работе и статически балансирувать детали общего назначения на станках для статической балансировки типа СБС;

простую разметку, рубку, резку, опиливание несложных поверхностей, сверление отверстий для корректировки масс ротора;

настраивать балансировочные станки типа СБС под руководством балансировщика более высокой квалификации.

Примерами статической балансировки могут быть барабаны, части сельскохозяйственных машин, станков и технологического оборудования, маховики, крыльчатки, вентиляторы и другие детали общего назначения.

Балансировщик 3-го разряда должен знать:

1. Методы динамической балансировки деталей и жестких роторов простой формы. Способы определения осевых и экваториальных моментов инерции тел.

2. Способы корректировки масс уменьшением и перемещением масс. Сложные приемы выполнения работ при корректировке масс.

3. Устройство, принцип действия, конструкцию, подготовку к работе и техническое обслуживание простых станков для динамической балансировки. Методику настройки и оценку норм точности станков для статической балансировки типа СБС.

4. Назначение и правила применения средств балансировки средней сложности.

5. Типовой технологический процесс динамической балансировки простых деталей и роторов.

Должен выполнять следующие работы:

подготавливать к работе и динамически балансирувать детали общего назначения на предварительно настроенных простых станках для динамической балансировки;

настраивать станки для статической балансировки типа СБС и станки для динамической балансировки под руководством балансировщика более высокой квалификации;

основные виды работ при корректировке масс.

Примерами динамической балансировки деталей общего назначения могут быть вентиляторы, части станков и машин, роторы асинхронных электродвигателей, крыльчатки центробежных насосов.

Балансировщик 4-го разряда должен знать:

1. Методы низкочастотной балансировки жестких роторов сложной конфигурации.

2. Способы расчета корректирующих масс.

3. Устройство, принцип действия, конструкцию, подготовку к работе и техническое обслуживание сложных станков для динамической балансировки. Методику настройки и оценку норм точности простых балансировочных станков.

4. Назначение и правила применения сложных средств балансировки.

5. Типовой технологический процесс низкочастотной балансировки жестких роторов сложной конфигурации.

Должен выполнять следующие работы:

подготавливать к работе и динамически балансировать роторы с повышенными требованиями по точности балансировки на предварительно настроенных сложных станках;

настраивать и оценивать точность простых станков для динамической балансировки и сложные станки под руководством балансировщика более высокой квалификации;

расчитывать корректирующие массы и выполнять сложные виды работ при корректировке масс.

Примерами динамической балансировки жестких роторов сложной конфигурации могут быть роторы турбогенераторов, крупных электродвигателей со специальными требованиями, турбонасосов.

Балансировщик 5-го разряда должен знать:

1. Методы низкочастотной балансировки квазигибких роторов. Конструктивно-технологические особенности балансировки роторов в собственных подшипниках и в собственном корпусе.

2. Способы расчета дисбалансов при многоплоскостной балансировке и высокочастотной балансировке жестких роторов на месте установки.

3. Устройство, принцип действия, конструкцию, техническое обслуживание станков для высокочастотной балансировки. Методику настройки и оценки норм точности сложных станков для динамической балансировки.

4. Типовой технологический процесс высокочастотной балансировки.

Должен выполнять следующие работы:

подготавливать к работе и динамически балансировать жесткие роторы в собственных подшипниках и в собственном корпусе, а также балансировать во многих плоскостях квазигибкие роторы;

балансировать на высоких частотах вращения жесткие роторы на месте установки;

настраивать и оценивать нормы точности сложных станков для динамической балансировки;

все виды расчетных работ при балансировке.

Примерами балансируемых роторов могут быть роторы компрессоров, многоступенчатых паровых и газовых турбин, приводы точных приборов и станков, гироскопы.

Балансировщик 6-го разряда должен знать:

1. Методы высокочастотной балансировки гибких роторов.
2. Способы расчета дисбалансов при высокочастотной балансиро-ке на разгонно-балансировочных стендах.
3. Правила выбора рабочих технологических процессов балансировки.

4. Методики расчетов допустимых дисбалансов, настройки и оценки норм точности станков для высокочастотной балансировки.

Должен выполнять следующие работы:

балансировать особо ответственные роторы различных типов на станках для динамической балансировки и на месте их установки;

балансировать гибкие роторы, настраивать и оценивать нормы точности разгонно-балансировочных стендов под руководством инженера;

составлять рабочие технологические процессы низкочастотной балансировки жестких и квазигибких роторов простой конфигурации.

Примерами балансируемых роторов могут быть роторы крупных турбогенераторов типа ТГВ-200, гибкие валы роторов турбин, уникальные роторы с особо высокими требованиями по точности балансировки.

По технической норме времени, разряду работы и тарифной сетки устанавливают расценку на единицу продукции — расценку штучного времени.

8.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

Технологической подготовкой производства называют совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность завода, цеха или участка к выпуску изделий заданного качества при установленных сроках, объеме выпуска и затратах. Основными функциями технологической подготовки производства являются:

обеспечение технологичности конструкции изделия;
разработка технологических процессов;
проектирование и изготовление средств технологического оснащения;
управление процессом технологической подготовки производства изделия.

Технологичность конструкции изделия, узла, детали отрабатывается на стадии проектирования, разработки конструкторской документации, технологической подготовки производства, в процессе изготовления и эксплуатации. К показателям технологичности конструкции с позиций балансировки относятся:

1) класс ротора — жесткий, квазигибкий и т.п.;

- 2) значения технологических и эксплуатационных дисбалансов деталей, узлов, роторов;
- 3) класс точности балансировки;
- 4) допустимое количество плоскостей коррекции;
- 5) объем выпуска.

В результате отработки конструкции на технологичность выбирают метод балансировки и разрабатывают технические требования на балансировку.

Разработка технологических процессов включает комплекс взаимосвязанных работ:

- подбор типового технологического процесса;
- определение последовательности и содержания технологических операций;
- определение, выбор и заказ средств технологического оснащения;
- назначение режимов работы оборудования;
- нормирование, определение профессий и квалификации исполнителей;
- выбор средств механизации и автоматизации элементов технологических процессов и транспортирования;
- организация производственных участков;
- оформление рабочей документации на технологические процессы.

Технологическую подготовку производства выполняет служба подготовки производства завода или специальная проектная организация. Однако балансировщику в своей повседневной работе приходится решать различные вопросы технологической подготовки производства.

Определение класса ротора. Основным параметром, определяющим класс ротора, является отношение максимальной эксплуатационной угловой скорости ротора к первой критической угловой скорости ($\eta = \omega_{\text{эксп}} / \omega_{\text{кр1}}$). Если $\eta < 0,3$, то ротор относится к 1-му классу; если $\eta = 0,3 \dots 0,9$, то ротор относится ко 2-му классу (квазигибкий); если $\eta > 0,9$, то ротор считается гибким (3-го класса). Значение первой критической угловой скорости определяется расчетным или экспериментальным путем. Приблизительное значение $\omega_{\text{кр}}$ для сплошных стальных валов на двух опорах трения скольжения или трения качения можно найти по номограмме, приведенной на рис. 8.1. Критическое число оборотов вала на опорах скольжения определяют по шкале *a*; критическое число оборотов вала на опорах качения — по шкале "б".

Например, требуется определить критическое число оборотов сплошного стального вала диаметром $d = 150$ мм длиной $l = 1,1$ м на опорах качения. На левой шкале номограммы откладывают $d = 150$ мм и наносят точку *A*. На правой шкале

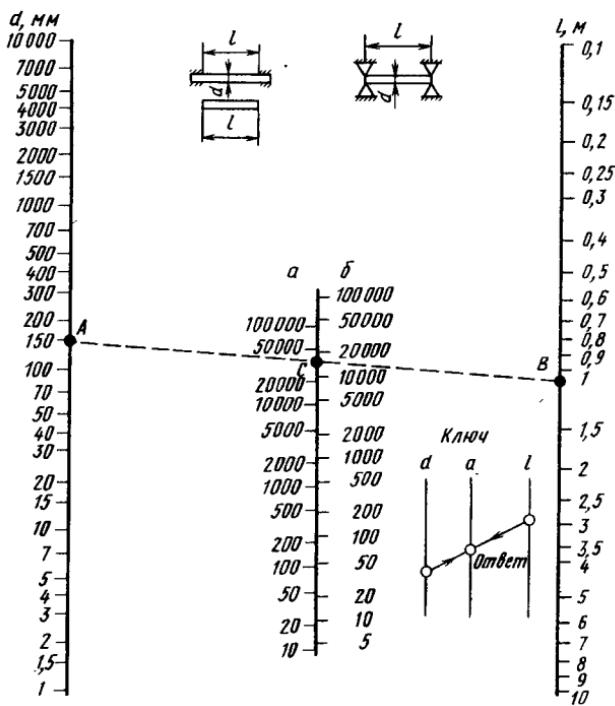


Рис. 8.1. Номограмма для определения критических частот вращения (об/мин) валов

наносят точку B , соответствующую длине вала $l = 1,1$ м. Точки A и B соединяют прямой линией и определяют точку C — пересечение прямой AB со шкалой b . Значение n_1 в точке C равно значению первой критической скорости $n = 15\,000$ об/мин или $\omega_{kp1} = 1500$ рад/с.

Критические скорости образуют отношение:

для случая a оно будет $n_{kp1} : n_{kp2} : n_{kp3} = 1 : 2,76 : 5,38$;

для случая b оно будет $n_{kp1} : n_{kp2} : n_{kp3} = 1 : 4 : 9$.

