

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени С. П. КОРОЛЕВА

А. С. ГОРЯЧЕВ

БАЛАНСИРОВКА
АГРЕГАТОВ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ

Учебное пособие

Горячев А. С. Балансировка агрегатов летательных аппаратов; Учебное пособие. — Куйбышев: КуАИ, 1982 г. — 70 с

В пособии рассмотрены методы и средства статической и динамической балансировки агрегатов летательных аппаратов и дана их классификация. Обобщен опыт производства по технологическим процессам определения положения центра масс и инерционных характеристик агрегатов летательных аппаратов и приведены данные по конструкции балансировочных стендов и расчетам погрешностей измерений.

Пособие предназначено для студентов самолетостроительного факультета специальностей 0535, 0539, 0543, а также может быть полезно для инженерно-технических работников авиационной промышленности.

Темплан 1982 г., поз. 73

Под редакцией Ф. И. Китаева

Рассмотрено и утверждено редакционно-издательским советом института 13.11.1980 г.

В в е д е н и е

Как известно из теоретической механики, центр масс тела определяется как центр системы параллельных векторов, направленных в одну сторону и пропорциональных массам частиц.

Полет летательного аппарата состоит из движения центра масс его и ориентации относительно траектории этого движения, т. е. стабилизации.

Основной задачей повышения точности полета летательного аппарата является повышение точности движения центра масс, а также повышение точности стабилизации и сокращение времени ориентации изделия.

Движение центра масс летательного аппарата осуществляется за счет работы основного двигателя, вектор тяги которого должен проходить через центр масс летательного аппарата. В случае несовпадения вектора тяги и центра масс изделия будет возникать возмущающий момент, для ликвидации которого потребуется затратить определенное количество энергии. Это приведет к дополнительному расходу рабочего тела, который может быть недопустимо большим при отклонении центра масс летательного аппарата относительно конструктивных осей больше допустимого по расчету. При этом ухудшается и управляемость летательным аппаратом, так как момент сил управляющих двигателей или органов управления будет изменяться за счет возмущающего момента основного двигателя.

Ориентация летательного аппарата осуществляется с помощью управляющих двигателей или других органов управления, создающих момент сил относительно главных центральных осей инерции летательного аппарата. Для определения величины управляющего импульса необходимо с максимальной точностью знать положение главных центральных осей инерции летательного аппарата отно-

сительно его конструктивных осей, а также инерциальные характеристики летательного аппарата (центробежные моменты).

Поэтому производство летательных аппаратов в настоящее время требует повышения точности размещения масс изделий, что необходимо для получения лучших технических (устойчивость и управляемость в полете) и экономических (уменьшение веса, снижение расхода топлива и т. п.) характеристик изделий.

Это, в свою очередь, приводит к необходимости измерения характеристик размещения масс изделий, т. е. определения положения центра масс, измерения осевых и центральных моментов инерции и определения положения главных центральных осей изделия.

Для замера указанных параметров в производстве нашли распространение процессы статической и динамической балансировки. На рис. 1 представлена условная классификация основных методов и разновидностей балансировки, применяемых при изготовлении летательных аппаратов.

При определении действительного положения центра масс или статической балансировке применяется, в основном, весовой ме-

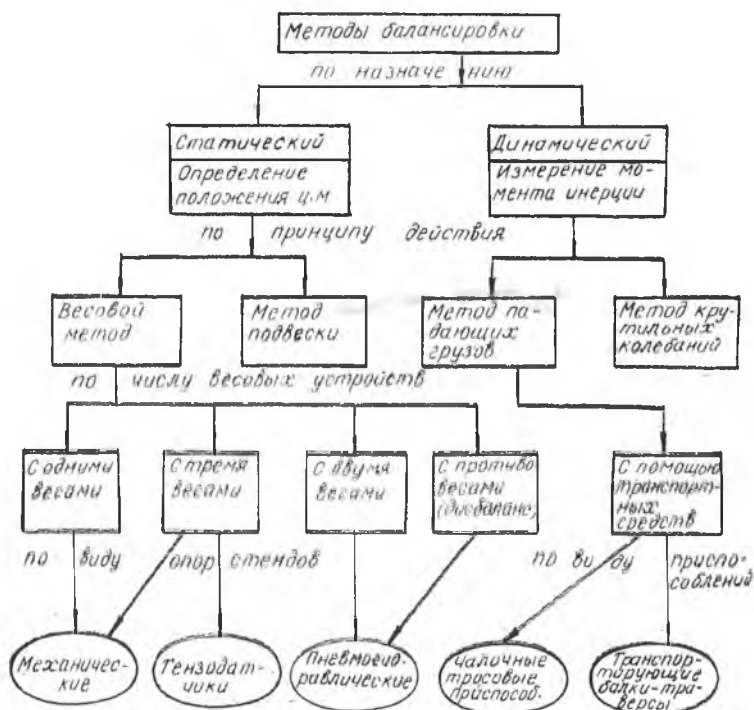


Рис. 1. Классификация методов балансировки

тод, а при измерении моментов инерции — метод падающих грузов, а также метод крутильных колебаний (сохранение терминов «весовой метод» и «центр масс» не является противоречивым. Подобно тому, как фактическое значение массы определяется путем взвешивания) [4].

Процессы балансировки и измерения вышеуказанных параметров проводятся на специальном оборудовании, балансировочных и измерительных стендов. Принцип работы и конструкция стендов зависят от размеров и массы проверяемых изделий, а также от требуемой точности измерения.

В данном пособии рассмотрены процессы балансировки на стендах, наиболее широко применяемых в производстве летательных аппаратов. Вначале рассмотрены процессы, связанные с определением центра масс изделия, а в конце — процессы измерения моментов инерции. Для наиболее характерных способов балансировки приведены конструкции стендов и дан расчет точности измерений.

1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИЙ (статическая балансировка)

Статическая балансировка изделий сводится к определению положения центра масс изделий относительно основных геометрических осей (продольной и поперечных) и обеспечению допустимого смещения его от теоретического.

Координаты центра масс изделия определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 X_{цм} &= \frac{\sum_{k=1}^n G_k x_k}{\sum_{k=1}^n G_k} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k x_k}{G}; \\
 Y_{цм} &= \frac{\sum_{k=1}^n G_k y_k}{\sum_{k=1}^n G_k} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k y_k}{G}; \\
 Z_{цм} &= \frac{\sum_{k=1}^n G_k z_k}{\sum_{k=1}^n G_k} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k z_k}{G},
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где $X_{цм}$, $Y_{цм}$, $Z_{цм}$ — координаты центра масс изделия;
 G_k — масса произвольного элемента изделия;
 x_k , y_k , z_k — координаты произвольного элемента относительно конструкторских осей;

$\sum_{k=1}^n G_k = G$ — масса изделия (летательного аппарата).

Допустимая величина смещения центра масс зависит от массы изделия. Например, по данным статистики для изделий массой

$G \leq 1 \cdot 10^3$ кг допуск на смещение центра масс должен находиться в круге $r = 0,5 \dots 5$ мм. Для изделий массой $(1 \div 5) \cdot 10^3$ кг допуск $r = 5 \dots 10$ мм, а для изделий массой свыше $5 \cdot 10^3$ кг допуск $r = 15 \dots 20$ мм.

Точность балансировки должна быть не более 20...30% допуска.

Для определения положения центра масс применяются разнообразные конструкции весовых стенов, отличающихся количеством используемых весов-опор (с одними, двумя и тремя весами), а также по виду шарнирных опор (механические, гидравлические и т. д., см. рис. 1).

Кроме того, на отдельных стендах можно производить замер положения центра масс изделия только вдоль продольной оси или только в плоскости, перпендикулярной продольной оси, или сразу по трем координатам [3].

Начнем рассмотрение процесса определения центра масс изделия на стендах с одними весами.

1.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ПО ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ИЗДЕЛИЯ НА ОДНОВЕСОВОМ СТЕНДЕ

Одновесовые стенды в основном применяются для балансировки малогабаритных агрегатов изделий.

На рис. 2 показана схема стенда для определения центра масс (ЦМ) вдоль продольной оси изделия 3. В этом стенде использо-

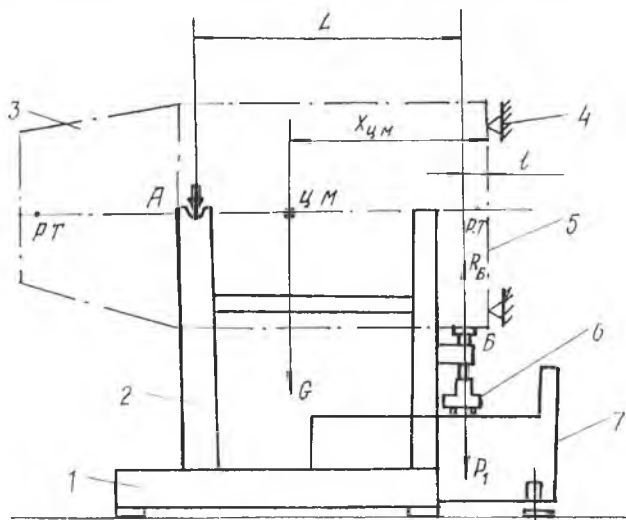


Рис. 2. Схема балансирующего стенда с одним весами

ван принцип замера величины реакции от массы изделия на опору Б, расположенную на весах. Другой опорой изделия являются жесткие призмы А. Расстояние между жесткой опорой А и регулируемой опорой Б на весах задается конструкцией стенда. Стенд состоит из основания 1, на котором имеются две призматические опоры А, установленные на стойках 2, и подвижная опора б, установленная на весах 7.

Порядок определения положения ЦМ на продольной оси изделия следующий. Вначале определяется реакция веса подвижной опоры. Изделие, предварительно взвешенное, устанавливается на опоры в горизонтальное положение по реперным точкам (РТ) с помощью нивелира. Для совмещения базы отсчета стенда с плоскостью разъема изделие торцом 5 должно касаться упоров 4. Расстояние от плоскости отсчета до подвижной опоры строго определенное и равно l . Затем замеряется величина реакции подвижной опоры R_B от суммарного воздействия массы подвижной опоры и частичной массы изделия. Величина реакции подвижной опоры от массы изделия будет равна $R_{изд} = R_B - R_1$.

Положение центра масс изделия относительно торца определяется из условия равновесия моментов действующих сил относительно опоры А по следующей формуле:

$$X_{цм} = L + l - \frac{L(R_B - R_1)}{G}, \quad (1.2)$$

где L — расстояние между опорами;

l — расстояние от плоскости отсчета до оси подвижной опоры;

R_B — величина реакции от массы подвижной опоры и частичной массы изделия;

R_1 — реакция опоры от массы подвижной опоры (P_1);

G — общая масса изделия.

При замерах положения центра масс необходимо знать погрешность метода. Для данного стенда на точность замера влияют точность горизонтальной установки базовой оси изделия, результаты взвешивания и параметры стенда. Пример расчета точности замера положения центра масс для аналогичных стендов будет рассмотрен ниже при изучении методов балансировки на стендах с двумя весами. Технологический процесс балансировки также будет рассмотрен на примере одного из применяемых методов.

1.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИЯ ПО ТРЕМ КООРДИНАТАМ НА ОДНОВЕСОВОМ ПОВОРОТНОМ СТЕНДЕ

Схема стенда показана на рис. 3. Стенд состоит из круглого основания 4 с рычагом 2, опирающимся одной точкой А на весы 1 и двумя опорами-призмами в неподвижных точках Б и В. Рас-

стояния между опорами заданы. В основание устанавливается поворотное кольцо *б*, на которое опирается измеряемое изделие *з*. Опоры в точках *Б* и *В* смещены относительно центра стэнда на величину *е*.

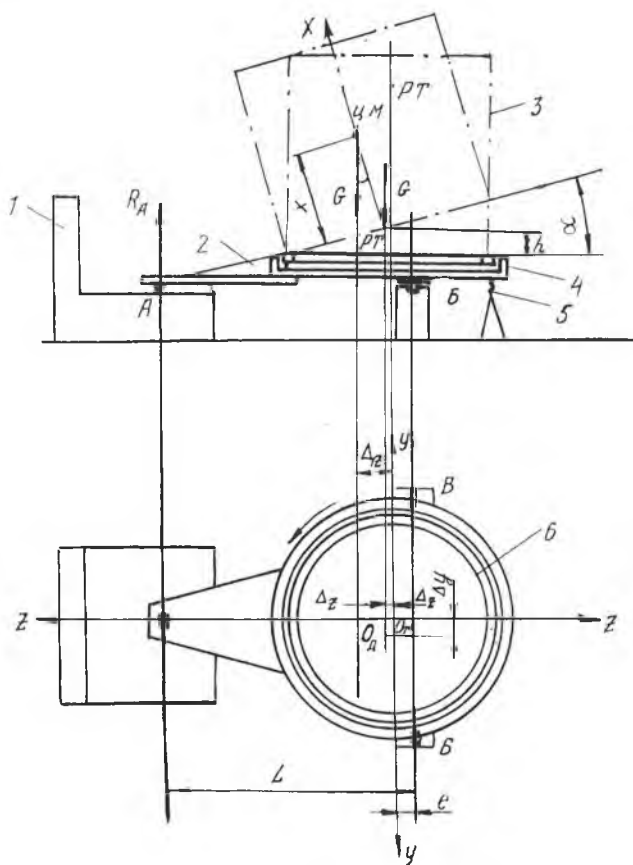


Рис. 3. Схема одновесового поворотного стэнда

Для определения смещения центра масс в плане необходимо предварительно взвешенное изделие установить на поворотное кольцо *4* вертикально по *РТ* с помощью теодолитов, при этом строительные оси его должны совместиться с осями отсчета стэнда *X—X* и *Y—Y*. Затем замеряется величина реакции $R_{\text{Изл}}$ на весовой опоре от действия массы изделия при первом положении изделия, когда одна ось изделия совпадает с осью стэнда, проходящей через геометрический центр основания и опору на весах,

Далее для расчета величин смещения центра масс в направлении, перпендикулярном первому, изделие поворачивается вместе с кольцом вокруг вертикальной оси на 90° до совпадения другой строительной оси его с базовой осью стенда. В этом втором положении также замеряется реакция от воздействия массы изделия $R_{II \text{ изд}}$.

Расчет координат центра масс ведется из условия равновесия моментов действующих сил относительно оси, проходящей через опоры в точках Б и В по следующим формулам:

$$\Delta Z = \frac{(R_z - R_{z \text{ пуст}}) L}{G_{\text{изд}}} - e; \quad (1.3)$$

$$\Delta Y = \frac{(R_y - R_{y \text{ пуст}}) L}{G_{\text{изд}}} - e,$$

где ΔZ — координата (смещение) центра масс в направлении $Z-Z$;

R_z — реакция стенда с изделием по оси $Z-Z$ изделия;

$R_{z \text{ пуст}}$ — реакция стенда по оси $Z-Z$;

L — расстояния между опорами А и Б (В) (задается конструктором);

$G_{\text{изд}}$ — масса изделия;

e — расстояние от оси изделия до опорных призм (задается конструктором);

ΔY — координата (смещение) центра масс в направлении $Y-Y$;

R_y — реакция стенда с изделием по оси $Y-Y$ изделия;

$R_{y \text{ пуст}}$ — реакция стенда по оси $Y-Y$.

На этом же стенде можно определить положение центра масс изделия и вдоль продольной оси. Для этого необходимо изделие отклонить от вертикального положения на угол α . Аналогично предыдущему расчету можно подсчитать координату центра масс в плане по одному из заданных направлений, например $\Delta_1 Z$, и замерить превышение центра базового шпангоута h относительно горизонтального положения.

Тогда положение центра масс изделия на продольной оси относительно базового шпангоута можно рассчитать по формуле

$$X = \frac{\Delta_1 Z}{\sin \alpha} - \frac{h}{\cos \alpha}. \quad (1.4)$$

Погрешность измерения положения центра масс определяется погрешностью взвешивания ΔG , ΔR и погрешностями геометрических размеров (ΔL , Δe), биением поворотного кольца, погрешностями установки изделия на столе стенда. Как показала практика процесса балансировки, общая погрешность составляет $\Delta e_{\text{общ}} = 0,8 \text{ мм}$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ
ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ
И БАЛАНСИРОВКА НА СТЕНДЕ
С ШАРНИРНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОПОРОЙ

Этот процесс осуществляется на балансировочных стендах с двумя рычажными весами и вертикальным расположением за-
меряемого изделия. Схема стенда показана на рис. 4:

Стенд состоит из платформы-основания 2 с переходником 4, опирающихся на три точки. Шарнирная точка опоры стенда 5 смещена относительно теоретической оси стенда на определенную величину «*b*». Двумя другими опорами служат рычажные весы 3, расположенные по направлению осей I—III и II—IV. Расстояния от шарнирной оси стенда $O_{ш}$ до точек опор на весы определяются размерами штанг *b* стенда и соответственно осям равны L_{I-III} и L_{II-IV} .

При условии точного выполнения стенда принимается, что реакции на весах от веса стенда одинаковы $R_{I ст} = R_{II ст}$ и ось стенда совпадает с теоретической осью изделия.

Определение смещения центра масс изделия относительно теоретической оси заключается в следующем. Замеряемое изделие 1, предварительно взвешенное, устанавливается вертикально на горизонтальной платформе, базируется по базовым стыковочным отверстиям фланцевого разъема и базовым отверстиям стенда с помощью классных болтов-фиксаторов, чтобы уменьшить погрешность смещения оси изделия относительно оси стенда при установке.

Затем замеряется величина реакций R_I и R_{II} на весах от массы изделия *G*, приложенной в действительном (O_d) центре изделия.

