
ДИНАМИКА МЕХАНИЗМОВ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ТММ

КУИБЫШЕВ 1978

Лабораторная работа по разделу «Динамика» включает вопросы уравнивания вращающихся масс, определения момента инерции и экспериментального исследования машин.

ДИНАМИЧЕСКОЕ И СТАТИЧЕСКОЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ РОТОРА С ИЗВЕСТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ НЕУРАВНОВЕШЕННЫХ МАСС

Теоретические основы эксперимента

При равномерном вращении ротора на каждую его точку с элементарной массой m_i действует элементарная сила инерции P_{ni} , величина которой определяется по формуле

$$\bar{P}_{ni} = m_i \omega^2 \bar{r}_i, \quad (1.1)$$

где \bar{r}_i — расстояние рассматриваемой нами точки от оси вращения.

Перенесем силу P_{ni} в плоскость zOx . Для этого в начале координат O приложим две силы, одна из которых равна P_{ni} и ей параллельна, а другая равна ей по величине, но противоположна по направлению (рис. 1.1). В результате получим систему, состоящую из силы P_{ni} , приложенной в точке O , и пары сил с моментом $M_{ni} = P_{ni} l_i$. Просуммировав все центробежные силы инерции и моменты от сил инерции отдельных точечно расположенных неуравновешенных масс, получим главный вектор сил инерции:

$$\bar{P}_n = \sum \bar{P}_{ni} = \omega^2 \sum m_i \bar{r}_i = \omega^2 m \bar{r}_s, \quad (1.2)$$

и главный момент от сил инерции:

$$\bar{M}_n = \sum \bar{M}_{ni} = \omega^2 \sum m_i [\bar{r}_i \bar{l}_i], \quad (1.3)$$

$$M_n = \omega^2 I_n,$$

где m — масса всего тела;

r_s — расстояние центра тяжести от оси вращения;

l_i — расстояние элементарной массы от плоскости hoz , перпендикулярной оси вращения;

I_{rl} — центробежный момент инерции масс относительно оси вращения и любой оси, перпендикулярной к ней.

Центробежные силы инерции вызывают появление дополнительных динамических давлений на опоры (подшипники), увеличивают трение и износ в подшипниках и передаются фундаменту или раме машины (например, подmotorной раме самолета). Будучи переменными по величине и знаку эти силы расшатывают опоры и вызывают вибрации, которые создают в отдельных частях машины добавочные напряжения, ведущие к усталости металла и его разрушению. Поэтому при проектировании любой машины ставится задача полного или частичного погашения динамических давлений, т. е. уравновешивания движущихся (вращающихся) масс механизмов машины.

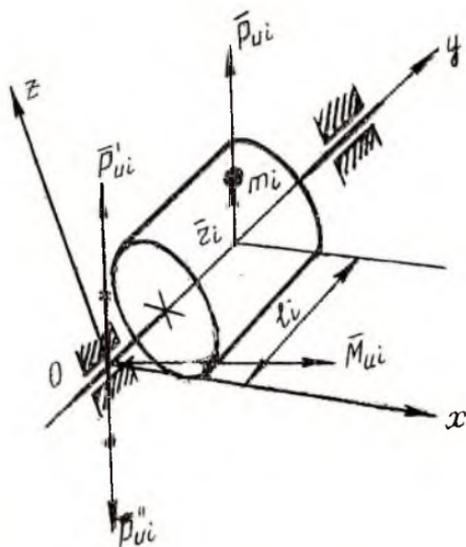


Рис. 1.1. Схема ротора

Тело считается полностью или динамически уравновешенным, если главный вектор сил инерции и главный момент от сил инерции равны нулю, т. е., если удовлетворяются одновременно условия уравновешенности:

$$\bar{P}_u = \omega^2 m \bar{r}_s = 0; \quad (1.4)$$

$$\bar{M}_u = \omega^2 \bar{I}_{rl} = 0. \quad (1.5)$$

Ротор считается статически уравновешенным, если выполняется только условие (1.4), что возможно лишь в том случае, когда $r_s = 0$, т. е. когда центр тяжести тела лежит на оси вращения. Приведение центра тяжести ротора на ось вращения называется статической балансировкой.