Номограммой можно пользоваться для полых валов с внутренним диаметром d_B . Сначала находят критическую скорость для сплошного вала, а затем рассчитывают n_{kp1} полого вала по формуле

$$n_{kp1} = n_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{d_B}{d}\right)^2}.$$

Классификация роторов приведена в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Классификация роторов

Класс ротора	Тип ротора	Примеры
1-й класс (жесткие)	Межпорный Консольный Двухконсольный	Ротор электродвигателя, барабан, приводной вал, шпиндель, гироскоп Вентилятор, маховик, центрифуга, шлифовальный круг Турбокомпрессор, турбогенератор, колесная пара
2-й класс (квазигибкие)	Роторы с известным распределением дисбалансов вдоль оси	
2 а	Консольный с одной или двумя плоскостями коррекции на консолях	Ротор турбины газотурбинного двигателя
2 в	Двухконсольный с двумя плоскостями коррекции на консолях	Ротор турбонасоса
2 с	Межпорный с более чем двумя плоскостями коррекции	Ротор компрессора
2 d	Межпорный симметричный ротор с равномерно распределенной массой и дисбалансами вдоль оси	Вал прокатного стана, приводной вал
2 е	Межпорный симметричный ротор с жесткой средней частью	Барабан печатной машины, ротор турбомолекулярного насоса
2-й класс	Роторы с неизвестным распределением дисбалансов вдоль оси	
2f, 2 g	Межпорный симметричный ротор с дискретными массами на гибком валу	Многоступенчатый ротор насоса, турбонасос
2 h	Межпорный несимметричный ротор	Роторы паровых и газовых турбин
3-й класс (гибкие); 3 а	Роторы с дисбалансом по 1-й форме изгиба	Четырехполюсный ротор генератора
3 b	Роторы с дисбалансами по 1-й и 2-й формам изгиба	Малые двухполюсные роторы генераторов

Продолжение табл. 8.1

Класс ротора	Тип ротора	Примеры
3 с	Роторы с дисбалансами более чем по 2-й форме изгиба	Большие двухполюсные роторы генераторов
4-й класс (с изменяемой геометрией)	Роторы 1, 2, 3-го классов, изменяющие свою геометрию на эксплуатационных частотах вращения	
5-й класс	Роторы 3-го класса, которые по техническим или экономическим причинам балансируют в двух плоскостях коррекции на максимальной эксплуатационной частоте вращения	

Выбор вида балансировки. Выбор низко- или высокочастотной балансировки зависит от класса ротора, начальных, технологических и эксплуатационных дисбалансов, конструкции ротора, точности балансировки.

Роторы 3-го класса балансируют на высоких частотах вращения независимо от остальных факторов (дисбалансов, конструкции и т.п.).

Роторы 1-го и 2-го классов балансируют на низких и высоких частотах вращения в зависимости от точности балансировки и значения эксплуатационных дисбалансов. Условие выбора вида балансировки имеет вид:

низкочастотная балансировка при $D_{\text{доп}} > D_T$;

высокочастотная балансировка при $D_{\text{доп}} < D_T$.

Выбор метода низкочастотной балансировки.

Одноплоскостную низкочастотную балансировку, в том числе статическую балансировку в динамическом режиме, применяют для балансировки консольных и двухконсольных жестких (1-го класса) и квазигибких (классов 2а, 2в) роторов, дисбалансы которых сосредоточены на консолях. Допустимость одноплоскостной балансировки зависит от значения моментной неуравновешенности.

Балансировку роторов класса 2в производят последовательно по мере сборки. Сначала балансируют первую консольную массу, а затем на вал устанавливают вторую консольную массу и производят балансировку во второй плоскости.

Двухплоскостную балансировку применяют для балансировки жестких консольных, межпорочных и двухконсольных роторов, а также квазигибких роторов классов 2в, 2е, у которых отношение расстояния между плоскостями коррекции к расстоянию между опорами лежит в пределах $l/L = 0,94 \dots 0,05$. Для зарезонансных балансировочных станков нижний предел несколько выше, т.е. $l/L = 0,1 \dots 0,15$. Дополнитель-

ным условием выбора метода двухплоскостной балансировки для роторов класса 2в является отсутствие моментной неуравновешенности у консолей.

Статико-моментную балансировку выбирают для балансировки жестких роторов, не удовлетворяющих условию $l/L = 0.94 \dots 0.05$, квазигибких роторов 2в, 2е имеющих большую моментную неуравновешенность, а также роторов класса 2г, 2f, конструкция которых допускает последовательную балансировку каждой дискретной массы по мере сборки ротора.

Для роторов классов 2d, 2e, 2f, 2g, 2h применяется много-плоскостная низкочастотная балансировка. Выбор метода многоплоскостной балансировки зависит от закона распределения начальных дисбалансов вдоль оси ротора.

Метод многоплоскостной балансировки с распределением корректирующих масс вдоль оси ротора пропорционально смещению главной центральной оси инерции и геометрической оси выбирают для роторов классов 2c, 2f, 2g с равномерным распределением начальных дисбалансов, т.е. когда при сборке контролируется начальный дисбаланс каждой массы (диска).

Метод балансировки с распределением корректирующих масс вдоль оси ротора пропорционально форме изгиба используется для роторов класса 2d.

Низкочастотную балансировку роторов с неизвестным распределением дисбалансов производят после выявления на высоких частотах вращения закона распределения. Выбор методов высокочастотной балансировки гибких роторов (классы 3а, 3в, 3с) производят расчетно-экспериментальным путем.

Определение последовательности операций. Число и последовательность операций определяются методом балансировки, способом корректировки масс, начальными и остаточными дисбалансами. Все методы балансировки предусматривают следующие операции:

определение значения и угла дисбаланса в плоскости измерения;

расчет корректирующей массы;

корректировку масс;

контроль остаточных дисбалансов.

При корректировке масс одновременно во всех плоскостях коррекции технологический маршрут будет состоять из этих 4 операций (без учета подготовительных и заключительных операций). Если же производят последовательную корректировку масс в каждой плоскости, то этот цикл операций увеличивают во столько раз, сколько предусмотрено плоскостей коррекции, т.е. после балансировки в 1-й плоскости коррекции следуют 4 операции, необходимые для балансировки во 2-й плоскости, и т.д.

За один балансировочный цикл начальный дисбаланс уменьшается в 15 ... 20 раз. Следовательно, число таких балансировочных циклов определяется отношением $D_{\text{нач}} / (15 \dots 20) D_{\text{ост}}$.

Например, для балансировки ротора в двух плоскостях коррекции с последовательной корректировкой масс в каждой плоскости при отношении начального дисбаланса к остаточному 40:1 технологический маршрут будет состоять из 16 рабочих операций.

Выбор балансировочных станков. Параметры балансируемого ротора и технологический маршрут служат исходной информацией для выбора балансировочных станков. Последние характеризуются: массой, диаметром цапф, максимальным наружным диаметром и длиной балансируемого ротора; диапазоном частот вращения, мощностью привода и точностью. Полностью технические характеристики на балансировочные станки приведены в паспортах, а основные — в табл. 4.1 и 4.2. Порядок выбора станка следующий.

1. Выбирают все станки, допускающие балансировку роторов массой, лежащей в пределах масс, допустимых для данного станка. В массу балансируемого ротора включают и паразитную массу опор, корпуса, приспособлений для балансировки, если с их помощью производят балансировку ротора.

2. Выбирают станки, допускающие балансировку ротора данной геометрии (длина ротора, максимальный диаметр приводной шейки под ремень или осевое соединение).

3. Выбирают частоту вращения ротора при балансировке из допустимого диапазона частот вращения станка и мощности привода. Мощность привода, частота вращения ротора при балансировке, момент инерции ротора, время разгона и прочность соединительного устройства (карданного вала, ремня) связаны между собой. На рис. 8.2. приведена номограмма для выбора максимальной частоты вращения ротора (об/мин).

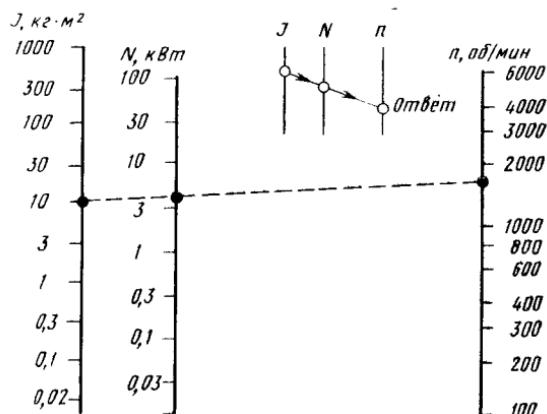


Рис. 8.2. Номограмма для выбора максимальной частоты вращения (об/мин) ротора при балансировке

Последовательность выбора частоты вращения следующая. На шкале осевых моментов инерции наносят точку, соответствующую осевому моменту инерции балансируемого ротора, а на шкале N (кВт) — точку, соответствующую мощности привода станка. Через эти две точки проводят прямую до пересечения со шкалой n . Точка пересечения определяет максимально допустимую частоту вращения ротора при балансировке.

Минимально допустимую частоту вращения ротора при балансировке находят по номограмме (рис. 8.3), связывающей мощность, крутящий момент и частоту вращения. Последовательность выбора аналогична предыдущей.

Для роторов, балансируемых в собственном корпусе, экспериментальным путем дополнительно находятся собственные частоты колебаний каждой опоры.

Пример. Выбрать частоту вращения при балансировке ротора с осевым моментом инерции $I_z = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Мощность привода балансировочного станка 4 кВт, крутящий момент 100 Н·м.

По номограмме на рис. 8.2 определим максимально допустимую частоту вращения ротора при балансировке — 1500 об/мин. По номограмме на рис. 8.3 находим минимально допустимую частоту вращения ротора при балансировке — 400 об/мин. Следовательно, частота вращения ротора должна лежать в диапазоне 400 ... 1500 об/мин.

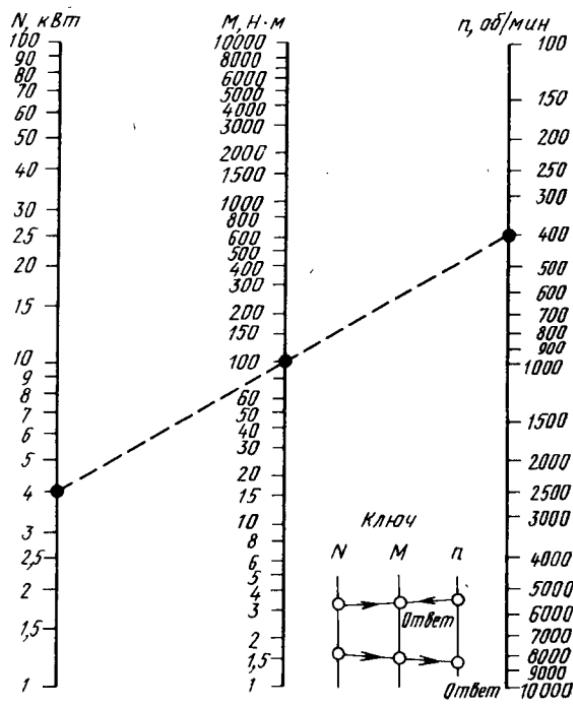


Рис. 8.3. Номограмма для выбора минимальной частоты вращения ротора при балансировке

При выборе станка по мощности привода задаются частотой вращения ротора и находят необходимую мощность и крутящий момент.