Величина смещения центра масс изделия ϵ определяется расчетным путем, исходя из условия равновесия действующих сил по направлениям осей I—III и II—IV:

$$\sum M_{O_{ш}}^{I-III} = 0; \quad \sum M_{O_{ш}}^{II-IV} = 0.$$

Вначале определим составляющую эксцентриситета ϵ_{I-III} в направлении I—III:

$$\sum M_{O_{ш}}^{I-III} = G_{изд} l_{I-III} - R_I L_{I-III} = 0.$$

Из этого уравнения находим последовательно:

$$l_{I-III} = \frac{R_I L_{I-III}}{G_{изд}}$$

и

$$\epsilon_{I-III} = l_{I-III} - b_{I-III} = \frac{R_I L_{I-III}}{G_{изд}} - b_{I-III};$$

(1.5)

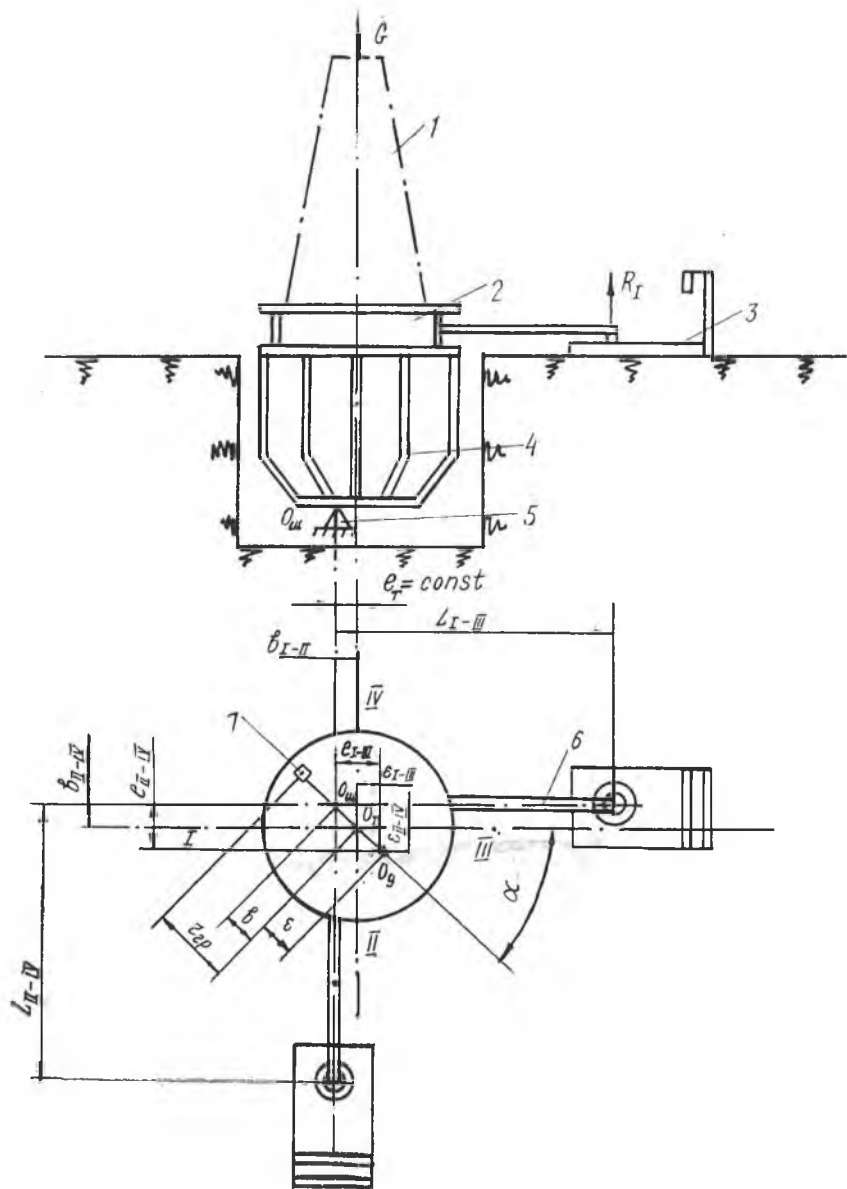


Рис. 4. Схема двухвесового балансирующего стэнда с механической шарнирной опорой: 1 — контролируемое изделие; 2 — платформа; 3 — весы рычажные; 4 — переходник; 5 — механическая опора (шарнир Гука); 6 — штанга; 7 — уравнивающий груз

где l_{I-III} — плечо действующей силы $G_{изд}$ относительно шарнирной опоры в направлении I—III;

b_{I-III} — смещение шарнирной опоры стэнда в направлении относительно теоретической оси изделия;

ε_{I-III} — смещение (эксцентриситет) действительной оси изделия относительно теоретической оси в направлении I—III.

Аналогично из уравнения равновесия в направлении II—IV найдем вторую составляющую эксцентриситета оси изделия:

$$\sum M_{опш}^{II-IV} = G_{изд} l_{II-IV} - R_{II} L_{II-IV} = 0,$$

отсюда

$$l_{II-IV} = \frac{R_{II} L_{II-IV}}{G_{изд}}$$

и

$$\varepsilon_{II-IV} = l_{II-IV} - b_{II-IV} = \frac{R_{II} L_{II-IV}}{G_{изд}} - b_{II-IV}, \quad (1.6.)$$

где обозначения соответственно оси II—IV аналогичны предыдущим.

Зная ε_{I-III} и ε_{II-IV} , можно подсчитать величину полного смещения:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{I-III}^2 + \varepsilon_{II-IV}^2}; \quad (1.7)$$

где ε — полная величина смещения центра масс относительно продольной оси.

Направление его определяется углом α , который подсчитывается через

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\varepsilon_{II-IV}}{\varepsilon_{I-III}}.$$

Если величина смещения центра масс ε превышает допустимую величину, то с целью уменьшения смещения производят так называемую балансировку изделия. Она заключается в установке уравновешивающего груза $G_{гр}$ на направлении смещения в противоположную сторону $O_d - O_r$ в удобном месте на изделии, определяемом расстоянием до теоретической оси $r_{гр}$.

Величина уравновешивающего груза определяется из уравнения равновесия действующих сил:

$$\sum M_{о\text{ теор}} = 0 \quad \text{или} \quad G_{изд} \varepsilon - G_{гр} r_{гр} = 0,$$

отсюда

$$G_{гр} = \frac{G_{изд} \varepsilon}{r_{гр}}. \quad (1.8)$$

Рассмотренный балансировочный стэнд не отличается высокой точностью замера смещения центра масс изделия. Имеет место

широкий разброс показаний при многократных измерениях. Это объясняется наличием значительного трения в опоре-шарнире Гука, показанной на рис. 5 (коэффициент трения подшипника равен 0,06 ... 0,07), погрешностями показаний рычажных весов вследствие трения и упругих деформаций рычажной системы.

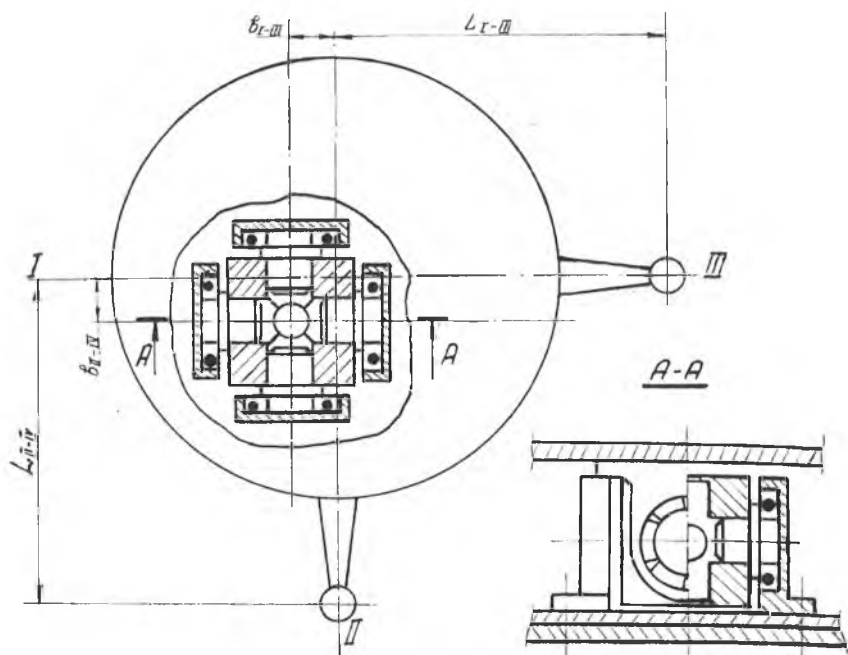


Рис. 5. Механическая опора (шарнир Гука)

Ниже приводится расчет погрешностей стэнда.
 Из выражения

$$\varepsilon_{I-III} = \frac{R_1 L_{I-III}}{G_{изд}} - b_{I-III}$$

видно, что на точность определения положения центра масс влияют: параметры стэнда L и b ; результаты взвешивания $G_{изд}$ и R ; общий параметр весов и стэнда — момент трения $M_{тр}$.

Величина L определяется с точностью $\pm 0,5$ мм, а b — с точностью $\pm 0,25$ мм.

Допустимая погрешность при взвешивании на рычажных весах грузоподъемностью 3000 кг составляет для масс до 500 кг — $\pm 0,5$ кг, от 500 до 3000 кг — $\pm 0,1\%$ от действительного значения массы груза.

Относительная погрешность при измерении реакции до 500 кг будет определяться как

$$\Delta R \% = \pm \frac{0,5}{R} 100.$$

Относительная погрешность при измерении реакции свыше 500 кг будет определяться по формуле

$$\Delta R \% = \pm \frac{0,001 R + 0,5}{R} 100.$$

Абсолютная погрешность $\Delta R = 0,001 R + 0,5$ кг.

Рассмотрим, какие погрешности имеют место при определении реакции, на конкретном примере. Для этого примем следующие допущения: размер $L = 3000$ мм; размер $b_{I-III} = b_{II-IV} = 100$ мм; масса платформы и фермы переходника 8000 кг и центр масс изделия находится в его геометрическом центре, т. е. $\varepsilon_{I-III} = \varepsilon_{II-IV} = 0$. Масса изделия $G_{изд} = 30\,000$ кг. Из выражений

$$\varepsilon_{I-III} = \frac{R_I L_{I-III}}{G_{изд}} - b_{I-III}$$

и

$$\varepsilon_{II-IV} = \frac{R_{II} L_{II-IV}}{G_{изд}} - b_{II-IV}$$

при $\varepsilon_{I-III} = \varepsilon_{II-IV} = 0$, получим

$$R_I = R_{II} = \frac{G_{изд} b_{I-III}}{L_{I-III}} = \frac{G_{изд} b_{II-IV}}{L_{II-IV}}.$$

Реакция от массы частей стэнда

$$R_{ст} = \frac{G_{ст} b_{I-III}}{L_{I-III}} = \frac{8000 \cdot 100}{3000} = 266,7 \text{ кг.}$$

Реакция от массы изделия

$$R_{изд} = \frac{30\,000 \cdot 100}{3000} = 1000 \text{ кг.}$$

Рассмотрим, как влияют погрешности при измерении величин L и b на ε_{I-III} :

$$\varepsilon_{I-III} = \frac{R_I (L_{I-III} \pm \Delta L)}{G_{изд}} - b.$$

При условии $\Delta L = \pm 0,5$ мм

$$\Delta \varepsilon_{I-III} = \frac{1000 (3000 + 0,5)}{30\,000} - 100 = 0,016 \text{ мм.}$$

Погрешность величины $\Delta b = 0,25$ мм влияет на определение координат центра масс без всяких пересчетов.

Теперь проследим влияние погрешности весов (0,1%) при определении массы $G_{изд}$.

Для $G_{\text{изд}} = 30\,000$ кг

$$\Delta \varepsilon'_{I-III} = \frac{R_1 L_{I-III}}{G_{\text{изд}} + \Delta G} - b$$

или, подставив величины, получим

$$\Delta \varepsilon'_{I-III} = \frac{1000 \cdot 3000}{30\,000 + 30,5} - 100 = -0,1 \text{ мм.}$$

Определим влияние погрешности реакции ΔR на величину смещения центра масс.

Для $G_{\text{изд}} = 30\,000$ кг

$$\Delta \varepsilon''_{I-III} = \frac{\Sigma R + \Sigma \Delta R}{\Sigma G} L_{I-III} - b_{I-III},$$

где $\Sigma R = R_{\text{ст}} + R_{\text{изд}}$

или

$$\Delta \varepsilon''_{I-III} = \frac{1266,7 + 1,766}{38\,000,5} 3000 - 100 \approx 0,1 \text{ мм.}$$

Результирующая погрешность смещения центра масс изделия, связанная с точностью геометрических и весовых параметров стенда ΔL , Δb , ΔG , ΔR , определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{I-III} &= \frac{R_1 + \Delta R}{G + \Delta G} (L + \Delta L) - 100 + \Delta b = \\ &= \frac{1000,0 + 1,766}{30000,0 + 30,5} 3000,5 - 100 + 0,25 = 0,35 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Как видно из результатов расчетов, положение центра масс можно определить без учета трения с точностью $\Delta \varepsilon$ до 0,5 мм, так как

$$\Delta \varepsilon = \sqrt{\Delta \varepsilon_{I-III}^2 + \Delta \varepsilon_{II-IV}^2}.$$

Теперь выясним влияние момента трения в опоре.

На опору действует радиальная нагрузка от масс стенда и изделия. Радиальная нагрузка на подшипник определится так:

$$\begin{aligned} Q_{\text{рад}} &= G_{\text{ст}} + G_{\text{изд}} - 2 R_{\text{ст}} - 2 R_{\text{изд}} = \\ &= 8000,0 + 30000,0 - 2 \cdot 266,6 - 2 \cdot 1000 = 35467,0 \text{ кгс.} \end{aligned}$$

Момент трения в опоре подсчитывается по формуле

$$M_{\text{тр}} = Qf \frac{d}{\varepsilon},$$

где Q — радиальная нагрузка;

f — коэффициент трения ($f = 0,06$);

d — диаметр подшипника ($d = 80$ мм).

Подставляя численные данные, получим

$$M_{\text{тр}} = 35467,0 \cdot 0,06 \cdot \frac{80}{2} = 85\,500 \text{ кгс}\cdot\text{мм.}$$

С другой стороны,

$$M_{\text{тр}} = P_{\text{тр}} b,$$

где $P_{\text{тр}}$ — сила, вызывающая момент трения на плече b ;

$$b = \sqrt{b_{\text{I-III}}^2 + b_{\text{II-IV}}^2} = 141,2 \text{ мм,}$$

отсюда

$$P_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{тр}}}{b} = \frac{85\,500}{141,2} = 605 \text{ кгс.}$$

Относительная погрешность будет одного направления и равна

$$\Delta p \% = \frac{P_{\text{тр}}}{Q_{\text{рад}}} 100 = \frac{605}{35467,0} 100 = 1,7 \%.$$

Абсолютная погрешность замера смещения центра масс из-за момента трения определится так:

$$\Delta \epsilon_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{тр}}}{G_{\text{изд}}} = \frac{85500,0}{30000,0} = 2,85 \text{ мм.}$$

Таким образом, суммарная погрешность при определении центра масс изделия на весовом стенде с механической опорой (шарнир Гука) составляет

$$\Delta \epsilon_{\text{сум}} = \Delta \epsilon + \Delta \epsilon_{\text{тр}} \approx 0,5 + 2,85 = 3,35 \text{ мм,}$$

т. е. точность замера невысокая из-за значительного трения в шарнирной опоре.

1.4

БАЛАНСИРОВКА НА СТЕНДЕ

С ГИДРООПОРОЙ И ДВУМЯ ПНЕВМОДАТЧИКАМИ

С целью уменьшения влияния сил трения и обеспечения автоматизации процесса определения величины смещения центра масс измеряемого изделия в производстве летательных аппаратов нашли применение стенды с центральной шаровой гидравлической опорой и двумя боковыми опорами в виде пневматических датчиков (рис. 6).

Балансировочный стенд состоит из следующих основных узлов: платформы 2, переходника 3, гидравлической шаровой опоры 5, пневматических опорных датчиков 9, поддерживающих домкратов 1.

Кроме того, в конструкцию стенда входят системы электрооборудования, гидравлическая система, состоящая из гидростанции, гидроаккумулятора, трубопроводов, а также пневматическая система, состоящая из пневматических датчиков, блока соотношения,

множительно-делительного и суммирующего устройств, комплекта вторичных приборов.

Основой стента является платформа 2. Она установлена на трех опорах: гидравлической сферической и двух пневматических 9. Ось платформы смещена от оси гидравлической опоры на величину $b = 50$ мм, чем обеспечивается опирание стента на боковые

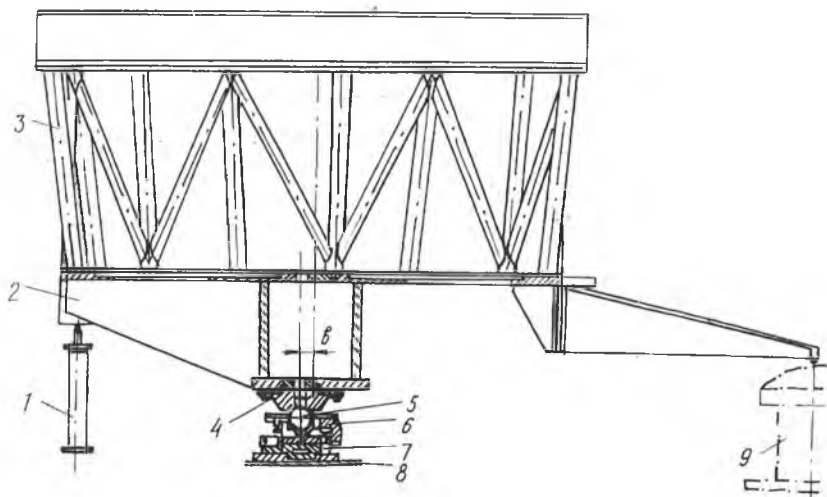


Рис. 6. Стент статической балансировки с гидроопорой и двумя пневмодатчиками

опоры. На верхней плоскости платформы предусмотрены базовые стыковочные отверстия, обеспечивающие совмещение геометрической оси изделия с осью платформы.

Сферическая гидравлическая опора установлена на фундаментной плите. Опора имеет следующее устройство (см. рис. 6). На плите 8 установлена втулка 7, в которой смонтирован подпятник 6. В верхней части подпятника, в притертом сферическом седле, установлен шар 5 диаметром 152,4 мм, на который опирается верхняя опора 4, соединенная с переходником и платформой. Во время работы сферической гидравлической опоры подпятник 6 вращается. Работа гидравлической опоры осуществляется следующим образом. При включении насоса давление под шаром возрастает до тех пор, пока им не будет уравновешена нагрузка, действующая на шар. Затем шар поднимается, образуя щель, в которую выливается подаваемое насосом масло. Между шаром и пояском подпятника образуется масляный поток, который обеспечивает чисто жидкостное трение между этими поверхностями (ко-

эффицент трения $f = 0,0004$). Давление жидкости под шаром устанавливается пропорционально нагрузке с максимальной величиной $p = 320 \cdot 10^6$ Па. Расход масла составляет 3 л/мин. Подача масла в сферическую гидравлическую опору осуществляется гидростанцией.

Система пневмоавтоматики стенда (рис. 7) дает возможность с помощью специальных устройств решать с высокой точностью уравнения по определению координат центра масс агрегата изделия относительно оси сферической опоры. При этом величины давлений сжатого воздуха должны соответствовать размерам исходных данных расчета.

Например, для определения координаты Y положения центра масс необходимо знать реакцию R_1 , расстояние L от оси сферической опоры до опоры на пневмодатчике, массу изделия $G_{\text{изд}}$ или соответствующие им давления $Y = \frac{R_1 L}{G_{\text{изд}}}$, $Y = \frac{p_1 \cdot p_5}{p_4}$. Дадим краткую характеристику отдельных элементов автоматике. В случае необходимости можно подробнее изучить специальную литературу [5].

Для определения величины реакции (или пропорционального давления) применяются пневматические датчики.

Пневматический датчик 7 служит для преобразования входной величины, в нашем случае реакции R_1 и R_{II} , в пропорциональный пневматический сигнал.

Для определения массы изделия 4 (или пропорционального давления) служит суммирующее устройство 8. Оно представляет собой прибор, обеспечивающий давление воздуха на выходе пропорционально сумме давлений:

$$p_{\text{сум}} = p_4 = p_1 + p_2 + p_{\text{гидр}},$$

где $p_{\text{сум}} = p_4$ — давление, соответствующее массе изделия;

$p_1, p_2, p_{\text{гидр}}$ — давления, соответствующие реакциям опор $R_1, R_{II}, R_{\text{гидр}}$.