Динамической балансировкой называется определение величины и плоскости действия неуравновешенной пары сил инерции и ее уравновешивание.

Следовательно, помимо главного вектора сил инерции уравновесить нужно также главный момент от пары сил инерции. Уравновешивание производится при помощи специальных масс, прикрепляемых к звену и называемых противовесами. Плоскости, в которых должны быть установлены противовесы, называются плоскостями уравновешивания. Положение этих плоскостей выбирается произвольно. Главный вектор сил инерции уравновешивается одним противовесом, установленным, например, в плоскости уравновешивания I (рис. 1.2). Главный момент от сил инерции должен быть уравновешен моментом, который можно представить парой сил. Одну из этих сил можно расположить в плоскости уравновешивания I , а другую — в любой выбранной плоскости II .

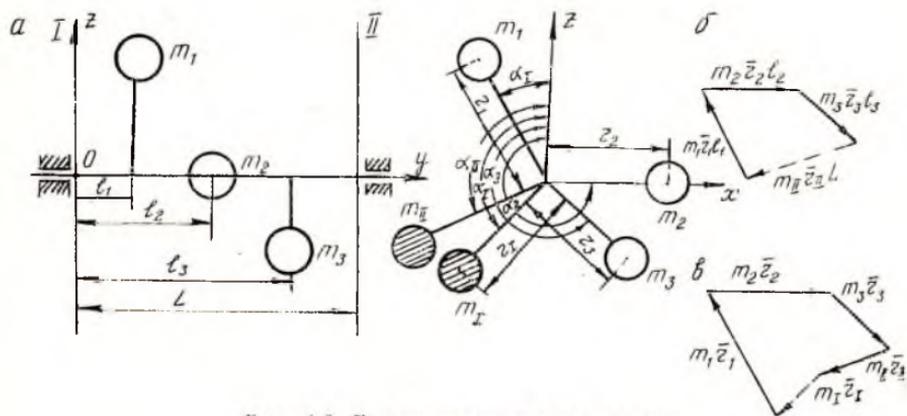


Рис. 1.2. Распределение масс ротора

Следовательно, уравновешивание главного момента от сил инерции можно произвести с помощью двух противовесов. Полное уравновешивание, таким образом, достигается установкой трех противовесов, два из которых находятся в плоскости I и могут быть заменены одним противовесом. В итоге

задача уравнивания центробежных сил инерции вращающегося ротора решается постановкой двух противовесов, расположенных в двух произвольно выбранных плоскостях, перпендикулярных оси вращения ротора.

Отыскание величин противовесов производится либо аналитическим, либо графическим способами. Более удобным для лабораторной работы является графический метод.

Пусть задана система масс m_1, m_2, \dots, m_n на валу, вращающемся с угловой скоростью ω . На рис. 1.2 эта система показана в ортогональных проекциях. Центробежная сила инерции каждой из масс будет, соответственно, равна:

$$\bar{P}_{11} = m_1 \omega^2 \bar{r}_1; \bar{P}_{12} = m_2 \omega^2 \bar{r}_2; \dots, \bar{P}_{1n} = m_n \omega^2 \bar{r}_n.$$

Положим, что плоскости I и II являются плоскостями уравнивания. Так как для полностью уравновешенной системы сумма центробежных сил и сумма моментов центробежных сил инерции относительно любой точки должна быть равна нулю, то

$$\begin{aligned} &\omega^2 m_1 \bar{r}_1 + \omega^2 m_2 \bar{r}_2 + \omega^2 m_3 \bar{r}_3 + \dots \\ &\dots + \omega^2 m_I \bar{r}_I + \omega^2 m_{II} \bar{r}_{II} = 0; \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} &\omega^2 m_1 [l_1 \bar{r}_1] + \omega^2 m_2 [l_2 \bar{r}_2] + \omega^2 m_3 [l_3 \bar{r}_3] + \dots \\ &\dots + \omega^2 m_{II} [L \bar{r}_{II}] = 0, \end{aligned} \quad (1.7)$$

или, умножив все члены равенства (1.6) и (1.7) на $\frac{1}{\omega^2}$, получим:

$$m_1 \bar{r}_1 + m_2 \bar{r}_2 + m_3 \bar{r}_3 + \dots + m_I \bar{r}_I + m_{II} \bar{r}_{II} = 0; \quad (1.8)$$

$$m_1 [l_1 \bar{r}_1] + m_2 [l_2 \bar{r}_2] + m_3 [l_3 \bar{r}_3] + \dots + m_{II} [L \bar{r}_{II}] = 0, \quad (1.9)$$

где m_I и m_{II} — массы противовесов в плоскостях I и II , соответственно;

$l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ — расстояние между плоскостью I и плоскостями, в которых вращаются центры тяжести соответствующих масс;

L — расстояние между плоскостями уравнивания.