4. Выбор станка по точности балансировки производят расчетным путем. Вначале рассчитывают допустимые удельные дисбалансы в плоскостях опор станка, а затем их сравнивают с нормой точности станка. Расчет допустимых удельных дисбалансов выполняют по методике, изложенной в п. 4.4.

5. Выбор станка по производительности балансировки зависит от типа производства и объема выпуска изделий. В единичном производстве имеют преимущества дорезонансные балансировочные станки с измерительным устройством по схеме *a*, *b*, *c*, значительно упрощающие настройку станка. В серийном производстве выбор станка определяется подготовительно-заключительным временем на балансируемый ротор. При малом $T_{п.з}$ преимущество дорезонансных станков перед дорезонансными незначительно.

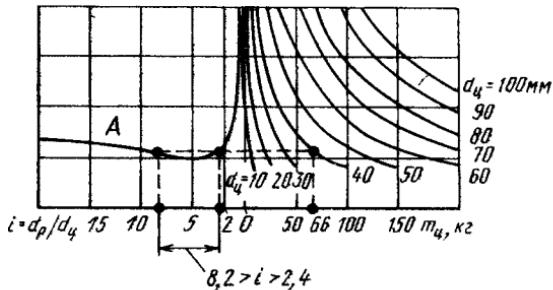
Выбор средств балансировки. Он определяется техническими требованиями на балансировку, а также конструкционными особенностями деталей, узлов, роторов и балансировочных станков.

Технологические опоры трения скольжения выбирают на основании расчета сил трения скольжения в зависимости от размеров цапфы и усилия на опору от сил тяжести ротора. Расчет выполняют по формулам, приведенным в п. 5.1.

Технологические подшипники качения выбирают по точности и фактическим диаметрам внутреннего кольца. Точность изготовления технологического подшипника должна быть на 1 ... 2 класса выше точности товарного подшипника. Погрешность балансировки может быть уменьшена, если из партии подшипников отобрать такие, у которых радиальные, торцовые биения и зазоры имеют минимальные значения, или произвести доработку стандартных подшипников, уменьшающую биение подшипника. Фактические диаметры внутренних колец подшипников и цапф имеют поле рассеивания, в результате чего посадка подшипника на цапфу может быть с большим натягом или зазором. Поэтому технологические подшипники одного типоразмера делят на группы по фактическим диаметрам внутреннего кольца. Число групп подшипников должно быть не менее трех.

Выбор подшипника качения производят следующим образом. Измеряют фактический диаметр цапфы балансируемого ротора $d_{ц}$. Рассчитывают необходимый внутренний диаметр $d_{вн} = d_{ц} + 0,005$ и выбирают группу технологического подшипника, соблюдая условие $d_{\max} > d_{вн} > d_{\min}$, где d_{\min} , d_{\max} — минимальный и максимальный диаметр внутреннего кольца подшипника в группе.

Рис. 8.4. Номограмма для выбора роликовых опор



Выбор роликовых опор производят с помощью номограммы (рис. 8.4.). На правой ветви оси абсцисс находят точку, соответствующую массе ротора, приходящуюся на опору, из которой проводят прямую, параллельную оси ординат до пересечения с гиперболой для значения диаметра цапфы ротора. Из точки пересечения прямой с гиперболой проводят прямую, параллельную оси абсцисс до пересечения с кривой A , и опускают перпендикуляр на левую ветвь оси абсцисс. Кривая A может пересекаться в одной или двух точках. Первая точка на оси d_p/d_{qA} указывает минимальное, а вторая — максимальное допустимое отношение диаметров цапфы и ролика.

Пример. Выбрать диаметр ролика роликовой опоры для балансировки ротора массой $m = 100$ кг, с диаметрами цапфы $d_{qA} = 40$ мм и расстояниями от центра массы ротора до опор $L_A = 600$ мм, $L_B = 400$ мм.

Вычислим массу ротора, приходящуюся на каждую опору:

$$m_A = \frac{L_B}{L_A + L_B} \quad m = \frac{400}{600 + 400} \quad 100 = 40 \text{ кг};$$

$$m_B = \frac{L_A}{L_A + L_B} \quad m = \frac{600}{600 + 400} \quad 100 = 60 \text{ кг}.$$

По номограмме (см. рис. 8.4) находим отношение диаметров $d_p/d_{qA} = 1,7$ и $d_p/d_{qB} = 2$. В качестве минимально допустимого значения примем $d_p/d_{qA} = 2$ и вычислим минимальный диаметр ролика $d_p = 2d_{qA} = 2 \cdot 40 = 80$ мм. Следовательно, роликовые опоры для балансировки ротора должны иметь диаметр роликов не менее 80 мм.

Балансировочные оправки выбирают из типовых конструкций оправок по внутреннему диаметру детали.

Балансировочные рамки необходимы для установки консольного ротора на зарезонансном балансировочном станке; межпоршневого ротора, имеющего диаметры цапф или наружные диаметры подшипников, превышающие допустимые размеры опор для выбранного балансировочного станка; ротора в собственном корпусе на балансировочный станок; роторов на зарезонансных балансировочных станках, опоры которых имеют одну степень свободы.

Кроме того, они необходимы для регулирования режима

работы станка при балансировке консольных и двухконочных роторов; роторов в сборе с большой паразитной массой и обеспечения максимальной точности балансировки.

Конструкция балансировочных рамок определяется балансируемым ротором и необходимостью регулирования режима работы станка.

Приспособления для металлорежущих станков, слесарно-сборочный инструмент, средства измерения, режущий инструмент выбирают в зависимости от конструкции ротора, способа корректировки масс, типа производства и других факторов.

Завершающий этап технологической подготовки производства — документирование балансировочных работ, отработка и уточнение технологического процесса, обучение рабочих новой технологии и приемам выполнения работ.

8.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Единая система технологической документации устанавливает правила оформления технологических документов на процессы различных работ в машиностроении и приборостроении. На балансировочные работы оформляют документы как на сборочные, слесарно-сборочные и электромонтажные работы. Основными технологическими документами балансировки являются:

маршрутная и операционная карты технологического процесса; карта эскизов и комплектовочная карта, а также ведомость оснастки и материалов.

Технологические документы оформляют в виде комплекта документов (рис. 8.5).

Заглавный лист комплекта "Технологический процесс" с наименованиями и обозначениями самого технологического процесса и балансируемой детали или сборочной единицы (узла, ротора) утверждает главный технолог. Внедрение технологического процесса в производство оформляют соответствующим актом.

Маршрутная карта предназначена для описания технологического процесса по операциям в технологической последовательности. По стандартам предприятия карту составляют по различным формам. В маршрутной карте обозначают номер участка, операции, рабочего места; записывают наименование, тип, инвентарный номер оборудования, приспособлений и инструмента; устанавливают нормы времени, профессию, разряд и тарифную сетку.

Операции нумеруют порядковыми номерами, кратными 5. Первая операция имеет номер 05, вторая — 10 и т.д. Такой порядок нумерации дает возможность вводить в существую-

		Ведомость оснастки									
Номер операции	Наименование приспособления и вспомогательного инструмента	Код приспособления и вспомогательного инструмента	Количество	Наименование режущего инструмента	Код режущего инструмента	Количество	Наименование измерительного инструмента	Код измерительного инструмента	Количество		
										Карта эскизов	
								Номер операции			
		Операционная карта слесарных, слесарно-сборочных и электромонтажных работ									
Номер перехода	Наименование операции		Оборудование								
			Содержание перехода		Технологический режим		Приспособление		Инструмент		
		Маршрутная карта									
Номер участка	Номер операции	Наименование и содержание операции		Оборудование		Приспособление и вспомогательный инструмент		Режущий инструмент		Измерительный инструмент	
УТВЕРЖДАЮ <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> 19 г.											
Технологический процесс											
<hr/> (наименование технологического процесса)											
<hr/> (наименование детали (сборочной единицы))											
<hr/> (обозначение детали (сборочной единицы))											
<hr/> (обозначение комплекта документов)											
Внедрен актом № <input type="text"/> от <input type="text"/> Технолог <input type="text"/> (<input type="text"/>) Нормоконтролер <input type="text"/> (<input type="text"/>) Начальник техбюро <input type="text"/> (<input type="text"/>) Разработал <input type="text"/> (<input type="text"/>) 											

Рис. 8.5. Комплект технологической документации на балансировку ротора

щий процесс дополнительные операции, которым присваивают номера 6, 7 или 11, 12 и т.п.

Операционная карта предназначена для описания операций по переходам в технологической последовательности с указанием методов и приемов выполнения работ. В операционной карте обозначают оборудование, приспособление, инструмент; указывают номера переходов, операции, участка, время, необходимое для выполнения перехода, режимы работы станка или механизированного инструмента (например, частоту вращения, усилие запрессовки, крутящий момент и др.).

Технологический процесс может включать и операции механической обработки, необходимые для корректировки масс. В этом случае оформляют операционную карту механической обработки.

Необходимую графическую информацию для выполнения операций приводят на картах эскизов. Как правило, на них изображают балансируемую деталь или сборочную единицу с указанием положения плоскостей коррекции и необходимых размеров для установки детали на станке и корректировки масс. Приводят графические зависимости параметров корректирующих масс от начальных дисбалансов детали и другую графическую информацию.

Комплектовочная карта предназначена для записи данных о деталях и сборочных единицах, входящих в комплект собираемого узла для балансировки, если сборочная операция входит в технологический процесс балансировки.

Ведомости оснастки и материалов составляют на приспособления, режущий, измерительный и вспомогательный инструмент, а также материалы, применяемые при выполнении технологического процесса балансировки.

Объем основной технологической документации зависит от типа производства, формы организации работ, сложности процесса балансировки. Так, например, при поточной организации работ в крупносерийном производстве балансировщику достаточно иметь лишь операционную карту технологического процесса, которую оформляют в виде балансировочной карты по ГОСТ 22061 — 76. В балансировочной карте указывают технические требования на балансировку ротора, положение органов управления балансировочным станком (настройка измерительного пульта) и цену деления индикаторов дисбаланса.

При групповой организации балансировочных работ в мелко- и среднесерийном производстве бригада балансировщиков, кроме полного комплекта основных, должна иметь ряд дополнительных технологических документов. К ним относят:

технологическую инструкцию на балансировку;

техническое описание и инструкцию по эксплуатации балансировочного станка;

технологические паспорта на станки, специальные приспособления и инструменты, сборку узлов;

акты проверок всех средств технологического оснащения.