Блок соотношений 10 служит для выражения линейных размеров в соответствующих величинах давления сжатого воздуха. Как мы показали выше, координата Y центра масс относительно центра шаровой опоры

$$Y = \frac{R_1 L_1}{R_1 + R_{II} + R_{\text{гидр}}}$$

или, выражая реакции через давление воздуха,

$$p_7 = \frac{p_1 p_5}{p_4},$$

где p_7 — выходное давление, соответствующее координате центра масс по оси Y ;

p_5 — давление, соответствующее величине плеча L .

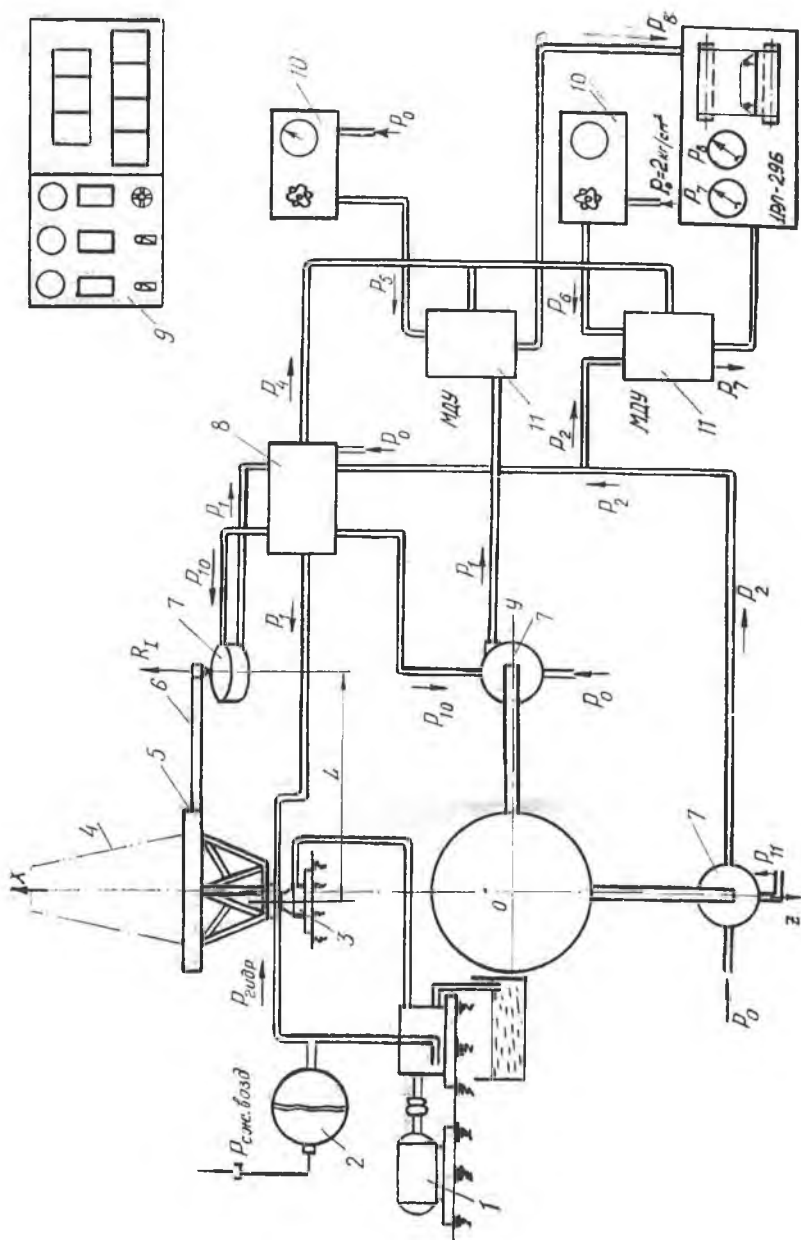


Рис. 7. Пневмогидравлическая блок-схема стенда с гидропорой и пневмодатчиками: 1 — насосная станция, 2 — гидроаккумулятор, 3 — гидропоря, 4 — контролируемое изделие, 5 — платформа, 6 — рычаг стенда, 7 — датчик пневматический, 8 — суммирующее устройство, 9 — пульт управления, 10 — блок соотношений, 11 — множительно-делительное устройство, 12 — записывающее устройство

Операция по определению величины p_7 осуществляется с помощью множительно-делительного устройства (МДУ) 11.

Работа на стенде осуществляется следующим образом.

Для определения положения центра масс изделие 4 устанавливается вертикально на переходник 5 стенда (см. рис. 7). Перед установкой изделия усилия, действующие на боковые опоры от массы стенда, уравниваются действием давления воздуха p_{10} и p_{11} в мембранных камерах пневматических датчиков. Давление жидкости в суммирующем устройстве, обусловленное действием массы стенда, также уравнивается давлением воздуха p_1 в камере. Поэтому при установке изделия пневмодатчики будут измерять реакции боковых опор, обусловленные действием массы изделия, а суммирующее устройство — массу изделия. Проследим работу пневмогидравлической системы по схеме. Питающий сжатый воздух подается под давлением $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Па во входные полости пневмодатчиков 7, суммирующего устройства 8 и блоков соотношения 10. От пневмодатчиков воздух под давлением p_1 и p_2 , соответствующим величинам реакций R_1 и R_{11} , подается в суммирующее устройство. К нему же подается и жидкость от сферической опоры под давлением, соответствующим нагрузке на нее. На выходе суммирующего устройства устанавливается давление, пропорциональное массе изделия p_4 . От суммирующего устройства воздух подается к обоим множительно-делительным устройствам 11. Туда же подводится воздух от блоков соотношения 10 с давлениями p_5 и p_6 , величина которых определяется при тарировке стенда и зависит от расстояния L между сферической опорой и пневмодатчиками. Таким образом, к каждому множительно-делительному устройству подается воздух от одного из пневмодатчиков, одного из блоков соотношения и суммирующего устройства.

Во множительно-делительном устройстве производится перемножение величин p_1 , p_2 на соответствующие p_5 , p_6 и деление произведений на p_4 .

На выходе устанавливается давление воздуха

$$p_7 = \frac{p_1 p_5}{p_4} \text{ и } p_8 = \frac{p_2 p_6}{p_4},$$

пропорциональное смещению центра масс изделия от центра шара сферической опоры соответственно по оси Z и оси Y .

Выходное давление множительно-делительных устройств измеряется с помощью приборов 12. Приборы снабжены записывающим устройством, с помощью которого величина давления фиксируется на бумажной ленте.

Теперь рассмотрим порядок технологического процесса определения положения центра масс изделия на стенде.

Включается гидронасос 1 сферической гидравлической опоры 3.

Включается двигатель вращения опоры.

Открытием вентиля подается сжатый воздух $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Па от сети. Строго контролируется по манометру величина давления.

Проверяется установка на нуль выходного давления суммирующего устройства p_4 .

Устанавливается на нуль выходное давление пневмодатчиков p_1 и p_2 .

Включается лентопротяжное устройство приборов 12.

На переходник стенда устанавливается изделие 4.

Проверяется горизонтальность верхней плиты переходника.

По приборам определяются давления p_7 и p_8 и по тарифовочным таблицам — координаты центра масс по направлениям осей $У$ и Z .

Отключаются системы и изделие снимается со стенда.

Применение балансировочного стенда с гидроопорой и пневматическими датчиками дает возможность повысить производительность труда и точность замера смещения центра масс.

Погрешность замера на данном стенде можно представить в виде следующей суммы:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4,$$

где Δ_1 — погрешность системы пневмоавтоматики ($\Delta_1 = \pm 1,0$ мм);

Δ_2 — погрешность, связанная с неточным определением длины плеча L ($\Delta_2 = \pm 0,15$ мм);

Δ_3 — погрешность, связанная с неточным определением смещения центра опоры b ($\Delta_3 = \pm 0,1$ мм);

Δ_4 — погрешность, связанная с моментом трения в шаровой опоре.

Остановимся подробнее на расчете, связанном с погрешностью от момента трения в опоре на конкретном примере.

Момент трения в опоре можно определить по уравнению

$$M_{\text{тр}} = P_{\text{тр}} \frac{d}{2} = j R_{\text{гидр}} \frac{d}{2} = 0,5 j p S d,$$

где $P_{\text{тр}}$ — сила трения;

d — диаметр сферы шаровой опоры;

j — коэффициент трения;

$R_{\text{гидр}}$ — реакция в гидроопоре;

p — удельное давление;

S — поверхность седла ($S = \pi dh$);

h — глубина седла.

Реакция в гидроопоре определится по уравнению

$$R_{\text{гидр}} = G_{\text{ст}} + G_{\text{изд}} - 2 R_{\text{ст}} - 2 R_{\text{изд}},$$

где $G_{\text{ст}}$ — масса стенда (принимая $G_{\text{ст}} = 5000$ кг);

$G_{\text{изд}}$ — масса изделия (принимая $G_{\text{изд}} = 30\,000$ кг);

$R_{ст}$ — реакции опор на пневмодатчики от массы стенда;
 $R_{изд}$ — реакции опор на пневмодатчики от массы изделия.

Определение реакций на боковые опоры проведем из выражения

$$\Delta \varepsilon_x = x = \frac{RL}{G} - b.$$

Приняв, что эксцентриситет $\Delta \varepsilon_y = 0$; $b = 50$ мм; $L = 3000$ мм; найдем $R = \frac{Gb}{L}$.

Определим $R_{1ст}$ и $R_{2ст}$:

$$R_{1ст} = R_{2ст} = \frac{5000 \cdot 50}{3000} = 83,3 \text{ кг.}$$

Определим $R_{1изд}$ и $R_{2изд}$:

$$R_{1изд} = R_{2изд} = \frac{30\,000 \cdot 50}{3000} = 500 \text{ кг.}$$

Таким образом, реакция в гидроопоре будет

$$R_{гидр} = 5000 + 30\,000 - 2 \cdot 83,3 - 2 \cdot 500 = 33\,833 \text{ кг.}$$

Коэффициент трения в шаровой гидравлической опоре $\mu = 0,0004$.
Таким образом, момент трения

$$M_{тр} = \mu R_{гидр} \frac{d}{2} = 0,0004 \cdot 33833,0 \cdot 76,2 = 1030 \text{ кгс}\cdot\text{мм.}$$

С другой стороны, $M_{тр} = P_{тр} b$,

где

$$a = \sqrt{b^2 + b^2} = \sqrt{50^2 + 50^2} = 71 \text{ мм,}$$

отсюда

$$P_{тр} = \frac{M_{тр}}{a} = \frac{1030}{71} \approx 14,5 \text{ кг.}$$

Относительная погрешность

$$\Delta P\% = \frac{P_{тр}}{P_{гидр}} 100 = \frac{14,5}{33833,0} \cdot 100 = 0,043.$$

Погрешность в определении координат центра масс определится как

$$\Delta x = \frac{M_{тр}}{G_{изд}} = \frac{1030}{30\,000} = 0,033 \text{ мм.}$$

Таким образом, $\pm \Delta_4 = \pm 0,033$ мм. Суммарная результирующая погрешность замера положения центра масс на стенде

$\pm \Delta_{сум} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = \pm 1 \pm 0,015 \pm 0,1 \pm 0,033 = \pm 1,148$ мм.

Следовательно, погрешность значительно меньше, чем у стендов с механической шарнирной опорой.

1.5

ВЗВЕШИВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИЯ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТЕНДЕ С ТРЕМЯ ВЕСОВЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

В конструкции стенда использован принцип взвешивания и центрирования с помощью трех весовых механизмов с заданными расстояниями между точками приложения сил массы.

Принципиальная компоновочная опτικο-кинематическая схема стенда приведена на рис. 8. На основании стенда 14 устанавливаются три подвижных колонны 21 с весовыми механизмами и одна неподвижная 15.

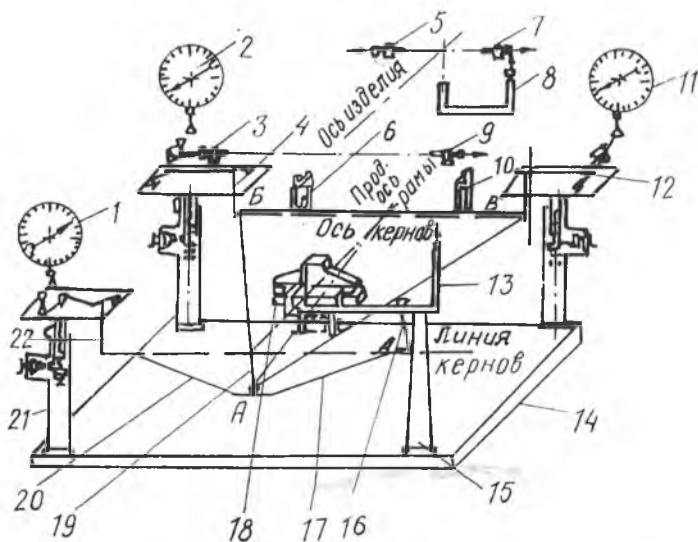


Рис. 8. Компоновочная опτικο-кинематическая схема стенда с тремя весовыми механизмами

Платформой для укладки изделия при взвешивании является грузоподъемная рама 19. Она снабжена тремя точками опоры для взвешивания, две из которых Б и В ложатся на подушки серег 4 и 12 весовых механизмов 2 и 11, а третья А — на подушки поперечной балки 20. Последняя, в свою очередь, кернами Г и Д лежит на серьге 16 неподвижной колонны 15 и серьге 22 весового механизма 1. Передаточное отношение рычагов весового механизма 1 выбрано так, что есть возможность на его циферблате получить величину силы реакции, действующей в точке А балки 20, т. е. значение усилия на третьей опоре горизонтальной рамы.

Во время укладки изделия рама снимается с грузоподъемных серег и находится в горизонтальном положении на трех опорах механизма подъема.

При взвешивании изделие должно занимать на раме строго определенное горизонтальное положение, при котором ось изделия параллельна продольной оси рамы, являющейся осью отсчета при определении координаты Y или Z , а линия кернов $БВ$ совпадает с плоскостью стыка изделия с подставкой и является базой для отсчета при определении координаты X центра масс.

Правильность положения изделия относительно принятых базовых осей рамы, являющихся осями отсчета, определяется реперными точками (РТ) изделия, положение которых относительно рамы контролируется зрительными трубками 3, 5, 7, 9 и перископами 8 и 13. Зрительные трубки контролируют горизонтальное положение изделия, а перископы — его положение вдоль оси рамы.

Изделие укладывается на раме стенда 19 на три опоры 6, 10 и 18, снабженные механизмами, которые обеспечивают все необходимые его перемещения для совмещения базовых реперных точек с перекрестиями оптических приборов. Точность установки изделия по реперным точкам составляет 0,5 мм.

После установки рамы с изделием в горизонтальное положение производится снятие показания на циферблатных головках.

Масса изделия G определяется как сумма трех показаний весовых механизмов (рис. 9):

$$G = P_1 + P_2 + P_3,$$

где P_1, P_2, P_3 — масса соответственно по циферблатным указателям механизмов 1, 2, 11.

Координаты X и Y центра масс определяют из уравнений статики:

$$\sum M_y = 0, \quad \sum M_x = 0;$$

$$X = \frac{P_3 L}{G}; \quad (1.9)$$

$$Y = \frac{(P_1 - P_2) l}{G}; \quad (1.10)$$

где L — расстояние между линиями кернов $БВ$ и точкой A грузовой рамы (величина постоянная для данного стенда);

l — расстояние от продольной оси стенда до точек приложения сил массы $Б$ и $В$ на раме (для данного стенда величина постоянная).

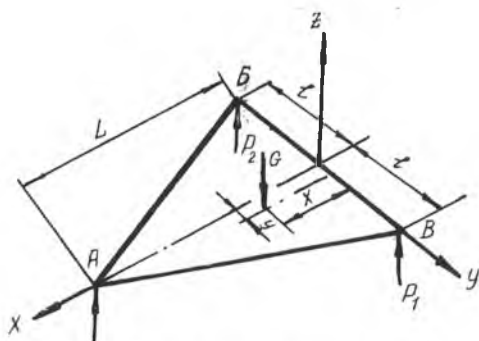


Рис. 9. Схема расположения усилий на платформе стенда

Для определения координаты Z центра масс изделия последнее поворачивают на 90° вокруг оси и вновь укладывают на грузоподъемную раму. Все операции аналогичны предыдущим.

На стенде могут быть проверены изделия, отличающиеся массой, габаритами и положением реперных точек (от 500 до 10 000 кг).

На точность определения координат центра масс путем его взвешивания на трех весах влияет точность определения сил реакции и установки изделия на грузоподъемной платформе стенда относительно базовых осей. Суммарная ошибка определения координат ЦМ на стенде $\Delta_{\text{сум}} = \pm 1,5$ мм.

Возможными путями повышения точности определения координат центра масс на трехвесовом стенде являются: повышение точности весовых механизмов; уменьшение расстояния между точками опор платформы; установка контролируемых изделий по жестким механически обработанным базам.

В настоящее время разработаны конструкции стендов статической балансировки изделий, основанные на принципе дисбаланса, которые могут работать как по неавтоматическому, так и по автоматическому циклу и обеспечивают получение результатов измерений координат центра масс по трем координатам с высокой точностью.

Рассмотрим ниже конструкции стендов статической балансировки ССБ-1, ССБ-7 и работу на них.

1.6

БАЛАНСИРОВКА НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ СТЕНДЕ С ЦЕНТРАЛЬНОЙ ШАРНИРНОЙ ОПОРОЙ ССБ-1

Стенд статической балансировки ССБ-1 позволяет производить определение центра масс изделия с погрешностью, не превышающей 0,5 мм при отклонении центра масс от оси не более 20 мм. Отличительной особенностью стенда является расположение главной гидравлической опоры на оси изделия, а также применение чувствительных индикаторов равновесия и компенсации момента дисбаланса системы «стол стенда — изделие» с помощью грузов.

Положение центра масс определяется тремя координатами X , Y , Z , которые рассчитываются по массе изделия и моменту дисбаланса, измеренным с помощью стенда.

Техническая характеристика стенда:

- | | |
|-----------------------------------|--------------------|
| 1) масса балансируемого изделия: | |
| максимальная | — 35 000 кг |
| минимальная | — 200 кг |
| 2) максимальный момент дисбаланса | — 800 000 кгс · мм |
| 3) диаметр стола | — 3000 мм |

Стенд (рис. 10, см. вкладку) состоит из стола 12, установленного на три опоры: два индикатора равновесия 20, 21 и шаровую опору 19.

Изделие 10 устанавливается на столе с помощью переходника 9: для определения координаты X — горизонтально, для определения координат Y и Z — вертикально. При большой длине изделия (больше 15 м) для определения координаты X изделие укладывается на стенд и дополнительную поддерживающую тележку 15.

Момент силы от массы изделия относительно центра гидравлической опоры, установленной на геометрической оси изделия, уравновешивается в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (параллельных строительным осям изделия) изменением числа сменных грузов b и перемещением передвижных грузов 23.

Положение равновесия отмечается индикаторами равновесия 20, 21. Суммарный момент сменных и подвижных грузов в каждой строительной плоскости равен моменту дисбаланса изделия в этой плоскости.