В технологической инструкции на балансировку ротора приводят общие технические требования и требования безопасности при проведении балансировочных работ; требования к станку, приспособлениям, инструменту и балансируемому ротору. Описывают порядок выполнения работ и даются методики настройки станка, балансировки ротора, контроля остаточных дисбалансов.

Технологические паспорта являются приложениями к технологической инструкции. В паспорте приводят основные технические данные, фактические параметры и результаты периодических проверок данного средства балансировки. Например, технологический паспорт контрольного ротора включает:

назначение контрольного ротора;

параметры ротора (масса, момент инерции, геометрические размеры и т.п.);

допустимые дисбалансы в плоскостях коррекции;

остаточные дисбалансы в плоскостях коррекции с указанием даты проверки и отметки контрольного мастера;

периодичность проверки контрольного ротора.

Форма технологического паспорта устанавливается стандартом предприятия.

■ ■ ■

ТИПОВЫЕ РАБОЧИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ БАЛАНСИРОВКИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Приведены рабочие технологические процессы статической, двухплоскостной, статико-моментной, многоплоскостной низкочастотной балансировки деталей и узлов различных изделий машиностроения и приборостроения, а также пример высокочастотной балансировки ротора турбоагрегата на месте установки.

Большое разнообразие балансируемых деталей и узлов определяет соответственно и большое разнообразие встречающихся технологических процессов. Вид технологического процесса зависит от числа изделий, охватываемых процессом (одно изделие, группа однотипных или разнотипных изделий). При этом различают два вида технологических процессов: единичный и типовой.

Единичный технологический процесс применяют для балансировки детали или узла одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от вида производства.

Типовой технологический процесс применяют как информационную основу при разработке рабочего процесса балансировки конкретного ротора, а также как рабочий технологический процесс при наличии всей необходимой информации для балансировки детали, узла или ротора.

Типизация технологических процессов базируется на классификации по различным признакам объектов производства. Независимо от конструкции, назначения, технических требований балансируемые роторы можно классифицировать по классам роторов (см. табл. 8.1). В соответствии с такой классификацией выделяются наиболее общие типовые процессы динамической балансировки:

низкочастотная балансировка роторов в одной или двух плоскостях коррекции;

статико-моментная низкочастотная балансировка роторов;

многоплоскостная низкочастотная балансировка роторов;

высокочастотная балансировка роторов.

К типовым процессам статической балансировки можно отнести статическую балансировку деталей с помощью силы тяжести и определения геометрии масс роторов.

Типовые рабочие технологические процессы применяют для балансировки конкретных деталей и узлов в соответствии с требованиями рабочей технической документации. Рассмотрим некоторые типовые рабочие процессы балансировки деталей и узлов различных изделий машиностроения.

9.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СТАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ДИСКА

Технические требования

Диск (рис. 9.1) балансируется статически относительно базы А.

Допустимое значение главного вектора остаточных дисбалансов 150 г·мм; допустимое значение главного вектора начальных дисбалансов 2000 г·мм.

Корректировку масс выполнить в плоскости П сверлением осевых отверстий диаметром не более 8 мм, глубиной до 20 мм на радиусе $R = 188 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$. Допускается сверление не более 15 отверстий.

Наименование и содержание операций.

05. Входной контроль диска.

10. Подготовка балансировочного станка к работе.

15. Определение значения и угла главного вектора начальных дисбалансов диска.

20. Расчет корректирующей массы.

30. Определение значения и угла главного вектора остаточных дисбалансов диска (контроль остаточного дисбаланса).

Содержание переходов

Операция 05.

1. Проверить комплектность и правильность оформления сопроводительной документации на диск.

2. Произвести внешний осмотр диска. Коррозия, забоины, вмятины и другие повреждения на поверхностях детали не допускаются.

3. Измерить диаметр отверстия А ($\phi 80^{+0,03}$).

Внешний осмотр проводят с помощью лупы на сборочном верстаке, а в переходе 3 используют инструмент — калибр-пробку.

Операция 10 выполняется на балансировочном станке СБС-4.

1. Произвести внешний осмотр балансировочного станка. Механические повреждения не допускаются.

2. Протереть рабочие поверхности опор станка хлопчатобумажной салфеткой, смоченной обезжиривающей жидкостью.

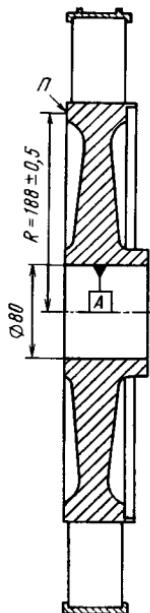


Рис. 9.1. Диск

3. Установить контрольный ротор на опоры станка. Ротор должен сохранять состояние безразличного равновесия. В противном случае отрегулировать станок.

4. Ввернуть контрольный груз в одно из отверстий контрольного ротора до упора.

5. Повернуть контрольный ротор с контрольным грузом в горизонтальное положение и освободить его. Освобожденный ротор должен выйти из равновесия, повернувшись вокруг оси. В противном случае проверить порог чувствительности станка согласно технологической инструкции на статическую балансировку диска.

В операции 10 используется приспособление — контрольный ротор с контрольным грузом, инструмент — гаечный ключ.

Операция 15 выполняется на слесарном верстаке и балансировочном станке СБС-4.

1. Установить диск диаметром A на балансировочную оправку, предварительно смазав ее посадочную поверхность жидким маслом. Завернуть гайку от руки до упора. Затянуть гайку динамометрическим ключом, обеспечив момент затяжки $30 \dots 35 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

2. Установить диск с оправкой (сборочную единицу) на опоры станка.

3. Определить тяжелое место диска и отметить его нанесением риски карандашом.

4. Уменьшить начальный дисбаланс, прикрепляя в противоположном месте (легком месте) на радиусе $R = 188 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ в плоскости P восковые грузы. Подобрать массу груза такой, чтобы диск не поворачивался (находился в равновесии), когда тяжелое место расположено в горизонтальной плоскости.

5. Снять воск с диска.

6. Взвесить груз и записать его массу в рабочий блокнот.

7. Определить значение главного вектора начальных дисбалансов диска по формуле $D_{\text{ст нач}} = mr_k$, где m — масса воскового груза, r_k — радиус установки груза ($r_k = 188 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$). Записать $D_{\text{ст нач}}$ в технологический паспорт балансировки.

В операции 15 используется приспособление — балансировочная оправка, весы аналитические; инструмент — ключ динамометрический.

Операция 20.

1. Определить число отверстий, диаметр и глубину сверления по номограмме, приведенной на карте эскизов к операции 20. Записать параметры сверления в рабочий блокнот.

Операция 25 выполняется на сверлильном станке.

1. Установить и закрепить диск с оправкой в приспособление. Закрыть цапфы оправки защитными чехлами. Совмес-

тить кондукторную втулку с риской на диске, указывающей легкое место.

2. Установить и закрепить на столе сверлильного станка приспособление с диском. Настроить сверлильный станок.

3. Просверлить рассчитанное число отверстий на заданную глубину. Глубину сверления контролировать по шкале лимба и нониуса станка.

4. Снять приспособление со стола сверлильного станка, очистить от стружки, вынуть диск с оправкой, снять защитные чехлы.

В операции используются приспособления — кондуктор, защитные чехлы; инструмент — комплект гаечных ключей, сверло, патрон.

Операция 30 выполняется на балансировочном станке мод. СБС-4.

1. Установить диск с оправкой на опоры станка и повторить выполнение переходов 3 ... 7 операций 15.

Если $D_{\text{стост}} < D_{\text{стдоп}}$, то результат занести в технологический паспорт балансировки, а сборочную единицу разобрать. Диск уложить в тару.

Если $D_{\text{стост}} > D_{\text{стдоп}}$, то повторить операции 20, 25, 30 до тех пор, пока значение главного вектора остаточных дисбалансов не станет меньше допустимого.

9.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРА СРЕДНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Технические требования

Ротор (рис. 9.2) балансировать динамически в двух плоскостях коррекции относительно поверхностей A и B.

Допустимый дисбаланс в плоскостях коррекции не более:

в плоскости 1 — 330 г·мм;

в плоскости 2 — 470 г·мм.

Корректировку масс выполнять установкой балансировоч-

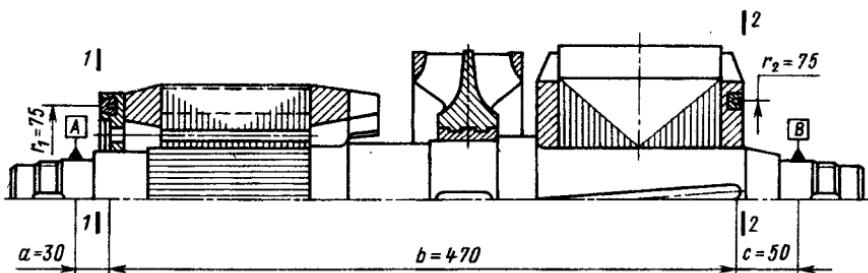


Рис. 9.2. Ротор средний электрической машины

ных грузов в кольцевые пазы плоскостей коррекции 1 и 2. Крайние балансировочные грузы закернить. Балансировочные грузы БГЗ устанавливать между балансировочными грузами БГ1 и БГ2.

Наименование и содержание операций

05. Входной контроль ротора.

10. Подготовка балансировочного станка к работе.

15. Подготовка балансируемого ротора.

20. Определение значения и угла корректирующих масс в плоскостях коррекции 1 и 2.

25. Корректировка масс.

30. Контроль остаточных дисбалансов.

Содержание переходов

Операция 05

1. Проверить комплектность и правильность оформления сопроводительной документации на балансируемый ротор.

2. Произвести внешний осмотр ротора. Коррозия, забоины, вмятины и другие механические повреждения цапф и поверхностей ротора не допускаются.

Операция 10 выполняется на дорезонансном балансировочном станке с осевым приводом.

1. Проверить внешним осмотром отсутствие механических повреждений станины, балансировочного устройства, пульта управления и электрокабелей станка.

2. Проверить легкость вращения роликов роликовых опор. Протереть их поверхность хлопчатобумажной салфеткой и смазать 2–3 каплями жидкого масла.

3. Проверить положение органов управления измерительным пультом станка по карте настройки пульта станка.

4. На диске приводного угломера установить заданный шарнир (приводной вал).

5. Включить питание пульта станка. Отрегулировать яркость световых точек векторметров.

Операция 15 выполняется на транспортной тележке.

1. Установить на ротор переходную втулку, соединяющую приводной вал с балансируемым ротором.

2. Закрепить на роторе приспособление для подъема.

3. Протереть цапфы хлопчатобумажной салфеткой.

В операции 15 используются приспособления — переходная втулка, приспособления для подъема; инструмент — комплекс сборочного инструмента (гаечные ключи, молоток, отвертки и т.п.).

Операция 20 выполняется на дорезонансном балансировочном станке с осевым приводом.

1. Снять ротор с транспортной тележки и плавно опустить цапфами на ролики станка. Снять с ротора приспособление для подъема.

2. Опустить зажимные ролики роликовой опоры. Между

зажимным роликом и цапфой ротора должен быть зазор до 1 мм.

3. Закрепить шарнир приводного вала в переходной втулке винтом. Проверить надежность крепления защитного кольца приводного вала.

4. Провести два, три кратковременных пуска ротора. Убедиться в надежности крепления вращающихся частей и правильности установки балансируемого ротора.

5. Включить привод станка, пускателем переключая ступени, начиная с 0 и кончая последней. Переключение на последнюю ступень допускается только после снижения показаний амперметра до нормальной величины. Выждать необходимое время (1 ... 2 мин) для достижения постоянной частоты вращения балансируемого ротора.

6. Включить индикаторы дисбалансов нажатием клавиши, фиксирующей показания.

7. Выключить привод станка, возвратив пускатель в исходное нулевое положение.

8. Занести показания вектометров в рабочий блокнот и в технологический паспорт балансировки ротора.

В операции 20 используются грузоподъемный механизм и комплект сборочного инструмента.

Операция 25 выполняется на дорезонансном балансировочном станке с осевым приводом.

1. Рассчитать число балансировочных грузов БГ3 по формуле

$$n = (m_k - m_0)/m_{\text{дет}},$$

где m_0 — масса двух грузов БГ1 или БГ2; $m_{\text{дет}}$ — масса одного груза БГ3 для 1-й и 2-й плоскости коррекции.

Максимальное число балансировочных грузов БГ3, устанавливаемых между двумя балансировочными грузами БГ1 или БГ2, не должно превышать 25 шт.

2. Набрать рассчитанное число балансировочных грузов БГ3 для 1-й и 2-плоскости коррекции.

3. Установить в пазу 1-й плоскости коррекции под углом, соответствующим углам, полученным в операции 20, два балансировочных груза БГ1 (БГ2) и рассчитанное число балансировочных грузов БГ3. Закрепить балансировочные грузы БГ1 (БГ2) стопорными винтами. Грузы располагать симметрично относительно линии действия дисбаланса.

4. Повторить переход 3 операции 25 для 2-й плоскости коррекции.

В операции 25 используются комплекты балансировочных грузов постоянной массы, изготовленные из стали и дюралюминия, а также комплект сборочного инструмента.

Операция 30 выполняется на дорезонансном балансировочном станке с осевым приводом.

1. Повторить переходы 5 ... 8 в операции 20. Если остаточные дисбалансы в плоскостях коррекции 1 и 2 меньше допустимых дисбалансов, то балансировка выполнена полностью. В противном случае повторить операцию 25 и 30. Значения остаточных дисбалансов в плоскостях коррекции занести в технологический паспорт балансировки.

2. Закрепить на роторе приспособление для подъема.

3. Освободить шарнир приводного вала в переходной втулке.

4. Поднять зажимные ролики роликовой опоры.

5. Снять отбалансированный ротор со станка, опустить на транспортную тележку и закрепить в ложементах.

6. Снять с ротора приспособление для подъема.

7. Снять с ротора переходную втулку.

8. Раскрыть крайние балансировочные грузы (БГ1 или БГ2).

В операции 30 используется оборудование, приспособления и инструмент операций 10 и 15.

9.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СТАТИКО-МОМЕНТНОЙ БАЛАНСИРОВКИ МАХОВИКА ИНЕРЦИОННОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА

Технические требования

Маховик инерционный (рис. 9.3) балансировать динамически в собственных подшипниках и собственном корпусе на частоте вращения 25 об/с.

Допустимое значение главного вектора остаточных дисбалансов — 30 г·мм. Допустимое значение главного момента остаточных дисбалансов — 640 г·мм².

Корректировку масс выполнять в 1-й и 2-й плоскости сверлением осевых отверстий диаметром не более 8 мм, глубиной до 20 мм на радиусе $r_k = 188 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Допускается сверление не более 15 отверстий в каждой плоскости коррекции. Уменьшение значения главного вектора начальных дисбалансов производить во 2-й плоскости коррекции. Уменьшение значения главного момента начальных дисбалансов производить в 1 и 2-й плоскостях.

Наименование и содержание операций.

05. Входной контроль инерционного маховика.

10. Подготовка балансировочного станка.

15. Подготовка инерционного маховика.

20. Определение значений и углов главного вектора и главного момента начальных дисбалансов.

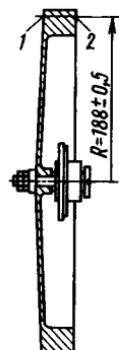


Рис. 9.3. Маховик инерционный

25. Расчет корректирующих масс.
30. Корректировка масс.
35. Контроль остаточных дисбалансов.

Содержание переходов.

Операция 05 выполняется на поворотном установочном приспособлении.

1. Проверить комплектность и правильность оформления сопроводительной документации на инерционный маховик.

2. Произвести внешний осмотр балансируемого узла. Коррозия, забоины, вмятины и другие механические повреждения поверхностей узла не допускаются.

3. Установить балансируемый узел в поворотное установочное приспособление и закрепить его.

4. Проверить плавность вращения маховика при вертикальном и горизонтальном положении его оси. Заедания не допускаются.

5. Определить момент трогания маховика при горизонтальном положении оси вращения, установив на ободе в горизонтальной плоскости пластилиновый груз массой 3 г. Маховик должен повернуться на 90°.

Операция 10 выполняется на зарезонансном балансировочном станке с ленточным соединением.

1. Внешним осмотром проверить отсутствие механических повреждений станины, балансировочного устройства, пульта управления и электрокабелей станка.

2. Установить на опоры станка балансировочную рамку.

3. Проверить плавность перемещения опор балансировочного устройства. Перемещение должно быть свободным, без заеданий.

4. Проверить положение органов управления измерительным пультом станка по карте настройки пульта.

5. Протереть рабочие поверхности шкива на электродвигателе, направляющих роликов и ленточного ремня хлопчатобумажной салфеткой, смоченной обезжирающей жидкостью.

6. Включить питание пульта станка.

В операции 10 используется балансировочная рамка и комплект сборочного инструмента.

Операция 15 выполняется на поворотном установочном приспособлении.

1. Установить на вал балансируемого узла шкив.

2. Закрепить шкив на валу гайкой с крутящим моментом $40 \pm 0,5$ Н·м. Законтрить гайку.

3. Проверить радиальное биение шкива индикатором часового типа. Биение более 0,03 мм не допускается.

4. Протереть поверхность шкива хлопчатобумажной салфеткой, смоченной обезжирающей жидкостью.

В операции 15 используются шкив с гайкой, динамометрический ключ, индикаторная стойка, а также комплект сбороч-

нного инструмента, индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Операция 20 выполняется на зарезонансном балансировочном станке с ленточным соединением.

1. Установить балансируемый узел на балансировочную рамку и закрепить винтами.

2. Надеть ленточный ремень на шкив балансируемого узла, ролики и шкив электродвигателя. Натянуть ремень и установить натяжные ролики так, чтобы ветви ремня были вертикальны и лежали в одной плоскости.

3. Нанести на левом торце маховика меловую метку.

4. Отрегулировать положение стробоскопа, установив его против левого торца маховика.

5. Произвести два, три кратковременных пуска балансируемого узла. Убедиться в надежности крепления подвижных и врачающихся частей и правильности установки балансируемого узла.

6. Включить привод станка, выждать в течение 2 ... 3 мин до достижения маховиком устойчивой балансировочной частоты вращения. Растворомозить опоры станка.

7. Установить переключатель плоскостей измерения в положение измерения главного вектора дисбалансов. Записать показания индикатора дисбаланса (число делений) в рабочий блокнот. Установить переключатель "Значение — Угол" в положение "Угол" и сделать отметку углового положения дисбаланса.

8. Затормозить опоры станка. Выключить привод станка.

9. Вычислить значение главного вектора начальных дисбалансов по формуле:

$D_{ст\ нач} = \text{число делений} \times \text{цена деления по главному вектору}.$

10. Вычислить значение неуравновешенной массы по формуле

$$m = D_{ст\ нач} / r_k, \text{ где } r_k = 188 \text{ мм.}$$

11. Отвесить пластилиновый груз массой m .

12. Прикрепить пластилиновый груз в легком месте маховика во 2-й плоскости на радиусе 188 мм.

13. Определить значение и угол главного момента начальных дисбалансов, повторив переходы 6 ... 8 для другой плоскости измерения.

14. Вычислить значение главного момента начальных дисбалансов по формуле:

$M_{D\ нач} = \text{число делений} \times \text{цена деления по главному моменту}.$

15. Вычислить значения неуравновешенных масс в 1-й и 2-й плоскостях измерения по формуле:

$$m_1 = m_2 = M_{D \text{ нач}} / r_k l,$$

где $r_k = 188$ мм, $l = 60$ мм.

16. Отвесить пластилиновые грузы массой m_1 и m_2 и сформировать из них параллелепипеды толщиной 10 мм.

17. Прикрепить пластилиновый груз m_1 в легком месте маховика в 1-й плоскости на радиусе 188 мм. Пластилиновый груз m_2 прикрепить под углом 180° относительно первого груза во 2-й плоскости на радиус 188 мм.

18. Повторить переходы 6 ... 14 для определения остаточных значений главного вектора и главного момента дисбалансов маховика.

Если остаточные значения меньше допустимых, то занести начальные значения $D_{ст нач}$ и $M_{D нач}$ в технологический паспорт на балансировку и перейти к следующей операции. В противном случае повторить переходы 6 ... 18.

В операции 20 использовать аналитические весы и микроКалькулятор.

Операция 25 выполняется с помощью номограмм.

1. По номограммам определить число, диаметр и глубину сверления отверстий в 1-й и 2-й плоскостях коррекции.

2. Результаты расчета записать в рабочий блокнот.

Операция 30 выполняется на вертикально-сверлильном станке.