Масса изделия определяется по давлению жидкости в центральной опоре, измеренному манометром 14 при равновесном положении стенда. Необходимая для нормальной работы опоры подача касторового масла производится с помощью гидростанции 4 через трубопроводы 3, 2. Вращению стола вокруг вертикальной оси препятствует стопор 18. На верхней плоскости стола имеются посадочные штыри для установки и крепления переходника. На нижней плоскости стола укрепляется верхний фланец центральной гидроопоры. В верхней части боковой поверхности стола имеются реперные знаки, фиксирующие строительные плоскости изделия. Линия пересечения этих осей проходит через центр шара гидравлической опоры. Вокруг стола имеется настил 1 и частичное ограждение 11.

Сменные грузы b располагаются в двух плоскостях, параллельных строительным плоскостям, по два комплекта в каждой плоскости. В каждом комплекте имеется по 8 грузов. В положении равновесия четыре груза висят на подвеске 8 и четыре — опираются на винты, установленные в планках каркаса 7. Каркас опирается на винт домкрата 5 и имеет возможность перемещаться вверх и вниз от среднего положения. При движении вверх штыри каркаса последовательно снимают грузы с подвески, чем уменьшают общий вес грузов и их момент относительно центра шара. При движении вниз, наоборот, момент грузов увеличивается. Каждый груз весит 76,92 кгс и создает момент 200 000 кгс·мм. К каркасу прикреплены ползуны двух блоков переключателей. Ползуны снабжены специальными выступами, которые производят переключение 27 микропереключателей. Микропереключатели используются в схеме авто-

матического и ручного управления домкратами сменных грузов. Коммутация электрической проводки осуществляется через клеммные коробки 22.

Для плавного изменения момента внутри диапазона 200 000 кгс·мм служат передвижные грузы 23 весом 133,33 кгс, перемещаемые по направляющей 24 с помощью винта. Винт приводится в движение сельсином. Для остановки грузов в крайних положениях установлены конечные выключатели.

Индикатор равновесия 21 имеет кронштейн, который болтами крепится к столу 12 и опирается на пружину 16. Другой конец пружины установлен на упоре, укрепленном в стойке 17. Усилие пружины регулируется гайкой. В верхней части стойки имеется упор. При отклонении величины реакции от номинального значения, соответствующего положению равновесия стэнда, пружина деформируется и регулировочный винт упирается в один из упоров, которые включают датчик. В равновесном положении между упорами и концами регулировочного винта должны быть зазоры по 0,5 мм. Для фиксации этого положения имеется малогабаритный контактный двухпределный датчик, щуп которого постоянно следует за перемещением кронштейна. При равновесии оба контакта датчика разомкнуты. В случае отклонения кронштейна от положения равновесия на 0,05 мм в какую-либо сторону замыкается один из контактов датчика.

Для нормальной работы гидравлической опоры в полость под шаром должно подаваться касторовое масло. Расход масла через опору составляет около 3,5 л/мин. Давление в зависимости от нагрузки на стэнд колеблется до $320 \cdot 10^5$ Па.

Все управление работой стэнда осуществляется с пульта управления 13. Он выполнен в виде рабочего стола с установленной на нем вертикальной панелью управления. На панели управления размещены приборы контроля гидросистемы, а также органы управления электрической системой определения момента дисбаланса и другие.

С правой стороны пульта размещена стойка, в которой укреплен грузопоршневой манометр МП 600 (14), служащий для определения массы изделия как разности нагрузки, воспринимаемой гидравлической опорой до и после установки изделия на столе.

Электрическая схема стэнда обеспечивает:

управление гидроприводом и контроль за его рабочим режимом; сигнализацию о направлении момента дисбаланса стэнда и положение равновесия;

ручное или автоматическое перемещение грузов для уравнивания момента дисбаланса изделия и сигнализацию о величине момента дисбаланса.

Приборы управления работой электросхемы вынесены на панель управления пульта. Каждая координата центра масс определяется независимо от другой, и стенд имеет две системы грузов, действующих в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; в электрической схеме также предусмотрены две одинаковые системы управления этими грузами. На панели управления соответственно имеются две группы приборов управления работой схемы.

Работа электрической схемы при определении координат центра масс происходит по двум режимам: неавтоматическому и автоматическому.

Порядок работы на стенде статической балансировки ССБ-1

Определение момента дисбаланса. При автоматическом определении момента дисбаланса изделие устанавливается на переходник стенда так, чтобы обозначение строительных осей изделия I, II, III, IV соответствовало обозначению их на столе стенда.

После установки изделия на стенд автоматическая система управления приведет стенд в положение равновесия и на пульте загорятся два транспаранта «равновесие установлено».

Момент дисбаланса в каждой строительной плоскости изделия определяется как сумма показаний светящегося транспаранта сменных грузов и счетчика минус 900 000 кгс·мм.

Например,

$$M_{I-III} = M_{I-III}^{см} + M_{I-III}^{пер} - 900\,000 \text{ [кгс·мм]},$$

где M_{I-III} — момент дисбаланса в направлении осей I—III;

$M_{I-III}^{см}$ — момент сменных грузов;

$M_{I-III}^{пер}$ — момент передвижных грузов;

900 000 кгс·мм — исходный момент дисбаланса грузов стенда.

При выходе из строя автоматической системы уравнивания управление перемещением и сменой грузов может осуществляться вручную. Для этого предусмотрены два переключателя сменных грузов и два тумблера включения электропривода передвижных грузов, предназначенных для уравнивания момента дисбаланса в двух строительных плоскостях изделия.

При установке изделия на переходник на пульте стенда должны загореться два транспаранта, указывающие для каждой из строительных плоскостей или положение равновесия, или смещение центра масс в сторону какой-либо оси. В последнем случае уравнивание производится последовательно: сначала в одной строительной плоскости, а затем в другой.

Уравновешивание следует начинать с перемещения передвижного груза в сторону, противоположную смещению центра масс. Если при этом равновесие установить не удастся, то необходимо изменять последовательно по ступеням момент сменных грузов с помощью переключателя сменных грузов до тех пор, пока не загорится транспарант «равновесие установлено» или транспарант, указывающий смещение центра масс в сторону, противоположную первоначальной.

Для окончательного уравновешивания стенда нужно передвижной груз переместить в обратную сторону так, чтобы загорелся транспарант «равновесие установлено».

После уравновешивания стенда в обеих плоскостях можно по показаниям счетчиков и светящихся транспарантов определить моменты дисбаланса в каждой плоскости.

Определение массы изделия. Масса изделия G определяется после уравновешивания стенда с изделием при горящих транспарантах «равновесие установлено».

Для определения массы подвижная часть манометра 17МП 600 должна быть уравновешена дисковыми грузами и гирями. Масса изделия определяется суммой дисков и гирь, уравновешивающих изделие.

Определение координат центра масс изделия. Координаты центра масс Z и Y по измеренным массе G и моментам дисбаланса изделия (M_{I-III} и M_{II-IV}) определяются так:

$$Z = \frac{M_{I-III}}{G}; \quad (1.11)$$

$$Y = \frac{M_{II-IV}}{G}. \quad (1.12)$$

Определение координаты X с применением тележки (рис. 11) производится по формуле

$$X = \frac{R_1 l}{G} + a, \quad (1.13)$$

где R_1 — реакция гидравлической шаровой опоры;

l — расстояние от ложементов тележки до гидроопоры;

a — расстояние от торцевого шпангоута до опоры на тележке;

G — масса изделия.

Расчет погрешности определения координат центра масс. Для расчета погрешности определения координат центра масс на стенде использован широко распространенный принцип независимости. Ошибка определения координат рассматривается как сумма составляющих, каждая из которых обусловлена одним отдельным фактором, влияющим на работу стенда.

Так как в стенде предусмотрены два способа установки изделия — с применением опорной тележки без нее — следует рассмотреть погрешность стенда для каждого способа отдельно,

Основными причинами погрешности при работе на стенде без поддерживающей тележки являются:

- а) трение в центральной опоре;
- б) нечувствительность индикатора равновесия;
- в) отклонение веса сменных грузов от номинального значения;

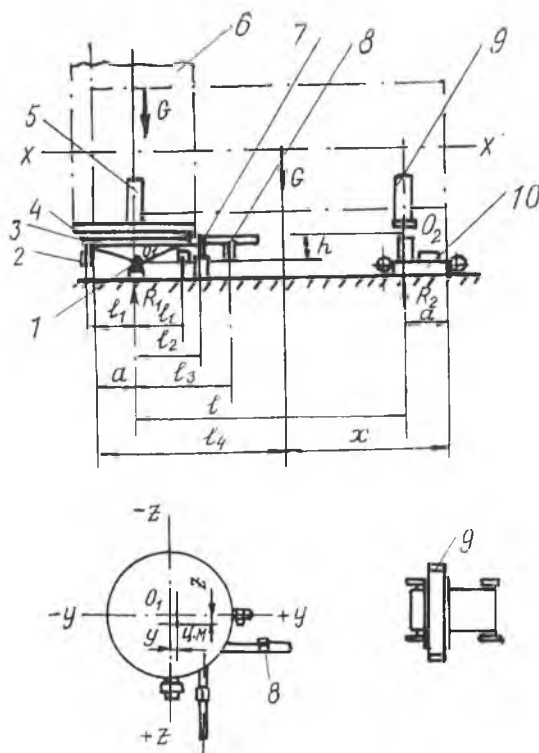


Рис. 11. Схема стенда ССБ-1: 1 — опора шаровая, 2 — грузы сменные, 3 — стол, 4 — переходник, 5, 9 — ложементы, 6 — контролируемое изделие, 7 — датчик нуля, 8 — передвигной груз, 10 — тележка поддерживающая

г) отклонение веса передвигных грузов от номинального значения;

д) отклонение точки приложения силы веса сменных грузов от теоретической;

е) непараллельность траектории движения центра масс передвигного груза плоскости изделия;

ж) неточность передаточного механизма от винта передвигаемого груза к счетчику;

з) неточность изготовления винта;

и) отклонение оси изделия от вертикали;

к) ошибка взвешивания изделия;

л) неточность установки изделия на переходник и переходника на стол станда.

В результате действия всех вышеупомянутых факторов суммарная погрешность определения координаты центра масс находится как сумма всех составляющих.

Величина суммарной максимальной погрешности в мм в зависимости от массы изделия и координаты центра масс дана в табл. 1.

Таблица 1

Масса, кг	Координата ЦМ, мм	
	до 20	до 100
200	3,21	3,71
2000	0,49	0,70
25 000	0,33	0,51

Для крупных изделий массой свыше $1 \cdot 10^4$ кг применяются станды с поддерживающей тележкой. В этом случае изделие укладывается с одной стороны на ложемент 5, установленный на столе станда, и ложемент 9 (см. рис. 11).

Координата X определяется из уравнения (1.13).

Точность расчета X зависит от точности определения величин, входящих в уравнение. Погрешность определения X обусловлена:

- неточностью определения массы изделия ($\Delta_1 = \pm 2$ мм);
- ошибкой измерения расстояния l ($\Delta_2 = \pm 1$ мм);
- ошибкой измерения расстояния a ($\Delta_3 = \pm 0,5$ мм);
- неточностью измерения реакции R_1 с помощью шаровой опоры ($\Delta_4 = \pm 3$ мм);
- трением в гидравлической опоре ($\Delta_5 = \pm 0,1$ мм).

Таким образом, суммарная погрешность определения координаты ЦМ изделий большого габарита и массы составит $\Delta X = \pm 6,6$ мм.

1.7

БАЛАНСИРОВКА НА СТАНДЕ ССБ-7

Станд предназначен для определения положения центра масс изделия по трем координатным осям.

Технические данные:

максимальная допустимая масса (нагрузка) на стол станда	— 400 кг
минимальная масса изделия	— 20 кг

максимальное смещение центра масс изделия относительно вертикальной оси	— 40 мм
максимальная погрешность определения горизонтальных координат Y , Z центра масс изделия	— 0,2 мм
максимальная погрешность определения вертикальной координаты X центра масс изделия	— 1,5 мм
габаритные размеры стола	— 1700×1650×1200 мм
масса стола	— 700 кг

Преимуществом этого стола является то, что он позволяет определить положение центра масс изделия по трем осям X , Y и Z без перестановки и кантования изделия во время всего технологического процесса центровки. Это приводит к повышению точности определения положения ЦМ изделия и исключает изготовление дополнительной оснастки: кантовочного приспособления, ложементов при определении продольной координаты центра масс.

Конструктивная схема ССБ-7 показана на рис. 12.

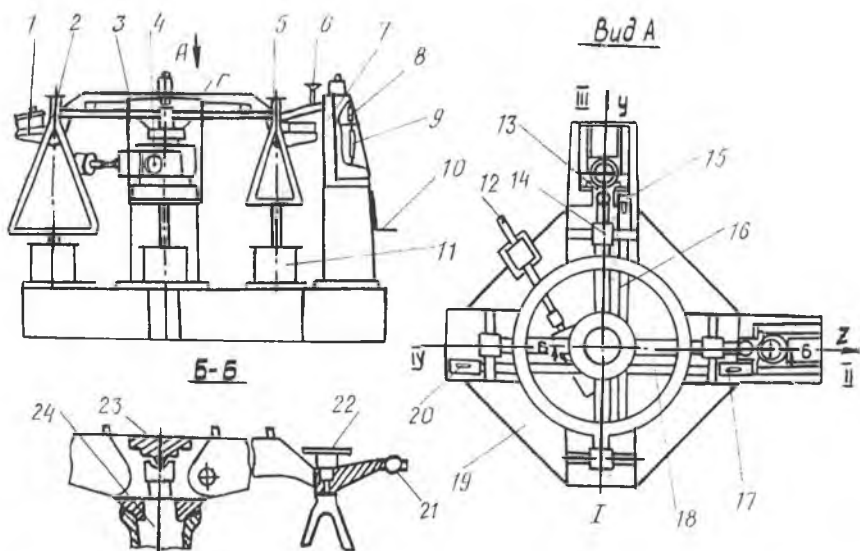


Рис. 12. Конструктивная схема стола статической балансировки ССБ-7

Стол 3 стола устанавливается на центральную призматическую опору 23, которая имеет возможность наклоняться во всех направлениях с трением качения. Опора установлена на центральной стойке 24. Центральный домкрат 4 с приводом 12 может при-

поднять стол стэнда на 0,5... 1,2 мм и разгрузить центральную опору во время установки изделия или переходника на стол стэнда.

Наклон стола стэнда ограничивается зажимами боковых опор 7 и 14. Поворот стола стэнда вокруг вертикальной оси ограничивается упорными винтами боковой опоры 14.

Грузовые площадки 2 и 5 подвешены к столу стэнда на призмах 22, которые позволяют грузовым площадкам качаться во всех направлениях с трением качения.

Под каждой грузовой площадкой расположен демпфирующий бачок 11, заполненный маслом, в котором передвигается демпфер, прикрепленный винтами к грузовой площадке.

К столу стэнда шарнирно подвешены штанги 16 и 18, на которые устанавливаются уровни 20, 17, 15 (ГОСТ 11196-74), служащие для контроля горизонтального и наклонного положения стола стэнда. Уровень 20 устанавливается на наклонном кронштейне 1.

Центральная стойка, домкрат, боковые опоры и демпфирующие бачки закреплены на сварной раме 19, которая крепится фундаментными болтами к фундаменту.

Перед началом работы базовая плоскость Г стола стэнда выводится в горизонт. При этом должны совпадать изображения концов пузырька ампулы уровней 17 и 15.

Затем стол стэнда при помощи боковой опоры 7 и рукоятки 10 наклоняется на угол $\alpha = 8^\circ$. Точность угла наклона стола стэнда обеспечивается калибром 9 и индикатором 8. При этом должны совпадать изображения концов пузырька ампулы уровня 20.

На стол стэнда устанавливается переходник и производится его балансировка в горизонтальном и наклонном положении путем установки грузов на верхние плоскости соответствующих грузовых площадок.

На стэнд устанавливается изделие и производится его балансировка относительно центральной опоры путем установки грузов на нижние плоскости соответствующих грузовых площадок. При этом за состояние равновесия принимается такое положение, когда при совпадении изображений концов пузырька ампулы уровней 17 и 15 стол стэнда опирается сферическими опорами 21 на нижние опоры скоб 6 и 13, а при снятии контрольных грузов с грузовых площадок, расположенных со стороны боковых опор, состояние покоя нарушается и стол стэнда выходит из горизонтального положения.

По известным значениям плеч, массы балансировочных грузов и массы изделия производится расчет горизонтальных координат Y , Z центра масс изделия.

Для определения вертикальной координаты X центра масс изделия стол стэнда наклоняют на угол $\alpha = 8^\circ$ и на верхние плоскости грузовых площадок устанавливают балансировочные гири, полученные при наклонном положении стола с переходником.

Правильность угла наклона стола стенда проверяют по уровню 20, у которого должны совпадать изображения концов пузырька ампулы.

Затем производят балансировку изделия в наклонном положении путем установки гирь на нижнюю плоскость грузовой площадки 2. По полученным значениям массы балансировочных гирь и известным значениям массы изделия, длины плеча и тангенса угла наклона стенда определяют путем расчета вертикальную координату X центра масс изделия.

Рассмотрим более подробно процесс определения координат центра масс изделия на стенде ССБ-7.

Вначале изложим некоторые эксплуатационные требования при работе на стенде. Все контрольные измерения на стенде производятся при температуре $20 \pm 10^\circ\text{C}$. Проверка точности балансировки производится контрольными грузами. Масса контрольных грузов определяется в зависимости от величины нагрузки на центральную опору стенда. При балансировке пустого стола стенда масса контрольного груза $P_{к1}$ определяется по формуле

$$P_{к1} = \frac{f_{тр} G_{ст}}{L}, \quad (1.14)$$

где $P_{к1}$ — масса контрольного груза ($P_{к1} = 0,2 \text{ г}$);

$f_{тр}$ — коэффициент трения качения ($f_{тр} = 0,01 \text{ мм}$);

$G_{ст}$ — масса стола стенда ($G_{ст} = 100 \text{ кг}$);

L — расстояние от оси качения стола стенда до оси подвески грузовых площадок ($L = 500 \text{ мм}$).

При балансировке переходника масса контрольного груза $P_{к2}$ рассчитывается по формуле

$$P_{к2} = \frac{f_{тр} (G_{ст} + G_{пер})}{L}, \quad (1.15)$$

где $G_{пер}$ — масса переходника, кг.

При балансировке изделия масса контрольного груза P_k рассчитывается по формуле

$$P_k = \frac{f_{тр} (G_{ст} + G_{пер} + G)}{L}, \quad (1.16)$$

где G — масса изделия, кг.

Порядок определения горизонтальных координат Y , Z центра масс изделий (см. рис. 12). 1. Рассчитать массу контрольных грузов P_k для балансировки изделия по формуле (1.16).

2. Установить на нижние плоскости грузовых площадок II и III, расположенных со стороны боковых опор (поз. 14), контрольные грузы P_k .

3. Вывернуть верхние упоры скоб 6 и 13.

4. Произвести предварительную балансировку изделия на стенде. Подбирая массу гирь на грузовых площадках, добиться такого положения, при котором боковые сферические опоры стола стенда будут опираться на нижние опоры скоб *б* и *13*, а при установке грузов массой 100 г на грузовые площадки I и IV боковые сферические опоры стенда самопроизвольно перейдут в крайнее верхнее положение и упрутся в верхние упоры скоб *б* и *13*.

5. Ввернуть верхние упоры скоб *б* и *13*.

6. Проконтролировать горизонтальное положение стола стенда по уровням *17* и *15*. Если изображения концов пузырька ампулы уровнями *17* и *15* не совпадают, то необходимо добиться их совпадения путем перемещения скоб *б* и *13* боковых опор.

7. Вывернуть верхние упоры скоб *б* и *13*.

8. Произвести окончательную балансировку изделия на стенде. Подбирая массу гирь на грузовых площадках, добиться такого положения, когда при совпадении изображений концов пузырька ампулы уравнений *17* и *15* боковые сферические опоры стола стенда будут опираться на нижние опоры скоб *б* и *13*, а при снятии контрольных грузов с площадок II и III (поз. 14) состояние равновесия нарушится и боковые сферические опоры стола *21* стенда упрутся в верхние упоры скоб *б* и *13*.

9. Ввернуть верхние упоры скоб *б* и *13*.

10. Зарегистрировать массу гирь P^I , P^{II} , P^{III} и P^{IV} , расположенных на соответствующих грузовых площадках (рис. 13,а).

11. Рассчитать координаты Y , Z центра масс изделия по формулам, полученным из условия равновесия:

$$Y = \frac{(P^I - P^{III} - P_k) L}{G}; \quad (1.17)$$

$$Z = \frac{(P^{II} - P^{IV} + P_k) L}{G}; \quad (1.18)$$

где G — масса изделия, кг;

L — расстояние от оси центральной опоры стенда до оси подвески грузовой площадки, мм ($L = 500$ мм);

$P^I, P^{II}, P^{III}, P^{IV}$ — масса гирь, расположенных на соответствующих грузовых площадках без учета массы контрольных грузов, кг;

P_k — масса контрольных грузов, расположенных на II и III грузовых площадках, кг.

Здесь за положительное направление оси Y принято направление по оси I—III стенда. За положительное направление оси Z принято направление по оси Z IV—II стенда.

Не снимая гирь $P^I, P^{II}, P^{III}, P^{IV}$, расположенных на соответствующих грузовых площадках, и контрольных грузов P_k , рас-

положенных на II и III грузовых площадках, приступить к определению вертикальной координаты X центра масс изделия.

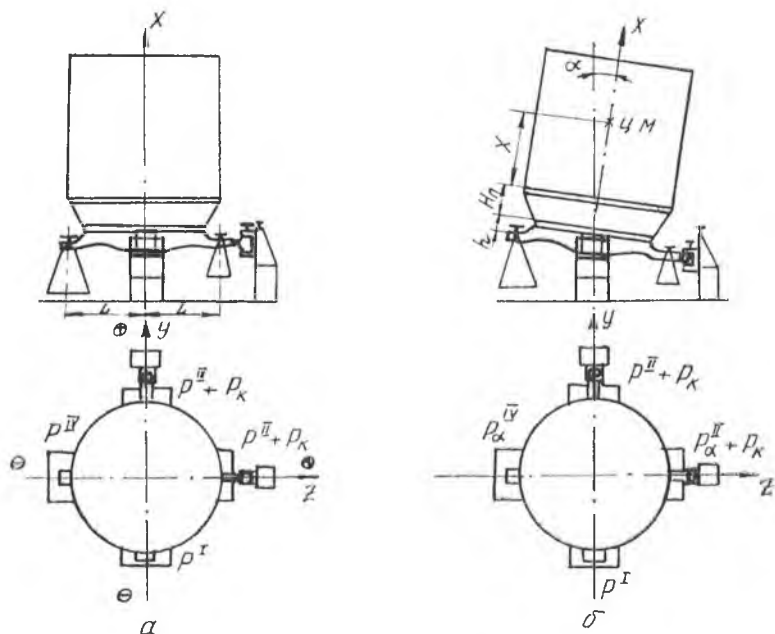


Рис. 13. Расчетная схема определения координат X , Y изделия

Порядок определения вертикальной координаты центра масс изделий способом наклона. 1. Снять гири P^{II} и P^{IV} , расположенные на верхних плоскостях грузовых площадок II и IV (рис. 13,а).

2. На верхние плоскости грузовых площадок II и IV установить гири P_{α}^{II} или P_{α}^{IV} , приводящие систему в равновесие при балансировке стола с переходником в наклонном положении (рис. 13,б).

3. Вывернуть верхние упоры скоб b и 13 (см. рис. 12).

4. Убрать калибр 9 из-под индикатора 8 и наклонить стол стенда на угол $\alpha = 8^\circ$ путем перемещения скобы b до того момента, пока измерительный наконечник индикатора 8 не упрется в стойку и стрелки индикатора покажут значение, установленное при горизонтальном положении стола стенда.

5. Произвести предварительную балансировку изделия на стенде при наклонном положении. Путем установки гирь на IV грузовую площадку добиться такого положения, при котором боковая сферическая опора стенда будет опираться на нижнюю опору ско-

бы 6, а при установке груза массой 100 г на грузовую площадку IV боковая сферическая опора стента самопроизвольно перейдет в крайнее верхнее положение и упрется в верхний упор скобы 6.

6. Ввернуть верхние упоры 6 и 13.

7. Проконтролировать наклонное положение стола стента по уровню 20. Если изображения концов пузырька ампулы не совпадают, то необходимо добиться их совпадения путем перемещения скобы 6 боковой опоры.

8. Вывернуть верхние упоры скоб 6 и 13.

9. Произвести окончательную балансировку изделия на стенте в наклонном положении. Подбирая массу гирь на IV грузовой площадке, добиться такого положения, когда при совпадении изображений концов пузырька ампулы уровня 20 боковая сферическая опора стола стента будет опираться на нижнюю опору скобы 6, а при снятии контрольного груза P_k с грузовой площадки II состояние равновесия нарушится и боковая сферическая опора стола стента упрется в верхний упор скобы 6.

10. Ввернуть верхние упоры скоб 6 и 13.

11. Зафиксировать массу гирь P_a^{IV} (см. рис. 13,б), расположенных на IV грузовой площадке.

12. Произвести расчет вертикальной координаты X центра масс изделия по формуле

$$X = \frac{(P_a^{IV} - P^{IV}) L}{G \operatorname{tg} \alpha} - H_n - h,$$

где X — вертикальная координата центра масс изделия, мм;

G — масса изделия, кг;

L — расстояние от оси центральной опоры стента до оси подвески грузовой площадки, мм;

$\operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона стола стента;

P_a^{IV} — масса гирь на IV грузовой площадке при наклонном положении стола стента, кг;

P^{IV} — масса гирь на IV грузовой площадке при горизонтальном положении стола стента, кг;

H_n — высота переходника, мм;

h — расстояние от оси качения верхней призмы центральной опоры стента до базовой плоскости стола стента, мм.

Операции определения координат центра масс проводятся три раза. По полученным результатам рассчитываются средние арифметические значения координат X_{cp} , Y_{cp} , Z_{cp} ЦМ изделия.

1.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Расчеты и опыт балансировки показывают, что применение сравнительно сложных балансировочных стенов с гидростатической опорой целесообразно при определении на одном стенде центра масс изделий различного веса с высокой точностью.

При определении на стенде центра масс изделий приблизительно одинакового веса проще оборудовать его тензометрическими силоизмерительными датчиками электротензометрических весов (рис. 14). Для секций крупногабаритных изделий целесообразно с целью экономии площади и затрат на оборудование определение положения центра масс производить на сборочных стендах. При этом необходимо в сборочные стенды встроить тензометрические датчики или аналогичные им, предназначенные для дистанционного измерения нагрузок. В качестве вторичного прибора может быть применена система тензометрического взвешивания.

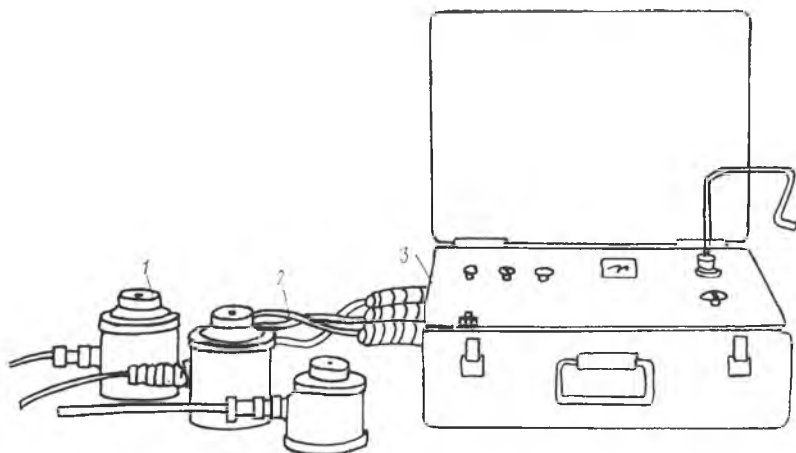


Рис. 14. Электротензометрические весы ЭВ с подключенными датчиками:
1 — тензодатчик, 2 — кабели, 3 — регистрирующий прибор

Датчики состоят из упругого элемента с мостом проволочных преобразователей. Появляющийся под действием взвешиваемого груза разбаланс моста измеряется вторичным прибором, который

осуществляет цифровую или диаграммную регистрацию и суммирует показания отдельных датчиков.

Конструкция датчика С-50 показана на рис. 15. В круглом корпусе 4, выполненном из прочной стали, в верхней части расположена выступающая опора 1, центрируемая диафрагмой 2. Опора сферической частью опирается на пяту 5, которая также центрируется диафрагмой 3. Пята упирается в чувствительный элемент 6, закрепленный на основании 7 корпуса. Чувствительный элемент электрическими проводами 8 через ШР 9 соединяется со вторичным

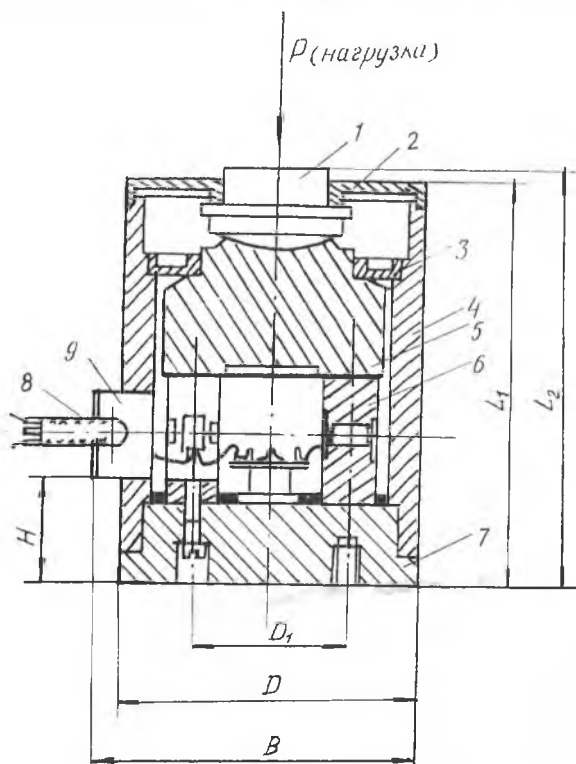


Рис. 15. Тензометрический силонизмерительный датчик

прибором. Погрешность определения реакции с помощью этих датчиков не превышает 0,3% от верхнего предела измерения.

Относительная погрешность взвешивания или определения реакции равняется

$$\frac{0,3 P_{\max}}{P},$$

где P_{\max} — верхний предел измерения датчика;
 P — измеряемая нагрузка.

Точность определения координат центра масс зависит от расположения опор. При расположении трех опор с силовыми измерительными элементами по окружности радиуса r величина ошибки приблизительно пропорциональна величине радиуса. Поэтому следует располагать опоры как можно ближе к теоретической оси, а точнее, к линии действия равнодействующей сил масс секций изделий.

Исходя из этого, ниже рассматриваются три схемы расположения опор, которые могут быть практически применены для определения центра масс крупногабаритных секций:

1. Опоры расположены снизу относительно секции на окружности отверстий или направляющих штырей стыковочного шпангоута.

2. Силовыми измерительными датчиками расположены выше секции и встроены в подъемную траверсу универсального кантователя.

3. Датчики встроены в специальные траверсы.

Первая и вторая схемы из-за большой величины r не могут обеспечить высокую точность определения координат центра масс. Балансировка по третьей схеме может повысить точность определения центра масс примерно в 3—5 раз.

Рассмотрим ориентировочный расчет погрешности определения координат центра масс на примере одной секции изделия для различных условий балансировки.

Определение координат центра масс на сборочных стендах.
 Схема расположения изделий и тензодатчиков показана на рис. 16. Как видно из рисунка, при определении координат центра масс в плоскости стыкового шпангоута изделие устанавливается верти-

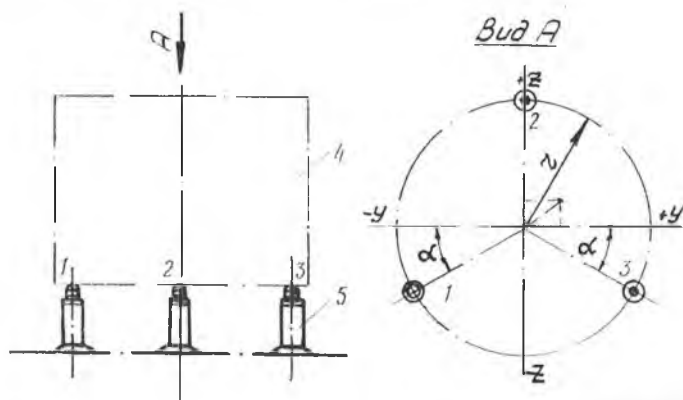


Рис. 16. Схема расположения изделия и тензодатчиков.
 1, 2, 3, — датчики, 4 — изделие, 5 — колонны опорные

кально в сборочном стенде и опирается на три тензометрических силонизмерительных датчика, расположенных на окружности с радиусом r и шагом по окружности, соответствующим центральному углу 120° .

При точном определении реакций опор координаты центра масс рассчитываются по формулам:

$$Y = \frac{R_2 r \cos \alpha - R_3 r \cos \alpha}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad (1.19)$$

$$Z = \frac{R_1 r - R_2 r \sin \alpha - R_3 r \sin \alpha}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad (1.20)$$

где R_1, R_2, R_3 — соответственно величины реакций в точках расположения датчиков;

α — угол между направлением теоретической оси координат и направлением положения датчиков 2 и 3.

Действительное значение реакции отличается от измеренного на величину погрешности Δ_i . Если в формулу (1.19) подставить возможные значения реакций $R (1 \pm \Delta)$, получается величина координаты с погрешностью ΔY .

Например,

$$Y + \Delta Y = \frac{r \cos \alpha [(R_2 \pm R_2 \Delta_2) - (R_3 \pm R_3 \Delta_3)]}{(R_1 + R_1 \Delta_1) + (R_2 + R_2 \Delta_2) + (R_3 + R_3 \Delta_3)},$$

отсюда

$$\Delta Y = (Y + \Delta Y) - Y.$$

Если принять, что $R_1 = R_2 = R_3$ и $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta$, то преобразования дадут формулу для расчета погрешности:

$$\Delta r = \sqrt{\Delta Y^2 + \Delta Z^2}. \quad (1.21)$$

Для рассматриваемого конкретного случая принимается отсек с диаметром окружности размещения датчиков $D = 2r = 10\,000$ мм. Грузоподъемность датчиков — $80 \cdot 10^3$ кг.

Ошибка определения координат обусловлена воздействием нескольких факторов и может быть подсчитана как сумма нескольких составляющих, каждая из которых получается от действия одного из них.

Рассмотрим в отдельности основные погрешности, а затем определим суммарную.

Первая погрешность определения реакции при использовании 80-тонного датчика, как указывалось выше, равна 0,3%.

В этом случае ошибка определения положения центра масс

$$\Delta r_1 = \frac{2rn}{300-n}, \quad (1.22)$$

где r — радиус окружности расположения датчиков;

n — погрешность измерения реакции, %.

Приведенное выражение получено из условия, принятого для расчета погрешностей весов, заключающегося в том, что силы трения, неточность рычагов и других размеров компенсируются смещением центра масс на некоторую величину, являющуюся ошибкой.

Подставляя в формулу (1.22) значения радиуса, получим величину первой составляющей погрешности положения центра масс:

$$\Delta r_1 = \frac{10\,000 \cdot 0,3}{300 - 0,3} = 10 \text{ мм.}$$

В расчете предполагается, что масса изделия определяется теми же датчиками как сумма трех реакций ($G_{\text{изд}} = R_1 + R_2 + R_3$).

Вторая погрешность определения координат центра масс вызывается трением в месте контакта сферической поверхности упругого элемента датчика и равна по величине коэффициенту трения качения (составляет для стальных элементов $\Delta r_2 = 0,01 - 0,03$ мм).

Третья погрешность определения положения центра масс изделия связана с отклонением оси изделия от вертикали и определяется способом контроля. При контроле теодолитом ТБ-1 ошибка, вызванная отклонением изделия от вертикального положения, составит $\Delta r_3 = 0,5$ мм.

Четвертая погрешность связана со смещением точки приложения силы на датчике в случае наклона отсека: $\Delta r_4 = 0,02$ мм.

Пятая погрешность определяется в зависимости от величины силы трения между чувствительным элементом и корпусом датчика: $\Delta r_5 \cong 0,05$ мм.

И, наконец, шестая погрешность связана с неточностью расположения датчиков относительно оси изделия. Ориентировочно величина этой ошибки может быть принята $\Delta r_6 = 2 - 3$ мм.

Зная составляющие погрешности, можно, суммируя их, найти максимально возможную погрешность определения положения центра масс отсека:

$$\begin{aligned} \Delta r &= \Delta r_1 + \Delta r_2 + \Delta r_3 + \Delta r_4 + \Delta r_5 + \Delta r_6 = \\ &= 10,0 + 0,03 + 0,5 + 0,02 + 0,05 + 3,0 = 13,6 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Вышеприведенные значения ошибки определения центра масс являются максимальными, которые возможны лишь в крайне неблагоприятном случае, когда все составляющие имеют одинаковое направление. В действительности ошибка может быть несколько меньше.

Определение центра масс с помощью подъемных траверс. Для определения центра масс с помощью траверс с встроенными в них датчиками может быть предложено две схемы. Одна из них изображена на рис. 17. При этом координата Z определяется по формуле $Z = \frac{l(R_2 - R_1)}{G_{\text{изд}}}$, а координата Y по формуле $Y = \frac{G_r l_r}{G_{\text{изд}}}$.

Здесь R_1 и R_2 — реакции в местах подвески; l — плечо до центра масс; G_r — масса гирь, расположенных на площадке 4; l_r — плечо установки гирь относительно центра масс.