1. Снять балансируемый узел со станка, надеть защитные чехлы.

2. Разметить на маховике линии действия главного вектора и главного момента дисбалансов.

3. Подготовить к работе сверлильный станок.

4. Установить маховик инерционный в приспособление для сверления. Наложить на маховик кондуктор. Ось симметрии кондуктора должна совпадать с линией действия главного вектора дисбаланса.

5. Просверлить отверстия в правом торце маховика для уменьшения главного вектора начальных дисбалансов.

6. Повернуть кондуктор так, чтобы его ось симметрии совпадала с линией действия главного момента дисбалансов (моментного дисбаланса).

7. Просверлить отверстия в правом торце маховика для уменьшения главного момента начальных дисбалансов.

8. Снять накладной кондуктор. Повернуть маховик инерционный в приспособлении для сверления левым торцом вверх. Наложить на маховик накладной кондуктор, совместив ось симметрии с линией действия моментного дисбаланса в 1-й плоскости коррекции.

9. Просверлить отверстия в левом торце маховика для уменьшения главного момента начальных дисбалансов так же

как в переходе 7. Отверстия в левом торце должны быть под углом 180° к отверстиям в правом торце.

10. Снять балансируемый узел со сверлильного станка. Зачистить отверстия от заусенцев. Волосяной щеткой удалить опилки и стружку. Снять защитные чехлы.

В операции 30 используются приспособление для сверления, накладной кондуктор, защитные чехлы, патрон, сверло, шабер, штангенциркуль ЩЦ-1, а также комплект сборочного инструмента.

Операция 35 выполняется на зарезонансном балансировочном станке с ленточным соединением.

1. Повторить переходы 1 ... 6 операции 20.

2. Установить переключатель плоскостей измерения в положение измерения главного момента дисбалансов. Записать показания индикатора дисбаланса (число делений) в рабочий блокнот.

3. Затормозить опоры станка. Выключить привод станка.

4. Вычислить значение главного момента остаточных дисбалансов по формуле:

$$M_{D_{ост}} = \text{число делений} \times \text{цена деления}.$$

Если $M_{D_{ост}} < 640 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$, то перейти к следующему переходу. В противном случае повторить операции 20 ... 35.

5. Разделить окружность маховика на 8 равных частей нанесением меловых меток.

6. Отвесить пластилиновый груз массой 0,75 г.

7. Прикрепить груз массой 0,75 г на правом торце маховика на радиусе 188 мм в точке 1.

8. Повторить переходы 6 ... 8 операции 20 для каждого из восьми положений груза массой 0,75 г.

9. Рассчитать значение главного вектора остаточных дисбалансов маховика по формуле

$$D_{ст\ ост} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \cdot 141 \text{ (г} \cdot \text{мм}),$$

где A_{\max} , A_{\min} — соответственно максимальное и минимальное показание индикатора дисбаланса.

Сравнить полученное значение $D_{ст\ ост}$ с допустимым. Если $D_{ст\ ост} < D_{ст\ доп}$, то балансировка выполнена правильно. В противном случае повторить операцию 25, 30, 35.

10. Значения остаточных дисбалансов занести в технологический паспорт балансировки.

11. Снять балансируемый узел со станка и установить на поворотное установочное приспособление.

12. Снять шкив с вала отбалансированного узла.

13. Повторить переходы 3 ... 5 операции 05.

14. Снять балансируемый узел с поворотного установочно-

го приспособления и уложить в ящик для транспортировки.

В операции 35 используются приспособления и инструменты операций 05, 15, 20.

9.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НИЗКОЧАСТОТНОЙ МНОГОПЛОСКОСТНОЙ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Технические требования.

Ротор центробежного насоса (рис. 9.4) балансировать динамически на низкой частоте вращения в собственных подшипниках.

Допустимое значение главного вектора остаточных дисбалансов — 100 г·мм. Допустимое значение главного момента остаточных дисбалансов — 3500 г·мм².

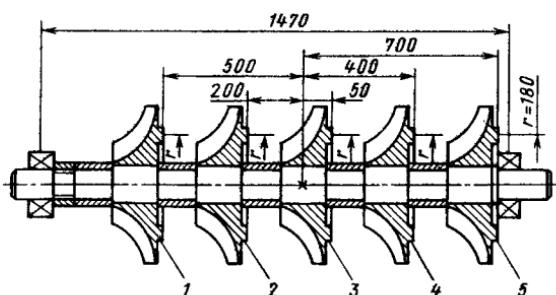


Рис. 9.4. Ротор центробежного насоса

Корректировку масс выполнять в 1 ... 5-й плоскостях съемом металла с задней стенки центробежного колеса по кольцу шириной 20 мм, глубиной не более 4 мм. Места съема металла заполировать.

Расчет корректирующих масс в 1 ... 5-й плоскостях производить по технологической инструкции на балансировку ротора центробежного насоса.

Наименование и содержание операций.

05. Входной контроль ротора.

10. Подготовка балансировочного станка.

15. Определение значений и углов главного вектора и главного момента начальных дисбалансов ротора.

20. Расчет начальных дисбалансов в 1 ... 5-й плоскостях измерения.

25. Контроль точности расчета начальных дисбалансов в 1 ... 5-й плоскостях измерения.

30. Расчет корректирующих масс в 1 ... 5-й плоскостях.

35. Корректировка масс ротора в 3-й плоскости.

40. Контроль точности корректировки масс в 3-й плоскости.

45. Корректировка масс ротора во 2-й плоскости.

50. Контроль точности корректировки масс во 2-й плоскости.

55. Корректировка масс ротора в 4-й плоскости.

60. Контроль точности корректировки масс в 4-й плоскости.

65. Корректировка масс ротора в 1-й плоскости.

70. Контроль точности корректировки масс в 1-й плоскости.

75. Корректировка масс ротора в 5-й плоскости.

80. Контроль остаточных дисбалансов.

Содержание переходов

Операция 05 выполняется на транспортной тележке.

1. Проверить комплектность и правильность оформления сопроводительной документации на ротор.

2. Провести внешний осмотр ротора и подшипников. Коррозия, забоины, царапины, вмятины и другие механические повреждения не допускаются. Подшипники должны вращаться плавно без заедания.

Операция 10 выполняется на балансировочном станке с ленточным соединением.

1. Проверить внешним осмотром отсутствие механических повреждений станины, балансировочного и приводного устройства, измерительного пульта и электрокабелей станка.

2. Протереть салфеткой, смоченной обезжирающей жидкостью, установочные поверхности опор станка, вкладыши, шкив, направляющие ролики, ленточный ремень.

3. Установить и закрепить на опорах станка вкладыши, а на валу электродвигателя — шкив.

4. Проверить плавность перемещения опор балансировочного устройства. Перемещения должны быть свободными без заеданий.

5. Проверить положение органов управления измерительным пультом по карте настройки пульта станка.

6. Подготовить к работе микрокалькуляторы, введя прикладные программы расчетов дисбалансов в 1 ... 5-й плоскостях.

7. Включить питание измерительного пульта станка.

В операции 10 используются два микрокалькулятора, шкив, вкладыши, а также комплект сборочного инструмента.

Операция 15 выполняется на балансировочном станке с ленточным соединением.

1. Закрепить на роторе приспособление для подъема.

2. Снять вал с транспортной тележки и установить его на опоры станка, предварительно накинув на ротор ремень, закрепить подшипники.

3. Снять с вала приспособление для подъема и отвести электротельфер в сторону.

4. Протереть поверхность ротора под ремень салфеткой, смоченной обезжирающей жидкостью, надеть ремень. Натянуть

нуть ремень и установить натяжные ролики так, чтобы ветви ремня были вертикальны и лежали в одной плоскости.

5. Смазать подшипники ротора маслом (2 ... 3 г).
6. Нанести на левом торце ротора меловую метку.
7. Отрегулировать положение стробоскопа, установив его против левого торца ротора.

8. Закрыть балансируемый ротор защитным кожухом.

9. Произвести два, три кратковременных пуска ротора. Убедиться в надежности крепления подвижных и врачающихся частей и правильности установки балансируемого ротора.

10. Включить привод станка, выждать несколько минут до достижения ротором устойчивой балансировочной частоты вращения. Раствормозить опоры станка.

11. Установить переключатель плоскостей измерения в положение измерения главного вектора дисбалансов. Записать показания индикатора дисбаланса (число делений) в рабочий блокнот. Установить переключатель "Значение — Угол" в положение "Угол" и сделать отметку углового положения главного вектора дисбалансов.

12. Повторить переход 11 для другой плоскости измерения, в которой измеряется главный момент дисбалансов.

13. Затормозить опоры станка. Выключить привод станка.

14. Вычислить значение главного вектора и главного момента начальных дисбалансов по формулам:

$$D_{ст\ нач} = \text{число делений} \times \text{цена деления по главному вектору}.$$

$$M_D \text{ нач} = \text{число делений} \times \text{цена деления по главному моменту}.$$

Результаты расчета занести в рабочий блокнот.

В операции 15 используются приспособление для подъема и комплект сборочного инструмента.

Операция 20 выполняется с помощью микрокалькулятора.

1. Согласно технологической инструкции на балансировку ротора центробежного насоса по прикладной номограмме рассчитать значения и углы дисбалансов в 1 ... 5-й плоскостях.

2. Рассчитать значения неуравновешенных масс для каждой из пяти плоскостей по формуле

$$m_i = D_i / r_i, i = 1, 2, 3, 4, 5,$$

где D_i — дисбаланс в i -плоскости, полученный в результате расчета в 1-м переходе; r_i — радиус коррекции в i -й плоскости.

3. Отвесить пластилиновые грузы массой m_i .

В операции 20 используются аналитические весы.

Операция 25 выполняется на балансировочном станке с ленточным соединением.

1. Открыть защитный кожух.

2. Прикрепить в 1 ... 5-й плоскостях соответствующие плас-

тилиновые грузы под углом к метке, нанесенной на левом торце ротора, рассчитанным в 1-м переходе, на радиусе r_i .

3. Закрыть защитный кожух.

4. Повторить переходы 10 ... 14 операции 15. Если остаточные дисбалансы получатся меньше допустимых дисбалансов, то перейти к выполнению следующей операции. В противном случае повторить переходы 10 ... 14 операции 15 и операции 20, 25.

Операция 30 выполняется с помощью номограмм.

1. Согласно технологической инструкции на балансировку ротора центробежного насоса по номограммам определить центральные углы, в пределах которых необходимо произвести съем металла с кругового кольца для каждой из пяти плоскостей коррекции.