Вертикальное положение изделия в момент равновесия определяется реперными точками,

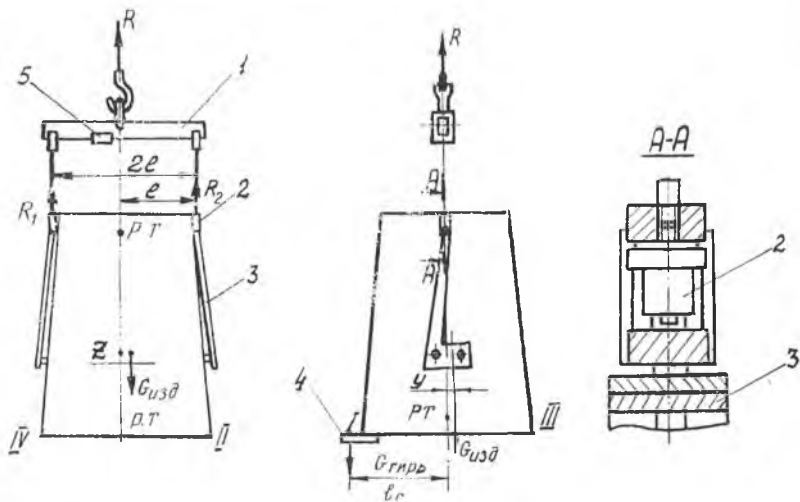


Рис. 17. Схема определения центра масс с помощью подъемной траверсы: 1 — траверса, 2 — датчики, 3 — рама, 4 — площадка для гирь, 5 — груз подвижной

В этом случае точность определения координаты Z не выше, чем предыдущим методом, так как расстояние l почти такое же, как радиус r в случае установки датчиков в сборочных стендах. Координата Y будет определена точнее. Однако даже если эта ошибка будет очень мала, суммарная ошибка Δr уменьшится всего на 30%.

Этот процесс определения положения центра масс менее удобен, чем в сборочных стендах.

Определение центра масс с помощью специальных траверс. Этот процесс и определение погрешности метода при определении положения центра масс рассмотрим применительно к тому же отсеку, что и при балансировке в сборочном стенде.

В траверсе (рис. 18) встроены силоизмерительные датчики на окружности радиуса $r = 600$ мм, что значительно меньше диаметра изделия. Остальные данные аналогичны балансировке в сборочном стенде.

Установка вертикальности секции может осуществляться или специальными подвижными грузами, или с помощью дополнитель-

ных лебедок. Точность установки и проверки вертикальности такая же, как и на сборочном стенде. Однако трудоемкость этой операции больше.

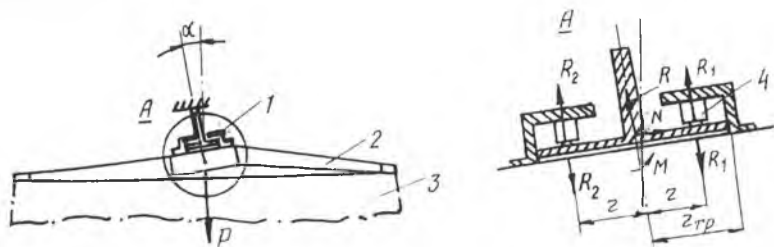


Рис. 18. Расчетная схема определения центра масс изделия специальной траверсой: 1 — крепление датчиков на траверсе, 2 — траверса, 3 — изделие, 4 — силовой измерительный датчик

В этом случае изменяется лишь величина ошибки Δr_1 , связанная с погрешностью определения реакции при 80-тонном датчике:

$$\Delta r_1 = \frac{2 r n}{300 - n} = \frac{2 \cdot 600 \cdot 0,3}{300 - 0,3} = 1,2 \text{ мм.}$$

Таким образом, ошибка, по сравнению с измерением координат центра масс на сборочном стенде, уменьшится на 8,8 мм.

Деформация рамы может внести дополнительную погрешность, которая отсутствует в случае установки датчиков в сборочном стенде. Суммарная погрешность определения положения центра масс изделия по этому способу $\Delta r \approx 7$ мм, что значительно ниже по сравнению с двумя вышеизложенными способами с использованием тензодатчиков.

1.9

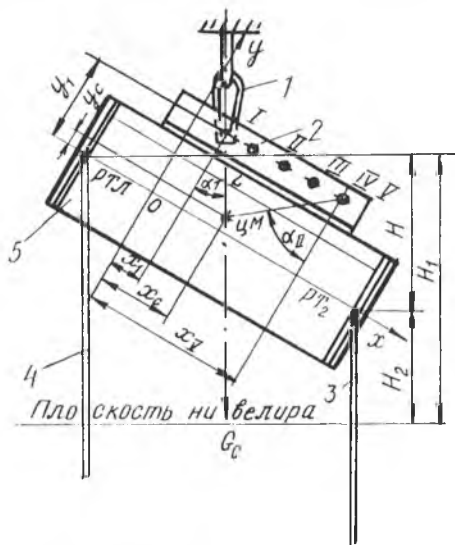
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС МЕТОДОМ ПОДВЕСКИ

Определение положения центра масс самолетов сравнительно небольшой массы ($G < 10 \cdot 10^3$ кг), имеющих продольную плоскость симметрии, может быть произведено методом подвески. Для этого летательные аппараты подвешивают не менее чем в двух точках и определяют положение плоскостей, проходящих через точку подвески и ЦМ. Точка пересечения этих плоскостей с плоскостью симметрии принимается за искомое положение ЦМ. Пренебрегаем отклонением положения ЦМ от плоскости симметрии.

Приспособление может быть выполнено либо в виде жесткой балки с гнездами для попеременного закрепления узла подвески, либо в виде балки с непрерывным перемещением точки

подвески. Возможно определение центра масс путем подвески системы ЛА с приспособлением в одной точке и измерения угла наклона системы в результате подвески дополнительных грузов.

Для определения положения центра масс ЛА или его части применяется приспособление с несколькими фиксированными точками подвески (рис. 19). Приспособление состоит из серьги 1,



соединенной с кран-балкой, подъемной балки 2, жестко закрепляющейся на изделии 5, и нивелировочных линеек 3 и 4. Балка 2 имеет ряд отверстий, точно закоординированных относительно ее опорных точек; серьга подвески легко переставляется из одного отверстия в другое.

Для расчета координат ЦМ системы X_c и Y_c (самолет + центrovочная балка) достаточно знать значения двух углов наклона оси ЛА к горизонту и соответствующие координаты двух отверстий подвески (см. рис. 19). Для контроля правильности нивелировок и увеличения точности расчет ведут не менее чем по двум парам точек подвесок. При этом после определения H применяют различные методы: аналитический расчет координат ЦМ системы с последующим пересчетом положения ЦМ самолета (агрегата), расчет с помощью номограмм [1].

Аналитический расчет ведут по формулам:

$$X_c = \frac{x_i \lg a_i - x_j \lg a_j}{\lg a_i - \lg a_j}; \quad (1.23)$$

$$Y_c = \frac{x_j - x_i}{\lg a_i - \lg a_j} + Y_k, \quad (1.24)$$

где x_i, x_j — i -е и j -е положения точки подвески балки;

Y_k — расстояние от продольной оси ЛА до линии, на которой расположены точки подвески;

a_i, a_j — углы наклона продольной оси самолета к горизонту при подвеске за i -е или j -е отверстия на балке.

Углы a_i, a_j определяются как $\arcsin H/L$, где L — расстояние между осями подвески линеек, расположенных либо в плоскости

строительной горизонтали фюзеляжа (СГФ), либо в параллельной ей; H — разность отсчетов превышения реперных точек по шкалам линеек, произведенных с помощью нивелира, оптическая ось визирной трубы которого расположена в горизонтальной плоскости.

Технологический процесс центровки ЛА или его части состоит из следующих этапов:

- подготовка оборудования и документации к проведению работы;
- подготовка ЛА и участка в цехе к проведению работы;
- установка центровочного механизма на ЛА;
- регулировка и окончательное крепление центровочного механизма на ЛА;
- взвешивание ЛА;
- производство замеров H_1 , H_2 ;
- расчет координат ЦМ;
- снятие механизма.

Первый и второй этапы характерны для работ по определению ЦМ любым методом. Точность определения координат ЦМ зависит от установки центровочного механизма. Взвешивание ЛА с центровочным механизмом, как правило, достаточно производить на платформенных весах, имеющих погрешность примерно $0,001 G$, где G — масса взвешиваемого объекта.

Порядок замеров для расчета координат ЦМ следующий:

1. Устанавливают серьгу подвески изделия за одно из отверстий балки. Как уже говорилось, координаты точки подвески известны.

2. Осторожно поднимают изделие с помощью крана.

3. Транспортируют изделие к участку, огороженному флажками и с установленным нивелиром. После прекращения колебаний изделия измеряют угол его наклона по разности отсчетов по передней и задней линейкам, подвешенным на поясах.

4. Соблюдая меры предосторожности, опускают изделие на ложементы и переставляют серьгу на новое отверстие (см. п. 1).

Для контроля точности измерения угла наклона ЛА производят замеры по двум и трем парам точек подвески.

1.10

ВЗВЕШИВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС САМОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ ТРЕХ ВЕСОВ

Рассмотрим кратко порядок технологического процесса.

1. Подготовка изделия к взвешиванию.

Машина взвешивается с полным комплектом оборудования, входящим в пустую массу, без топлива и масла. Перед взвешива-

нием изделие полностью расчехляется, тщательно осматривается и очищается от всех посторонних предметов, снимаются крышки с воздухозаборников и выхлопных труб.

2. Взвешивание изделия на рычажных весах (рис. 20).

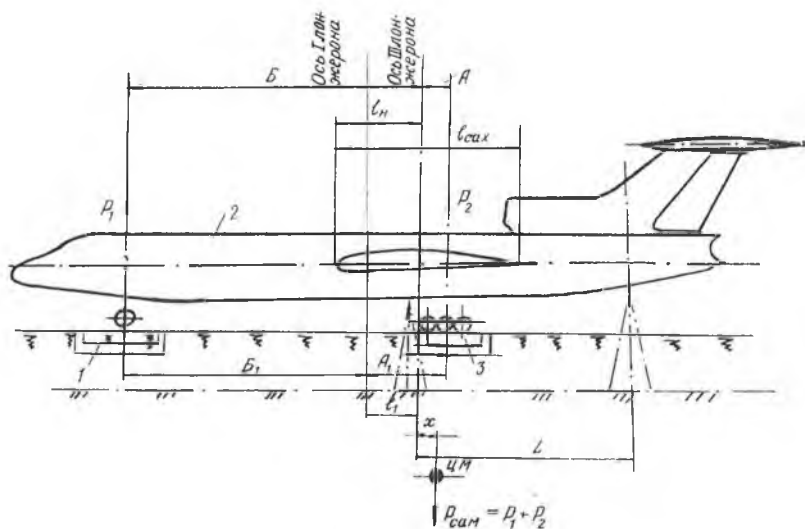


Рис. 20 Схема определения центровки самолета: 1,3—весы; 2—изделие

Перед взвешиванием проверяются рычажные механизмы весов и нулевое положение.

Затем самолет накатывается на весы, устанавливается в горизонтальное положение и взвешивается. Общая масса самолета определяется по сумме реакций трех весов, на которые опираются передняя и задние стойки шасси:

$$P_{сам} = P_1 + P_2,$$

где $P_{сам}$ — общая масса машины, кг;

P_1 — показания весов носового колеса, кг;

P_2 — показания весов основных колес, кг.

Допуск на массу пустой машины $\pm 1\%$.

3. Определение положения центра масс самолета.

Положение центра масс изделия определяется по оси X относительно базовой линии, например, оси заднего III лонжерона центроплана. Для определения центра масс необходимо измерить расстояние A от оси вращения тележки главных ног шасси до линии оси заднего лонжерона и расстояние B от оси вращения колес передней стойки до базовой линии.

Положение центра масс машины относительно оси заднего лонжерона определяется по формуле

$$X = \frac{P_2 A - P_1 B}{P_{\text{сам}}} . \quad (1.25)$$

Затем подсчитывается положение центра масс изделия, приведенного к составу эталонной массы (полной массы), относительно оси заднего лонжерона центроплана по формуле

$$X_{\text{этал}} = \frac{P_{\text{сам}} X_1 + \sum P_i l_i - \sum P_k l_k}{P_{\text{сам}} + \sum P_i - \sum P_k} , \quad (1.26)$$

где P_i — грузы недостающего оборудования, кг;

P_k — грузы излишнего оборудования, кг;

l_i — координаты недостающих грузов относительно оси заднего лонжерона центроплана, мм;

l_k — координаты излишних грузов относительно оси заднего лонжерона центроплана, мм.

И, наконец, подсчитывается положение центра масс самолета, приведенного к составу эталонной массы, относительно начала средней аэродинамической хорды по формуле

$$\bar{X} = \frac{X_{\text{этал}} + l_{\text{сax}}}{l_{\text{сax}}} 100\% ,$$

где $l_{\text{сax}}$ — длина средней аэродинамической хорды (САХ);

$l_{\text{н}}$ — расстояние от носка САХ до базовой линии оси III лонжерона.

1.11

ВЕСОВАЯ БАЛАНСИРОВКА ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ

Весовая балансировка органов управления обеспечивает безопасность изделия от элеронных и рулевых форм флаттера. Органы управления балансируются со всеми деталями, указанными в чертежах. Доведение момента перебалансировки до требуемой величины осуществляется съемными контргрузами.

Балансировка производится на стенде, который имеет приспособление для установки органа управления в горизонтальное положение на двух соосных опорах с подшипниками качения. Вращение балансируемых органов управления на опорах стенда должно быть свободным. При наличии в подшипниках опор неустраняемого трения его влияние на точность определения величины перебалансировки исключается тем, что расстояние от оси вращения органа управления до центра масс балансировки гири l определяется по формуле (рис. 21).

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} .$$

где l_1 — расстояние от оси вращения органа управления до центра масс балансирующей гири, передвигаемой от хвостика к носку, в момент начала движения хвостика вверх (при первоначальном положении органа управления в линии полета);

l_2 — расстояние от оси вращения органа управления до центра масс балансирующей гири, передвигаемой от носка к хвосту, в момент начала движения хвостика вниз (при первоначальном положении органа управления в линии полета).

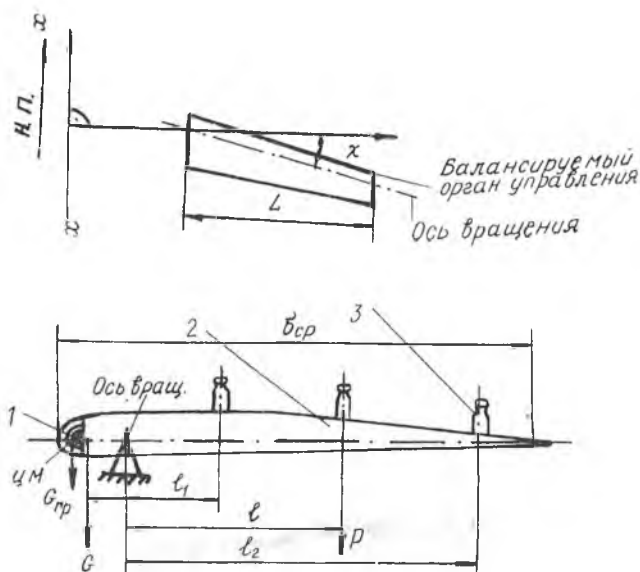


Рис. 21. Схема балансировки органов управления: 1 — груз балансирующий, 2 — контролируемый агрегат, 3 — груз контрольный, Н.П. — направление полета

Момент перебалансировки определяется из условия равновесия:

$$M = Pl = G \cdot a, \quad (1.27)$$

где G — масса балансируемого органа управления вместе с балансирами, кг, $G = G_{ор} + G_{бал}$;

$G_{ор}$ — масса балансируемого органа управления;

$G_{бал}$ — масса балансиров (грузов);

P — масса балансирующей гири, с помощью которой проводится балансировка, кг;

$\pm a$ — расстояние от оси вращения органа управления до центра масс,

$$a = \frac{Pl}{G} \quad (1.28)$$

Знак «—» означает, что центр масс лежит впереди оси вращения, а знак «+» — сзади оси вращения.

Обычно задается допустимая величина перебалансировки, отнесенная к средней хорде, $\sigma = \frac{a}{b_{\text{ср}}} 100\%$, где $b_{\text{ср}}$ — средняя хорда органа управления. Величина $b_{\text{ср}}$ определяется из выражения

$$b_{\text{ср}} = \frac{S}{L} \cos \chi,$$

где S — теоретическая площадь органа управления, см^2 ;

L — размах органа управления, см ;

χ — угол стреловидности оси вращения органа управления.

Значения величины перебалансировки должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 2, в которой для примера приведены данные для самолета Ту-154. Балансировка производится с помощью изменения величины балансировочных грузов $G_{\text{бал}}$, которые в виде специальных плит (пластин), сегментов из чугуна закрепляются в носовой части органа управления.

Таблица 2

Требуемые значения величины перебалансировки элеронов и рулей высоты самолета Ту-154

Органы управления	Измеряемые величины					
	Масса G , кг	Момент перебалансировки $M = Pl$, кг·см	Расстояние от оси вращения до ЦМ $a = \frac{Pl}{G}$, см		Средняя хорда $b_{\text{ср}}$, см	Величина перебалансировки $\sigma = \frac{a}{b_{\text{ср}}} 100$, %
Элероны	66	— 99,6 — 124,8	—1,51	—1,89	75,5	—2 — 2,5
Рули высоты	82,2	—169,5 — 179,0	—2,06	—2,18	59	—3,5 — 3,7

2

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАССОВЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ

(динамическая балансировка)

Управляемость ЛА в полете в значительной мере определяется величиной и точностью размещения масс относительно главных осей вращения. Как известно из механики, моменты сил, обеспечивающие повороты изделия, равны произведению момента инерции тела I на угловое ускорение ε , т. е. $M = I\varepsilon$.

Из формулы видно, что угловое ускорение, сообщаемое телу вращающим моментом, зависит от момента инерции. Моменты инерции относительно различных осей тела необходимо также определять при контроле правильности распределения масс материальных объектов. В особенности это относится к производству ЛА с высокими скоростями полета, к которым предъявляются строгие требования по обеспечению динамической балансировки (распределению масс относительно осей вращения).

Дадим некоторые основные понятия и определения.

Моментом инерции твердого тела относительно оси называется мера инерции* этого тела при вращательном движении вокруг данной оси.

Массовый момент инерции зависит от положения оси и от распределения массы в теле.

Математический момент инерции тела относительно оси, проведенной в теле или вне его, выражается суммой произведений массы m_k каждой материальной частицы на квадрат расстояния r_k ее от данной оси:

$$I = \sum_{k=1}^n m_k r_k^2. \quad (2.1)$$

* Инерция — свойство тел быстрее или медленнее изменять свою скорость под действием сил.

Если тело отнесено к прямоугольным координатным осям, то согласно уравнению (2.1)

$$\begin{aligned} I_x &= \sum_{\kappa=1}^n m_{\kappa} (Y_{\kappa}^2 + Z_{\kappa}^2); \\ I_y &= \sum_{\kappa=1}^n m_{\kappa} (X_{\kappa}^2 + Z_{\kappa}^2); \\ I_z &= \sum_{\kappa=1}^n m_{\kappa} (X_{\kappa}^2 + Y_{\kappa}^2). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Моменты инерции тела относительно осей всегда положительны.