2. Занести результаты в рабочий блокнот.

Операция 35 выполняется в приспособлении для установки ротора с помощью шлифовальной пневматической машинки.

1. Открыть защитный кожух.

2. Закрепить на роторе приспособление для подъема.

3. Снять со станка, установить его на транспортную тележку. Надеть на подшипники защитные чехлы.

4. Отвести тележку с ротором в зону, где производится съем металла.

5. Разметить место съема металла в 3-й плоскости. Снять пластилиновый груз в 3-й плоскости.

6. Произвести съем металла по разметке, заполировать место съема металла. Очистить ротор от опилок.

7. Отвести тележку с ротором на балансировочный участок.

В операции 35 используются приспособления — для подъема ротора, транспортная тележка, защитные чехлы; инструменты для разметки, шлифовальный и полировальный круги, комплект сборочного инструмента.

Операция 40 выполняется на балансировочном станке с ленточным соединением.

Повторить переходы 2 ... 14 операции 15.

Если значения остаточных дисбалансов меньше допустимых, то перейти к следующей операции. В противном случае произвести балансировку ротора постановкой пластилинового груза только в 3-й плоскости, после чего повторить операции 30 и 35 для этой плоскости.

Операции 45, 55, 65, 75 повторяют операцию 35 соответственно для 2, 4, 1 и 5-й плоскостей коррекции.

Операции 50, 60, 70 повторяют операцию 40 соответственно для 2, 4, 1-й плоскостей коррекции.

Операция 80 выполняется на балансировочном станке с ленточным соединением.

1. Повторить переходы 1 ... 13 операции 14, открыть защитный кожух.

2. В 3-й плоскости на радиусе 200 мм прикрепить неуравновешенную массу пластилина в 1 г. Закрыть защитный кожух.

3. Повторить переходы 10 ... 13 операции 15. Открыть защитный кожух, снять неуравновешенную массу пластилина в 3-й плоскости.

4. В 1- и 5-й плоскости прикрепить под углом 180° неуравновешенные массы пластилина в 0,5 г на радиусе 200 мм. Закрыть защитный кожух.

5. Повторить переход 3, после чего снять обе массы.

6. Вычислить главный вектор остаточных дисбалансов.

7. Вычислить главный момент остаточных дисбалансов.

Значения остаточных дисбалансов не должны превышать допустимые значения, указанные в технических требованиях. В противном случае произвести балансировку постановкой пластилинового груза только в 5-й плоскости, после чего повторить операции 30, 35 для этой плоскости и повторить операцию 80.

8. Закрепить на роторе приспособление для подъема. Снять ротор со станка и установить на транспортную тележку.

9. Заполнить технологический паспорт на балансировку.

9.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРА ТУРБОАГРЕГАТА НА МЕСТЕ УСТАНОВКИ

Технические требования на балансировку устанавливаются специальной инструкцией, в которой приводятся необходимые сведения для расчета корректирующих масс и программы расчетов для ЭВМ. Требования уточняются на первом этапе балансировки — вибрационном обследовании турбоустановки. В процессе обследования выявляется влияние крутящего момента, магнитного поля генератора, тепловой нестабильности ротора генератора, температурной расцентровки установки.

Приводятся значения коэффициентов чувствительности и неуравновешенность по формам изгиба ротора.

Наименование и содержание операций.

05. Подготовка агрегата к балансировке.

10. Подготовка балансировочного комплекта к работе.

15. Начальный пуск агрегата.

20. Пуск с пробными грузами.

25. Расчет корректирующих масс.

30. Пуск агрегата с корректирующими массами.

35. Корректировка результатов расчета.

Содержание переходов

Операция 05

1. Вскрыть торцовые крышки с обеих сторон ротора.
2. Разметить плоскости коррекции, разделив окружности на равные части в направлении, противоположном направлению вращения ротора.

3. Измерить радиусы коррекции, расстояния от плоскостей коррекции до подшипников, длину ротора.

4. Сделать эскизы установки корректирующих масс, находящихся в плоскостях коррекции. При большом числе балансировочных грузов заменить их одним грузом, масса которого находится расчетным способом.

5. Сделать эскиз паза для установки балансировочных грузов. Изготовить новые балансировочные грузы.

6. Забелить тонким слоем разведенного мела гладкие участки поверхностей вала с обеих сторон.

Операция 10.

1. Установить на столе балансировочный комплект.

2. Проложить электрокабель питания и заземляющий провод. Подключить питание к балансировочному комплекту.

3. Закрепить на крышках опорных подшипников турбоагрегата вибропреобразователи в указанных местах.

4. Установить датчик измерения фазы с торцовой стороны ротора, совместив метку, нанесенную на роторе (шкалу), с разметкой плоскостей коррекции.

Операция 15.

1. Произвести пуск агрегата с исходной неуравновешенностью.

2. Измерить значения и углы колебаний подшипниковых опор на рабочей частоте вращения ротора и вблизи критических скоростей.

3. Результаты измерений занести в технологический паспорт.

4. Определить угол максимального бieniaия ротора ("высокую" точку) при прохождении критических скоростей с каждой стороны ротора путем нанесения рисок чертилкой на забеленных поверхностях.

5. Определить "высокую" точку на рабочей частоте вращения. Углы максимального бieniaия ротора, определенные в 4-м и 5-м переходах, должны совпадать с углами, определенными балансировочным комплектом, согласно инструкции по его эксплуатации.

6. Остановить агрегат.

7. Найти плоскость расположения неуравновешенности по 1-й форме изгиба ротора, отложив от "высокой" точки на 1-й критической скорости по направлению вращения ротора угол 90° . Полученный угол указывает место установки пробных грузов по 1-й форме изгиба.

8. Рассчитать массы пробных грузов по формуле

$$m_{\text{пр}} = (U_A + U_B)/2 \alpha_1,$$

где U_A , U_B — амплитуды вибраций подшипников A , B в вертикальном направлении; α_1 — коэффициент чувствительности ротора к симметричным составляющим вибраций. Изготовить два одинаковых пробных груза массой $m_{\text{пр}}$.

9. Установить пробные грузы в плоскостях коррекции под углом, определенным в переходе 7.

Операция 20.

1. Произвести пуск агрегата с двумя одинаковыми пробными грузами.

2. Повторить переходы 2 ... 6 операции 15. Пуск с пробными грузами должен привести к снижению вибраций. В противном случае повторить операцию 15.

3. Снять пробные грузы.

Операция 25.

1. Рассчитать корректирующие массы для уменьшения неуравновешенности по 1-й форме изгиба согласно технологической инструкции по балансировке турбоагрегата.

2. Изготовить балансировочные грузы, рассчитанные в переходе 1.

3. Установить в плоскостях коррекции ротора балансировочные грузы под углом φ_1 , отсчет которого ведется от угла установки пробных грузов в направлении изменения сдвига фазы вибраций. При использовании стробоскопа для измерения фазы отсчет вести в противоположном направлении.

Операция 30.

1. Произвести пуск агрегата с корректирующими массами.

2. Повторить переходы 2 ... 6 операции 15.

3. Сравнить полученные уровни вибраций агрегата с допустимыми значениями. Если не произошло достаточного снижения вибраций, то произвести корректировку результатов расчета.

Операция 35.

1. Повторить операции 20, 25, 30, приняв за начальный пуск агрегата операцию 30, и так далее до допустимых значений вибраций.

2. По окончании балансировки ротора установленные в плоскости коррекции балансировочные грузы заменить одним грузом.

Пример балансировки ротора генератора ТВ2-100-2 (табл. 9.1)

Технические требования.

Ротор генератора балансировать на месте установки на рабочей частоте вращения 50 с⁻¹ по вертикальным составляющим вибраций.

Ротор имеет неуравновешенность по 1-й форме изгиба. Коэффициент чувствительности ротора к симметричным составляющим вибраций равен 25 мкм/кг, к кососимметричным составляющим — 50 мкм/кг.

Допустимые амплитуды вибраций подшипниковых опор на рабочей частоте вращения 5 мм/с.

Таблица 9.1

Технологический паспорт балансировки
ротора генератора ТВ2-100-2

Наименование операции	Вибрации подшипников			
	Подшипник А		Подшипник В	
	Значение, мкм	Угол, °	Значение, мкм	Угол, °
Начальный пуск агрегата	108	192	56	235
Пуск с пробными грузами ($m_1 = m_2 = 1,45$ кг; $\varphi_1 = \varphi_2 = 101^\circ$)	61	186	27	291
Пуск агрегата с кор- ректирующими массами ($m_1 = m_2 = 2,4$ кг; $\varphi_1 = \varphi_2 = 106^\circ$)	30	164	35	11
Пуск с пробными гру- зами ($m_1 = m_2 =$ $= 0,6$ кг; $\varphi_1 = -\varphi_2 = 176^\circ$)	12	177	8	151

Остаточные значения виброскоростей подшипника А — 3,8 мм/с; под-
шипника В — 2,5 мм/с.

Заключение. Вибрации подшипников генератора ТВ2-100-2 соответствуют техническим требованиям.

Приведенные примеры не исчерпывают всего многообразия балансировочных задач, но служат ориентиром для разработки единичных рабочих технологических процессов балансировки конкретных изделий.



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рабочим машиностроительных предприятий, осваивающим профессию "Балансировщик деталей и узлов", при индивидуальном обучении авторы рекомендуют изучать материал по специальной программе, которая приведена ниже. Наименования разделов программы соответствуют главам книги. Помимо теоретического курса, программой предусматриваются практические занятия, а также просмотр учебных фильмов: "Статистическая балансировка", "Динамическая балансировка", "Балансировка гибких роторов", "Динамика механизмов".

Ниже в почасовой сетке приведены объемы теоретических и практических занятий.

Число часов, отводимых на изучение раз- делов:	Номера разделов программ									Всего часов
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
теория	6	4	4	3	5	4	4	2	8	40
практика	—	4	4	2	4	4	2	—	12	32

Основой для практических занятий является техническое описание и инструкция по эксплуатации балансировочного станка, технология балансировки деталей и узлов изделий предприятия.

При повышении квалификации наряду с углубленным изучением материала книги рекомендуем самостоятельно выполнить приведенные ниже упражнения и лабораторные работы.

Упражнение 1. Тормозной барабан массой 25 кг вращается с частотой 2000 об/мин. Найдите значение главного вектора допустимых дисбалансов барабана пренебрегая при расчете технологическими и эксплуатационными дисбалансами.

Ответ: $D_{ст\ доп\ верхн} = 5000 \text{ г}\cdot\text{мм}$, $D_{ст\ доп\ нижн} = 1875 \text{ г}\cdot\text{мм}$.

Упражнение 2. Верхнее значение главного вектора допустимых дисбалансов ротора электродвигателя равно 8000 г·мм. Расстояние от опоры А до центра масс 300 мм, до первой плоскости коррекции — 100 мм, до второй плоскости коррекции

700 мм. Найдите верхние значения допустимых дисбалансов в плоскостях коррекции.

Ответ: $D_{1\text{ доп верхн}} = 5333 \text{ г} \cdot \text{мм}$, $D_{2\text{ доп верхн}} = 2666 \text{ г} \cdot \text{мм}$.

Упражнение 3. При первом пуске неуравновешенного ротора индикатор значения дисбаланса показывал 60 дел., а индикатор угла дисбаланса — угол 60° относительно метки. При втором пуске этого ротора с пробной массой 10 г, установленной на радиусе 75 мм напротив метки, индикаторы показывали 30 дел. и 120° . Найдите графическим способом значение и угол начального дисбаланса в плоскости измерения.

Ответ: $D_{\text{нач}} = 849 \text{ г} \cdot \text{мм}$, $\varphi_{\text{нач}} = 30^\circ$.

Упражнение 4. Значения начального дисбаланса трехплоскостного вентилятора равно $1200 \text{ г} \cdot \text{мм}$, угол дисбаланса отсчитанный от середины первой лопасти равен 80° . Найдите корректирующие массы, которые необходимо установить на лопастях вентилятора на радиусе 100 мм.

Ответ: $m_{K1} = 4,37 \text{ г}$, $m_{K2} = 12,77 \text{ г}$.

Упражнение 5. При контроле остаточного дисбаланса методом кругового обхода контрольным грузом массой 2,5 г по радиусу 120 мм получены следующие показания индикатора значения дисбаланса в плоскости коррекции:

Угол дисбаланса	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Показания индикатора значения дисбаланса дел.	50	62	75	63	51	41	26	40

Найдите остаточный дисбаланс в плоскости коррекции.

Ответ: $D_{\text{ост}} = 147 \text{ г} \cdot \text{мм}$.

Упражнение 6. Ротор уравновешен в первой плоскости измерения грузом массой 10 г, прикрепленным на радиусе 75 мм под углом 40° , а во второй плоскости массой 15 г, прикрепленным на радиусе 100 мм под углом 135° . Расстояние от центра масс до плоскостей измерения соответственно равно 300 и 450 мм. Найдите главный вектор и главный момент начальных дисбалансов ротора.

Ответ: $D_{\text{ст нач}} = 1618 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$, $\varphi_{\text{ст}} = 107,5^\circ$

$M_{D \text{ нач}} = 585560 \text{ г} \cdot \text{мм}^2$, $\varphi_M = 80^\circ$.

Упражнение 7. Начальные дисбалансы в плоскости коррекции первых 7 роторов из партии составили 940, 1220, 585, 1040, 875, 1130, 1210 $\text{г} \cdot \text{мм}$. Какое значение начальных дисбалансов следует принять для всей партии роторов с достоверностью 0,95.

Ответ: $D_{\text{нач}} = 1000 \pm 208 \text{ г} \cdot \text{мм}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Определение остаточного дисбаланса в плоскости коррекции

Цель работы: экспериментальное определение остаточного дисбаланса в плоскости коррекции различными методами.

Средства и сопутствующий: балансировочный станок, контрольный ротор, контрольные грузы, весы, воск.

Порядок выполнения работы. 1. Подготовьте балансировочный станок и контрольный ротор к работе согласно инструкции по эксплуатации.

2. В плоскости коррекции контрольного ротора прикрепите в произвольном месте восковой груз, массу которого вычислите по формуле: $m = 2m_{\text{пот}}/r_k$, где $m_{\text{пот}}$ — масса контрольного ротора в кг; r_k — радиус в плоскости коррекции в мм; m — масса груза в г.

3. Определите остаточную неуравновешенную массу в плоскости коррекции ротора по показаниям индикатора дисбаланса станка.

4. Определите остаточную неуравновешенную массу в плоскости коррекции ротора с помощью контрольного груза.

5. Определите остаточную неуравновешенную массу в плоскости коррекции ротора круговым обходом контрольного груза.

Причина: Измерения по п. 3—5 повторять не менее 5 раз; вычислить средние значения остаточной неуравновешенности для каждого метода контроля.

6. Сравните полученные результаты с массой воскового груза, сделайте вывод о точности и трудоемкости исследованных методов контроля остаточного дисбаланса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Одноплоскостная балансировка

Цель работы: экспериментальное исследование методов одноплоскостной балансировки.

Средства и сопутствующий: балансировочный станок, контрольный ротор, контрольные грузы, весы, воск, программируемый микрокалькулятор.

Порядок выполнения работы. 1. Подготовьте балансировочный станок и контрольный ротор к работе согласно инструкции по эксплуатации.

2. В левой плоскости коррекции контрольного ротора прикрепите в произвольном месте восковой груз, масса которого в 25 раз больше остаточной неуравновешенной массы ротора в этой плоскости. Органы управления пульта станка, используемые для исключения влияния плоскостей коррекции, приведите в исходное состояние для настройки.

3. Определите начальный дисбаланс в левой плоскости методом амплитуд. Вычислите и отвесьте восковую корректирующую массу. Проведите корректировку масс. Определите остаточный дисбаланс по показаниям индикатора станка.

4. Определите начальный дисбаланс в левой плоскости способом трех пусков. Вычислите по прикладной программе 3.1. (см. с. 74) и отвесьте восковую корректирующую массу. Проведите корректировку масс. Определите остаточный дисбаланс по показаниям индикатора станка.

5. Определите начальный дисбаланс в левой плоскости методом амплитуд и фаз. Вычислите графически и отвесьте восковую корректирующую массу. Проведите корректировку масс. Определите остаточный дисбаланс по показаниям индикатора станка.

П р и м е ч а н и я: Работы по п. 4 и 5 выполнять после приведения органов управления пульта станка и контрольного ротора в исходное состояние согласно п. 2.

Остаточные дисбалансы по п. 3, 4, 5 определять на полностью настроенном станке, т.е. органы управления пультом должны находиться в положении указанном в карте настройки станка на балансировку контрольного ротора. Значения начальных и остаточных дисбалансов записывать в блокнот.

6. Вычислите коэффициенты уменьшения дисбаланса для каждого исследуемого метода. Сделайте вывод о точности и трудоемкости методов одноплоскостной балансировки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Разделение плоскостей коррекции

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментальное исследование способов разделения плоскостей коррекции.

С р е д с т в а и с с л е д о в а н и й: балансировочный станок, контрольный ротор, весы, воск.

Порядок выполнения работы. 1. Подготовьте балансировочный станок и контрольный ротор к работе согласно инструкции по эксплуатации.

2. Органы управления пульта станка, используемые для исключения влияния плоскостей коррекции, приведите в исходное состояние для настройки. Изготовьте два восковых груза массой в 25 раз больше остаточной неуравновешенной массы контрольного ротора.

3. Пять раз разделите плоскости коррекции для двух плоскостной балансировки. Каждый раз, изменяя положение этих плоскостей по длине ротора таким образом, чтобы расстояние между крайними плоскостями коррекции относилось к текущему расстоянию между плоскостями как 1 : 5 : 10 : 15 : 20.

4. Вычислите коэффициенты уменьшения взаимного влияния плоскостей коррекции для пяти положений плоскостей на

роторе. Постройте графическую зависимость полученных коэффициентов от отношения расстояний. Определите область применения исследованного способа разделения плоскостей коррекции.

5. Разделите плоскости для статико-моментной балансировки. Вычислите коэффициенты уменьшения взаимного влияния.

6. Сравните исследованные способы настройки и определите области их применения.

Для дальнейшего повышения профессионального уровня рекомендуем Вам освоить необходимые разделы монографии: "Основы балансировочной техники": Т.1,2. Под ред. д-ра техн. наук проф. В.А. Щепетильникова. М.: "Машиностроение", 1975 г.

СПИСОК НОРМАТИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ ПО БАЛАНСИРОВКЕ РОТОРОВ

1. ISO* 1940. Качество балансировки вращающихся жестких тел (1973).
2. ISO 1925. Терминология балансировки (1974 г.).
3. ISO 2953. Балансировочные машины — описание и оценка (1975 г.).
4. ISO 5406. Балансировка гибких роторов (1980 г.).

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ СОЮЗА ССР ПО БАЛАНСИРОВКЕ РОТОРОВ

1. ГОСТ 19534—74. Балансировка вращающихся тел. Термины.
2. ГОСТ 20075—74. Станки балансировочные. Основные параметры и размеры.
3. ГОСТ 20076—74. Станки балансировочные. Нормы точности.
4. ГОСТ 22061—76. Система классов точности балансировки. Основные положения.
5. ГОСТ 12327—79. Машины электрические вращающиеся. Остаточные дисбалансы роторов. Нормы и методы измерений.
6. ГОСТ 24346—80. Вибрация. Термины и определения.
7. ГОСТ 25466—82. Вибрация. Роторы гибкие паротурбинных агрегатов. Требования к балансировке.

*Международная организация по стандартизации.

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

**Михаил Ефимович Левит
Валентин Михайлович Рыженков**

БАЛАНСИРОВКА ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ

Редактор Л.П. С т р о г а н о в

Художественный редактор С.С. В о д ч и ц

Переглед художника А.Я. М и х а и л о в а

Технический редактор И.В. В ы г л о в с к а я

Корректоры Л.Н. Г о р л о в а, Л.И. Д о в ж а н с к а я

ИБ 4795

Сдано в набор 19.12.85. Подписано в печать 6.11.86. Т-21646.
Формат 60х90 1/16. Бумага : тип. № 2. Гарнитура Сенчури.
Печать офсетная. Усл.печ. л. 15,5. Усл. кр.-отт. 15,5. Уч.-изд. л. 15,9.
Тираж 12 500 экз. Заказ 2219 Цена 1 р. 10 к.

**Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Машиностроение"
107076, Москва, Строгинский пер., 4.**

**Отпечатано в Московской типографии № 4 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
129041, Москва, Б. Переяславская, 46.
с оригинал-макета, изготовленного в издательстве "Машиностроение"
на наборно-пишущих машинах**