Под центробежным моментом инерции тела понимают сумму произведений массы каждой материальной частицы твердого тела на две координаты этой частицы в прямоугольной системе осей:

$$\begin{aligned} I_{y,z} &= \sum_{\kappa=1}^n m_{\kappa} Y_{\kappa} Z_{\kappa}; \\ I_{z,x} &= \sum_{\kappa=1}^n m_{\kappa} Z_{\kappa} X_{\kappa}; \\ I_{x,y} &= \sum_{\kappa=1}^n m_{\kappa} X_{\kappa} Y_{\kappa}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Центробежные моменты инерции (ЦМИ) могут быть положительными, отрицательными и равняться нулю. ЦМИ имеют значение при динамическом уравнивании вращающихся тел. Статическое уравнивание требует, чтобы центр масс лежал на оси вращения. Динамическое уравнивание требует дополнительно, чтобы при вращении тела центробежные силы сводились только к главному вектору.

Знание центробежных моментов инерции необходимо для анализа движения тела со многими степенями свободы, к которым относится ЛА II, в частности, для нахождения так называемых главных осей инерции.

Если центробежный момент инерции тела относительно оси вращения равен нулю, то и главный момент центробежных сил инерции равен нулю.

Всякую ось, при вращении около которой тела главный момент центробежных сил инерции равен нулю, называют главной осью инерции тела.

Через каждую точку пространства можно провести три главные оси инерции данного тела. Главные оси взаимно перпендикулярны.

В этой системе осей центробежные моменты инерции тела равны нулю.

Моменты инерции тела относительно главных осей называют главными моментами инерции.

Главные оси инерции, проходящие через центр масс тела, называют главными центральными осями инерции тела.

Моменты инерции тела относительно главных центральных осей инерции называют главными центральными моментами инерции тела, они имеют минимальное значение.

Динамическая балансировка летательного аппарата заключается в определении центробежных моментов инерции изделия и положения главных центральных осей инерции относительно конструктивных с последующей ее корректировкой или без нее.

Динамическая балансировка проводится после точной статической балансировки.

Устранение дисбаланса связано с установкой внутрь летательного аппарата уравнивающих грузов или временным демонтажом некоторых узлов.

В отличие от статической балансировки грузы крепятся не на одном шпангоуте, а на двух во взаимно противоположных точках, расположенных на некотором расстоянии H вдоль продольной оси.

При динамической балансировке определяют величину грузов, которая должна зависеть от величины начального разбаланса и от положения их установки по радиусу и расстоянию H между ними по продольной оси изделия.

Динамическая балансировка — это сложный технологический процесс. Обороты изделия при балансировке должны быть близкими к эксплуатационным.

Допуски на динамическую неуравновешенность летательного аппарата должны основываться на расчетах, учитывающих характер полета и класс летательного аппарата: траекторию и стабилизацию, жесткость, габариты, параметры двигательной установки и инерционные характеристики изделия. Технология изготовления летательного аппарата должна учитывать и обеспечивать требования по уравниванию. Допуски на отклонение положения главных центральных осей расчетного положения должны быть $(0,1—0,3)^\circ$ для небольших изделий (масса до $1 \cdot 10^3$ кг) и $(2—4)^\circ$ — для крупногабаритных изделий.

Значительное отклонение положения главных центральных осей от расчетного приводит к ухудшению летных характеристик, усложняет систему ориентации, увеличивает массу и мощность двигательной установки.

Определение моментов инерции собранных изделий осуществляется опытным путем на специальных стендах различными методами [2].

Рассмотрим только два наиболее распространенных:

метод наблюдения ускорения падающего груза, приводящего

во вращательное движение проверяемое изделие (метод падающих грузов);

метод свободных крутильных колебаний изделия.

Первый метод применяется для тяжелых изделий, второй — для легких.

2.1

МЕТОД НАБЛЮДЕНИЯ УСКОРЕНИЯ ПАДАЮЩЕГО ГРУЗА

Этот метод осуществляется на специальном стенде. Он обеспечивает вращательное движение контролируемого изделия и замер тангенциальных ускорений. Момент инерции изделия определяется последующим расчетом. Этот расчет основан на решении общего уравнения движения изделия (тела). Как известно, согласно принципу Даламбера внешние силы, в нашем случае силы веса двух грузов $2 P_{гр}$, реакций связи (сила трения в подшипниках платформы) и внутренние силы инерции всех материальных частиц изделия, вращающихся частей стенда, подвижных частей кареток и блоков (роликов) уравновешиваются.

Дифференциальное уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси имеет вид

$$I_x \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \Sigma m_x (\bar{F}), \quad (2.4)$$

где I_x — момент инерции вращающегося тела относительно оси;

$\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ — угловое ускорение вращающегося тела;

$\Sigma m_x (\bar{F})$ — сумма моментов всех действующих сил относительно оси X .

Уравнение (2.4) можно записать так:

$$I_x \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - \Sigma m_x (\bar{F}) = 0. \quad (2.5)$$

Приводя крутящие моменты и моменты сопротивления к оси вращения, получим

$$2 P_{гр} R - I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - 2 \frac{P_{гр}}{g} R^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - 2 \frac{P_k}{g} R^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - M_{тр} = 0, \quad (2.6)$$

где $P_{гр}$ — вес одного приводного груза;

R — плечо пары, образованной грузами;

I — момент инерции системы «объект + переходник + платформа»;

P_k — масса каретки датчика линейных перемещений;

$\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ — угловое ускорение вращающегося изделия;

$M_{тр}$ — момент сопротивления, включающий в себя трение в опо-

рах, блоках, инерцию блоков, сопротивление кареток и т. д.

Заменяв в уравнении (2.6) $\frac{d^2 \tau}{dt^2}$ на $\frac{W\tau}{R}$, определим из него величину момента инерции системы:

$$I = \frac{2 P_{гр} R^2 - M_{гр} R}{W\tau} - \frac{2 R^2}{g} (P_{гр} + P_{к}), \quad (2.7)$$

где $W\tau$ — тангенциальное ускорение изделия или ускорение груза, замеренное датчиком линейных перемещений.

Так как момент инерции системы I включает в себя моменты инерции изделия $I_{изд}$, переходника $I_{перех}$ и платформы $I_{платф}$, то момент инерции изделия относительно оси X определяется так:

$$I_{изд} = I - (I_{перех} + I_{платф}). \quad (2.8)$$

$I_{перех}$ и $I_{платф}$ могут быть замерены заранее по аналогичной методике.

Рассмотрим конструкцию и работу стенда для измерения моментов инерции.

Конструкция и работа стенда СИМИ-1. Техническая характеристика стенда СИМИ-1:

масса изделия: максимальная — 30 000 кг, минимальная — 2000 кг;

тип датчика перемещений груза — ДПЛ-10, фотоэлектрический;

погрешность отсчета перемещения — $\pm 0,015$ мм на длине 100 мм;

наибольшая скорость перемещения груза — 200 мм/с;

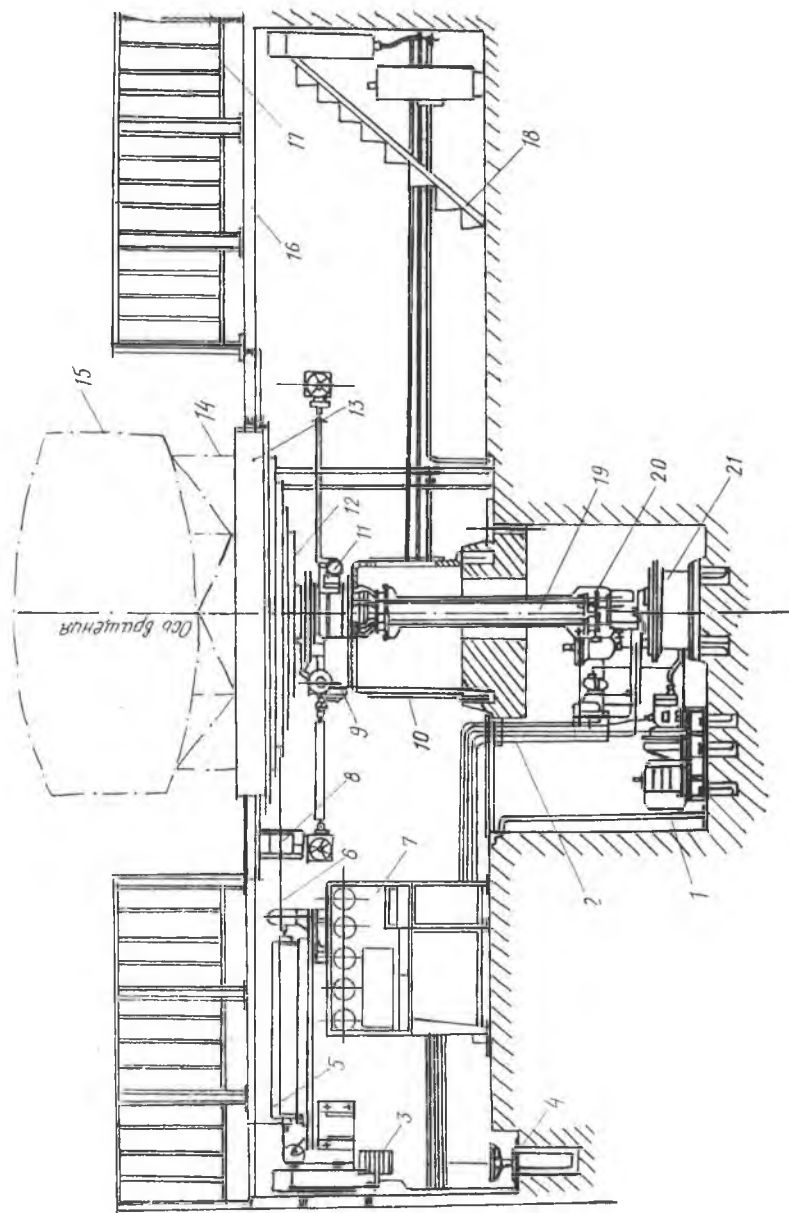
максимальный угол поворота изделия — 90° ;

максимальный крутящий момент от груза — 30 000 кгс·см;

диаметр платформы — 3000 мм;

максимальная погрешность определения моментов инерции — $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Общий вид стенда представлен на рис. 22. Поворотная платформа 13 служит для установки изделия 15 с переходником 14 и вращения его относительно оси, совмещенной с вертикальной осью вращения стенда. Вращение платформы осуществляется с помощью двух падающих грузов 3, которые через приводной канат 6 и систему роликов 8 соединены с многоступенчатым шкивом 12. Платформа опирается на вертикальную стойку 19 с поворотной колонной. Для подвода масла к упорному 21 и вертикальным 20 подшипникам на стенде имеется насосная станция 1 с гидросистемой 2. Для привода колонны 19 и возврата платформы в исходное положение имеются двигатели 9 и 11, расположенные на литой колонне 10. В конце рабочего хода грузы опускаются на гидроопо-



Р и с. 22. Конструктивная схема стелда СИМИ-1

ры 4. Для замера линейных ускорений на стенде имеется датчик линейных перемещений 5 — ДПЛ-10 с цифровой трехзначной системой регистрации перемещений (ЦТСРП). Кроме того, для обеспечения нормальной работы стенда имеются системы электрооборудования, пневмосистема и тормозная.

Управление работой стенда и контроль параметров отдельных систем осуществляется с помощью пульта управления 7. С целью удобства монтажа и эксплуатации стенда он располагается в углублении ниже уровня пола цеха. Для этого же, а также для обеспечения удобства и безопасности работ при установке измеряемого изделия применяется комплекс оргоснастки: настилы 16, ограждения 17, стремянки 18 и пр.

Более подробно с конструкцией отдельных узлов и их работой ознакомимся по кинематической схеме стенда СИМИ-1 (рис. 23).

Поворотная платформа представляет собой пустотелую плиту 9 с четырьмя фиксаторами. При помощи последних можно установить на платформе переходник 5 с изделием 6, совмещающий центр масс изделия с осью вращения платформы. Положение центра масс изделия должно быть определено предварительно на стенде статической балансировки.

Нижняя часть платформы выполнена в виде ступенчатого шкива 8 с шестью проточками различного радиуса. На каждой проточке закреплен упор с прорезью, в которую вставляется защелка приводного каната (троса) 4, проходящего через направляющие ролики 3, на которых подвешены падающие грузы 1.

В центральное отверстие платформы запрессована вертикальная стойка 21, установленная в радиальных гидростатических подшипниках 20, удерживающих стойку в центральном положении. На нижнем торце стойки закреплена каленая пластина 19, опирающаяся на шар 17 сферической гидростатической опоры, воспринимающей нагрузку на платформу.

Для уменьшения влияния трения на результаты определения момента инерции предусмотрена поворотная колонна 16. Она представляет собой полую стойку, которая своим нижним фланцем крепится к нижней сферической опоре 18. Стойка крепится в радиальном гидростатическом подшипнике 20, имеющем шесть карманов, к которым подводится масло.

На верхний торец поворотной колонны напрессован блок шестерен с лабиринтным уплотнением. Большая из шестерен 14 сцепляется с приводом поворота колонны 15, работающим от двигателя 13 с переменным числом оборотов. Поворотная колонна вращается в подшипниках, расположенных: в приводе поворота (верхний), в нижней опоре (нижний радиальный и упорный). Привод поворота 23 с редуктором 22 предназначен для возврата платформы после рабочего хода в исходное положение, стопорения плат-

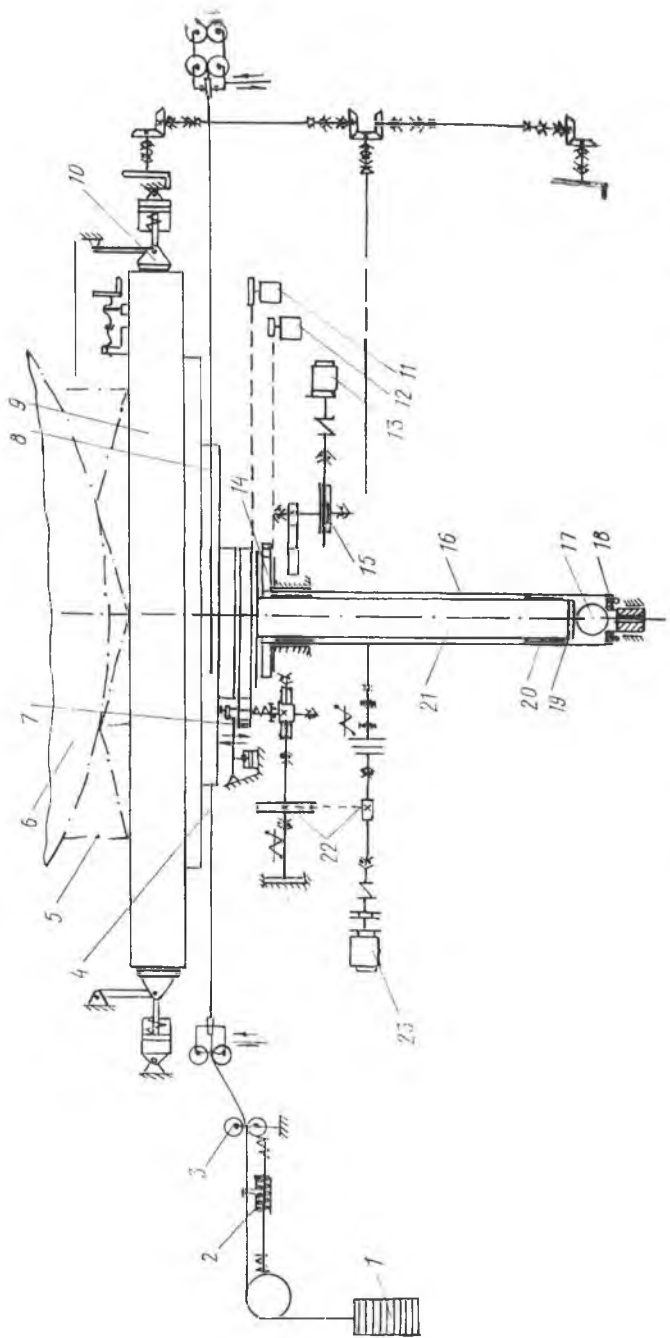


Рис. 23. Кинематическая схема стенда измерения моментов инерции типа СИМИН-1

формы в исходном положении. Приводы 11 и 12 служат для пуска на рабочий ход и выравнивания скоростей поворота платформы и поворотной колонны.

Гидросистема предназначена для подачи масла под высоким и низким давлением в подшипники платформы стенда.

Тормозная система предназначена для остановки вращения платформы с изделием после совершения рабочего хода и аварийной остановки в любой момент.

Колодки тормоза 10 снабжены накладками из армированной асбестовой пластины.

Пульт управления предназначен для управления всей работой стенда и представляет собой рабочий стол с установленными на нем вертикальной приборной панелью и наклонной панелью управления. На приборную панель выведены манометры, показывающие давление в полости всасывания, в гидроопорах, под опорой, давление управляющего воздуха.

В электрооборудование СИМИ-1 входят: электросхемы пульта управления, шкаф питания, соединительные кабели и исполнительные механизмы.

В нерабочем положении грузы должны быть опущены на гидротормоза. После установки изделия на платформу и включения стенд готов к проведению измерения.

Измерение производится в следующем порядке.

При нажатии на кнопку «Рабочий ход» включается реле. После включения реле включится электропневмоклапан и выведет фиксатор 7 (см. рис. 23) из зацепления с платформой, в результате чего платформа освободится от кинематической связи. Платформа под действием грузов приходит во вращение, в результате чего каретка ДПЛ 2 считывает импульсы и подает их на ЦТСРП.

В конце рабочего хода грузы опускаются на цилиндры гидросистемы и платформа затормаживается. Измерение окончено. Для проведения нового измерения необходимо вновь вернуть стенд в исходное рабочее положение.

Относительная погрешность определения моментов инерции по методу наблюдения падающего груза составляет примерно 0,4%.

2.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕВЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ МЕТОДОМ УНИФИЛЯРНОГО ПОДВЕСА

Унифиляром называется система, состоящая из упругого стержня и укрепленного на его конце тела, совершающего крутильные колебания вокруг оси, совпадающей с осью стержня (рис. 24). Метод унифилярного подвеса является достаточно точным. Для исключения боковых колебаний необходимо, чтобы ось стержня

была главной и центральной осью инерции всей системы.

Дифференциальное уравнение движения системы имеет следующий вид:

$$(I + I_{\text{п}} + I_{\text{прив}}) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + M = 0, \quad (2.9).$$

где M — восстанавливающий момент, обусловливающийся упругостью материала стержня;

I — момент инерции испытываемого тела;

$I_{\text{п}}$ — момент инерции переходника (приспособления);

$I_{\text{прив}}$ — приведенный момент инерции стержня, который учитывает влияние массы стержня на распределение его по длине.

При малых углах закручивания

$$M = -c\varphi.$$

Принебрегая вследствие малости приведенным моментом инерции, можно записать дифференциальное уравнение движения в более простом виде:

$$(I + I_{\text{п}}) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - c\varphi = 0. \quad (2.10)$$

В силу упругого гистерезиса $f = f_0 = \text{const}$.

$$\text{Частота колебаний } k = \sqrt{\frac{c}{I + I_{\text{п}}}}.$$

Период колебания системы относительно измеряемой оси

$$T = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \sqrt{\frac{I + I_{\text{п}}}{c}}, \quad (2.11).$$

отсюда для колебательной системы

$$I + I_{\text{п}} = \frac{c}{4\pi^2} T^2. \quad (2.12).$$

Жесткость стального стержня при кручении определяется по формуле

$$c = \frac{G I_p}{l},$$

где G — модуль упругости при сдвиге;

$$I_p \text{ — полярный момент инерции стержня, } I_p = \frac{\pi d^4}{32};$$

l — длина стержня;

d — диаметр стержня.

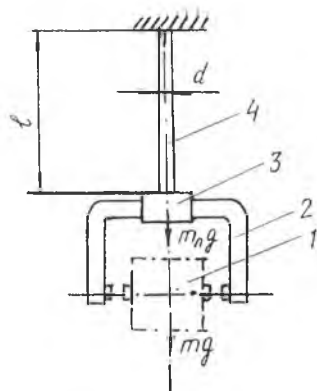


Рис. 24. Схема униформного подвеса: 1 — изделие, 2 — приспособление ориентирующее, 3 — подшипник, 4 — упругий стержень (униформ-торсион)

Осевой момент инерции одного приспособления (без изделия)

$$I_n = \frac{c}{4\pi^2} T_1^2, \quad (2.13)$$

где T_1 — период колебания приспособления без изделия относительно измеряемой оси.

Для тарировки стенда применяют специальные эталоны изделий, имитирующие размеры и массу изделия.

Момент инерции эталона определяется из уравнения (2.12):

$$I_3 = \frac{c}{4\pi^2} T_2^2 - I_n, \quad (2.14)$$

где T_2 — период колебания приспособления вместе с эталоном относительно измеряемой оси.

Момент инерции изделия относительно оси определяется по формуле

$$I = \frac{c}{4\pi^2} T_3^2 - I_n, \quad (2.15)$$

где T_3 — период колебания приспособления вместе с изделием относительно измеряемой оси.

Из уравнений (2.13) и (2.14) находим момент инерции приспособления:

$$I_n = I_3 \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2}. \quad (2.16)$$

Подставляя значение I_n (2.16) в (2.15), получим формулу для определения осевых моментов инерции через известный момент инерции эталона I_3 :

$$I = I_3 \frac{T_3^2 - T_1^2}{T_2^2 - T_1^2}. \quad (2.17)$$

Эта формула удобна для расчетов при использовании экспериментального метода.

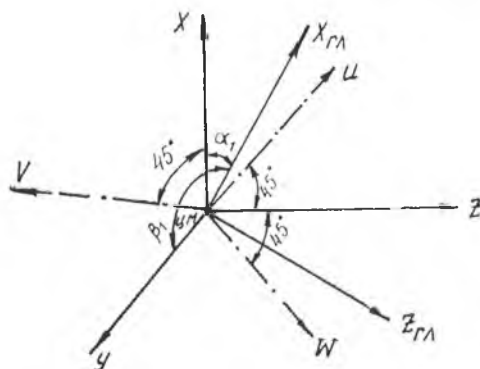


Рис. 25. Система координат тела для определения главных моментов инерции

Для определения центробежных, а затем и главных моментов инерции необходимо определить осевые моменты инерции относительно шести осей координат (рис. 25). Вначале определяются три момента инерции I_x , I_y , I_z изделия относительно взаимно перпендикулярных осей и три момента инерции I_u , I_v , I_w изделия относительно трех биссектрис, составляемых положительными направлениями

этих осей. При таком выборе осей координат центробежные моменты инерции выразятся простыми формулами:

$$\begin{aligned} I_{xy} &= \frac{I_x + I_y}{2} - I_v; \\ I_{xz} &= \frac{I_x + I_z}{2} - I_w; \\ I_{yz} &= \frac{I_y + I_z}{2} - I_w. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Зная моменты инерции и центробежные моменты инерции относительно координатных осей, можно вычислить главные моменты инерции.

Три главных момента инерции $I_{г1}$, $I_{г2}$ и $I_{г3}$ получаются из уравнения

$$\begin{vmatrix} I_x - I_{гk} & I_{xy} & I_{zx} \\ I_{xy} & I_y - I_{гk} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{yz} & I_z - I_{гk} \end{vmatrix} = 0. \quad (2.19)$$

Для определения главных направлений, т. е. для определения направляющих косинусов каждой из главных осей эллипсоида инерции, надо решить систему трех уравнений первого порядка относительно этих косинусов ($k = 1, 2, 3$):

$$\begin{aligned} (I_x - I_{гk}) \cos \alpha_{гk} - I_{xy} \cos \beta_{гk} - I_{zx} \cos \gamma_{гk} &= 0; \\ I_{xy} \cos \alpha_{гk} + (I_y - I_{гk}) \cos \beta_{гk} - I_{yz} \cos \gamma_{гk} &= 0; \\ I_{zx} \cos \alpha_{гk} - I_{yz} \cos \beta_{гk} + (I_z - I_{гk}) \cos \gamma_{гk} &= 0; \end{aligned} \quad (2.20)$$

Экспериментальное определение моментов инерции изделий методом унифилярной подвески в производстве осуществляется с помощью стенда СИМИ-6.

Конструкция стенда СИМИ-6 показана на рис. 26.

Технические характеристики стенда:

грузоподъемность — 500 кгс;

тип подшипника — аэростатический;

давление сжатого воздуха — $4-5 \cdot 10^5$ Па;

угол закрутки подвеса — $\pm 15^\circ$;

период колебаний — 3—10 с;

точность измерения колебания — 0,0001 с;

предельная относительная погрешность определения осевых моментов инерции — не $> 0,2\%$;

потребляемая мощность — 0,2 кВа;

габариты: длина — 4000 мм, ширина — 3000 мм, высота — 4500 мм.

На каркас стенда 13 установлен торсионный унифилярный подвес 8, предназначенный для создания восстанавливающего момента

та свободных крутильных колебаний. Подвес представляет собой калиброванную стальную проволоку 30ХГСА диаметром от 3 до 8 мм. Ось подвеса направляется аэростатическим радиальным подшипником 11. Это позволяет производить измерение осевых моментов инерции несбалансированных (статически или динамиче-

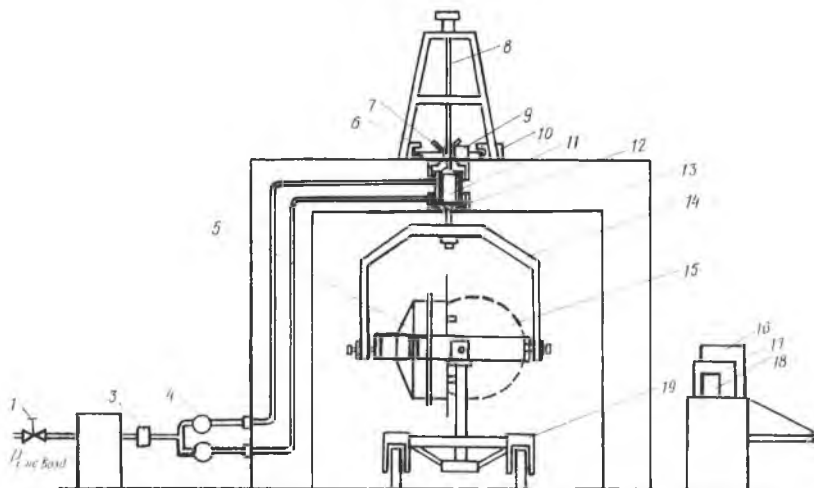


Рис. 26. Схема стенда измерения моментов инерции СИМИ-6

ски) тел и избегать маятниковых колебаний подвеса. В узле подшипника имеется пневматический цилиндр 12, предназначенный для фиксации оси подшипника в период установки и снятия изделия. К нижней части оси подшипника крепится приспособление—коромысло 14, в котором устанавливается корсет 5 с изделием 15. Конструкция коромысла 14 позволяет фиксировать корсет в любом угловом положении относительно одной из осей корсета. Транспортировка корсета с изделием или эталоном и установка его в коромысле осуществляется при помощи тележки 19. Закрутка торсионного подвеса производится вручную. Ограничение осуществляется при помощи рычага поворота платформы 7 и магнитов 9. Магниты установлены неподвижно на каркасе стенда. Рычаг может фиксироваться в различных угловых положениях от 0 до 15°. Измерение периода колебаний осуществляется оптическим датчиком 6 и шторкой, установленными на верхней части оси подшипника. В оптическом датчике для замера амплитуды колебаний имеется фотодиод 10, который освещается с помощью специальной оптической системы при определенном положении шторки. Электронная схема, в которую включается фотодиод, осуществляет запуск и выключение частотомера 16. Включение регистрирующей

системы производится на пульте управления 17. Работа стенда обеспечивается специальным электрическим оборудованием и пневматической системой. В электрооборудование входят: пульт управления стендом, кабельная сеть, панель управления электромагнитами, частотомер 18, обеспечивающий отсчет времени периода или суммы периодов колебания платформы системы. Отсчет полупериодов колебания платформы системы производится оптическим датчиком.

Пневматическая система стенда состоит из крана 1, отстойника 2, фильтра 3, регуляторов давлений 4 и служит для очистки воздуха, подвода к аэростатическому подшипнику 11 и для управления пневмоцилиндром 12.

Перейдем к рассмотрению процесса измерения осевых моментов инерции на стенде СИМИ-6. Перед началом измерений изделие должно быть взвешено ($G_{изл}$) и определены координаты центра масс ($X_{цм}$, $Y_{цм}$, $Z_{цм}$).

Методика измерения осевых моментов инерции заключается в следующем:

1. Изделие устанавливается в корсет, базируется по контрольной плоскости и закрепляется.

2. Подготавливаются и включаются пневмо- и электросистемы.

3. Изделие устанавливается в стенд.

4. Приспособление с изделием поворачивается относительно центра масс системы до совпадения положения оси (X , Y , Z , V , U , W) изделия, относительно которой измеряется момент инерции, с осью унифилярного подвеса.

5. Отключается механизм фиксации от аэростатического подшипника.

6. Производится закрутка унифилярного подвеса до соприкосновения подушечек платформы с узлами захвата.

7. Тумблером на пульте снимается напряжение с электромагнитов узлов захвата. Унифилярная подвеска начинает совершать свободные крутильные колебания под действием упругих сил стержня.

8. После того как платформа совершит два полных колебания, включается пульт управления электрическим частотомером. Периодически через каждые полупериоды производится засветка фотодиодов в датчиках целевого типа и сигнал поступает на электрический частотомер и цифровое табло.

9. В соответствии с выбранным режимом начинается контроль количества переходов колебаний изделия и замер времени 10 колебаний приспособления с изделием относительно заданного положения оси изделия.

10. По окончании последнего колебания счет времени прекра-

щается и с табло электрочастотомера снимаются данные по количеству колебаний, измерений и времени колебаний.

По данным замеров производится вычисление периода колебания приспособления с изделием относительно измеряемой оси по формуле

$$T_3 = \frac{\sum_1^n t_3}{jn}, \quad (2.21)$$

где t_3 — время 10 колебаний;

n — количество измерения ($n = 3$);

j — количество колебаний при одном измерении ($j = 50$).

Заранее на этапе тарировки стенда определяются необходимые исходные данные T_1 , T_2 , I_3 и погрешность измерения на стенде δI .

11. По полученным исходным данным вычисляется осевой момент инерции только одного изделия относительно измеряемого положения оси по формуле

$$I = I_3 \frac{T_3^2 - T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} + \delta I. \quad (2.22)$$

После определения осевых моментов инерции изделия по шести осям I_x , I_y , I_z , I_u , I_v , I_w производится расчет центробежных моментов инерции, а также расчет главных моментов инерции и определение положения главных осей инерции.

Точность измерения моментов инерции методом унифилярной подвески с использованием эталона δI определяется суммой квадратичных погрешностей, входящих в формулу (2.23). Основные погрешности, влияющие на точность определения моментов инерции, следующие:

δ_3 — ошибка вычисления момента инерции эталона ($\delta_3 = \delta I_3$);

δI_{T_1} , δI_{T_2} , δI_{T_3} — относительные ошибки, обусловленные неточностью измерения периодов колебаний приспособления, эталона, изделия; они равны удвоенным относительным ошибкам измерения этих периодов ($2 \delta T_i^2$).

Таким образом, среднеквадратическая относительная ошибка вычисления момента инерции в формуле (2.22)

$$\delta I = \sqrt{(\delta_3)^2 + 4(\delta T_1)^2 + 4(\delta T_2)^2 + 4(\delta T_3)^2 + (\delta a)^2}, \quad (2.23)$$

где δa — погрешность, связанная с изменением крутильной жесткости подвеса.

Как показывают данные ряда исследований [2], [3] и практические данные, метод унифиляра позволяет определять моменты инерции изделий с точностью до 0,05—0,25%.

В заключение рассмотрим пример динамической балансировки изделия, расчетная схема которого приведена на рис. 27.

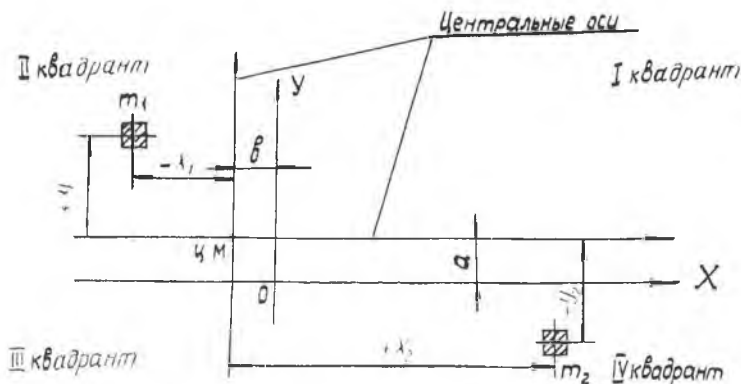


Рис. 27. Расчетная схема динамической балансировки в плоскости XOY

Условия для проведения динамической балансировки

$$I_{цб} + \Delta I_{цб} > I_{цб доп}, \quad (2.24)$$

где $I_{цб}$ — полученное значение центробежного момента инерции в результате измерения изделия на стенде;

$\Delta I_{цб}$ — ошибка определения на стенде;

$I_{цб доп}$ — допускаемое значение центробежного момента инерции изделия.

При выборе места для балансировочных грузов предполагается, что значение I_{xy} имеет отклонение от допуска (причем $I_{xy} > 0$). Для уменьшения имеющегося дисбаланса мы должны установить грузы, которые создавали бы такой же центробежный момент инерции (I'), но с обратным знаком:

$$I'_{xy} = -I_{xy},$$

где I_{xy} — центробежный момент инерции изделия, измеренный на стенде;

I'_{xy} — центробежный момент инерции изделия, созданный балансировочными грузами.

Так как $I_{xy} > 0$, то $I'_{xy} < 0$ и балансировочные грузы должны находиться во II и IV квадрантах. На схеме (см. рис. 27) X и Y обозначают направление строительных осей изделия; a и b — координаты центра масс в плоскости XY (XOY). Исходя из конструктивной компоновки, выбирают места установки балансировочных грузов. Координаты их будут относительно центральных осей — $X_1, Y_1, X_2, -Y_2$.

Отметим, что определение и расчет всех моментов инерции производится относительно центральных осей.

Рассмотрим порядок расчета масс балансировочных грузов m_1 и m_2 при компенсации I_{xy} .

Для расчета грузов составляются два уравнения (см. рис. 27):
 $|m_1 y_1| - |m_2 y_2| = 0$ — условие сохранения положения ЦМ по оси Y ;
 $|m_1 x_1 y_1| + |m_2 x_2 y_2| = |I'_{xy}|$ — условие получения необходимого центробежного момента инерции.

Решая систему уравнений, получаем значения m_1 и m_2 .

Пример. Зададимся $I'_{xy} = -0,5$ кг·м·с²; $x_1 = -0,4$ м, $x_2 = 0,3$ м;
 $y_1 = 0,35$ м, $y_2 = -0,25$ м;

$$|m_1 \cdot 0,35| - |m_2 \cdot 0,25| = 0;$$

$$|m_1 \cdot 0,4 \cdot 0,35| + |m_2 \cdot 0,3 \cdot 0,25| = |0,5|,$$

отсюда $m_2 = \frac{0,5}{0,175} = 2,9$ кг; $m_1 = 2,07$ кг.

Аналогично рассчитывается I_{xz} .

Рассмотренные в пособии методы и средства определения положения центра масс и измерения моментов инерции агрегатов летательных аппаратов отражают современный уровень техники и технологии производства. Однако быстрое развитие конструкций летательных аппаратов требует совершенствования технологии, в частности, процессов балансировки.

Решение этой задачи должно быть основано на применении автоматизированного оборудования (балансировочных стендов) и обработке результатов с использованием электронно-вычислительных машин. Это позволит повысить производительность процессов балансировки и точность методов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев Н. М. Определение положения центра тяжести летательных аппаратов. — М.: МАИ, 1974.
2. Герпет М. М., Ратобыльский В. Ф. Определение моментов инерции. — М.: Машиностроение, 1969.
3. Пац И. И., Жоголь В. Д., Абрамов И. А. Оборудование сборочно-испытательного производства. — Л.: Машиностроение, 1976.
4. Шейнин В. М., Козловский В. И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов. Т. 1, 2. — М.: Машиностроение, 1977.
5. Прусенко В. С. Пневматические датчики и вторичные приборы. — М.: Энергия, 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИИ (статическая балансировка)	6
1.1. Определение положения центра масс по продольной оси изделия на одновесовом стенде	7
1.2. Определение положения центра масс изделия по трем координатам на одновесовом поворотном стенде	8
1.3. Определение величины смещения центра масс изделия относительно продольной оси и балансировка на стенде с шарнирной механической опорой	11
1.4. Балансировка на стенде с гидроопорой и двумя пневмодатчиками	17
1.5. Взвешивание и определение координат центра масс изделия на универсальном стенде с тремя весовыми механизмами	24
1.6. Балансировка на автоматизированном стенде с центральной шарнирной опорой ССБ-1	26
1.7. Балансировка на стенде ССБ-7	32
1.8. Определение положения центра масс изделий с помощью тензометрических силоизмерительных датчиков	39
1.9. Определение положения центра масс методом подвески	45
1.10. Взвешивание и определение положения центра масс самолета с помощью трех весов	47
1.11. Весовая балансировка органов управления	49
2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАССОВЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ (динамическая балансировка)	52
2.1. Метод наблюдения ускорения падающего груза	55
2.2. Определение осевых и центробежных моментов инерции методом унифилярного подвеса	60
ЛИТЕРАТУРА	68

Алексей Степанович Горячев

**БАЛАНСИРОВКА АГРЕГАТОВ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие

Редактор Т. К. Кретишнина
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Куришинова

Темплан 1982 г., под. 73

Сдано в набор 12.04.82 г. Подписано в печать 23.06.82 г.
ЕО00363. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага писчая
Высокая печать. Литературная гарнитура.
Усл. п. л. 4,2. Уч.-изд. л. 4,0. Заказ № 330.
Тираж 500 экз. Цена 15 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев,
ул. Ульяновская, 18.