Каждый из векторов моментов центробежных сил инерции перпендикулярен к плоскости, проходящей через ось U и соответствующий центр тяжести, т. е. перпендикулярно соответствующей силе инерции.

Для удобства отыскания направлений \bar{r}_I и \bar{r}_{II} противовесов каждый из векторов $m_i [l_i \bar{r}_i]$ поворачивается на 90° в одну сторону и будет считаться, что каждый вектор направлен

параллельно радиусу \bar{r}_i . Для повернутых векторов будет справедлива формула

$$m_1 l_1 \bar{r}_1 + m_2 l_2 \bar{r}_2 + m_3 l_3 \bar{r}_3 + m_{II} L \bar{r}_{II} = 0. \quad (1.10)$$

Вычислив предварительно все произведения $m_i \bar{r}_i l_i$ и $m_i \bar{r}_i$, строим в масштабе векторный многоугольник (рис. 1.2, б), который замыкается искомым вектором $m_{II} \bar{r}_{II} L$. Определив из этого произведения величину вектора $m_{II} \bar{r}_{II}$, строим в масштабе векторный многоугольник (рис. 1.2, в), по которому определяем величину и направление вектора $m_1 \bar{r}_1$.

Задавись массами m_1 и m_{II} , можно определить \bar{r}_1 и \bar{r}_{II} .

Описание установки

При выполнении данного задания знакомятся с методом статической и динамической балансировки ротора при известном расположении неуравновешенных масс.

Установка для уравнивания вращающихся масс состоит из следующих основных узлов (рис. 1.3): ротора, фрикционного привода и плиты со стойками. Ротор представляет собой вал 1, на котором свободно насажены пять алюминиевых дисков 2 на расстоянии 80 мм друг от друга. Диски имеют два сквозных паза, один—для крепления грузов, другой—для уравнивания диска. На диске рядом с пазом для крепления грузов привернута шкала, позволяющая устано-

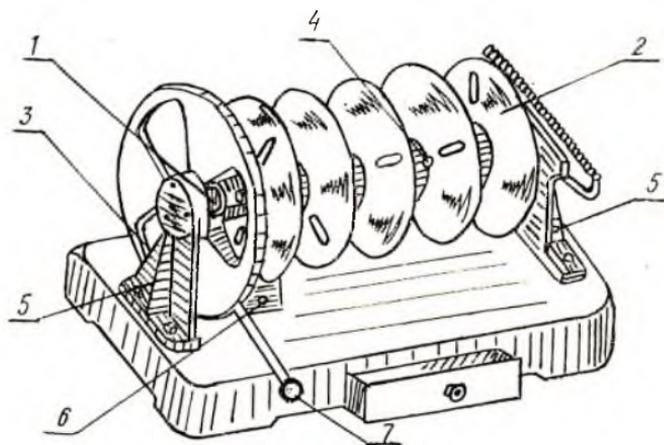


Рис. 1.3. Установка для уравнивания вращающихся масс

вить груз на нужном радиусе. В осевом направлении диски ограничиваются кольцами 3, жестко закрепленными на валу 1. Кольца градуированы по образующей через два градуса, а ступицы дисков имеют риску, позволяющую установить диск на необходимый угол. Фиксация дисков осуществляется винтами 4.

Вал с дисками (ротор) смонтирован на двух стойках 5, причем левый конец вала закреплен в сферическом шарикоподшипнике, позволяющем валу, кроме вращательного движения, осуществлять поворот в горизонтальной плоскости. Правый конец вала закреплен в радиальном шарикоподшипнике, установленном в подвижной каретке, находящейся под действием пружин.

Вращение ротора осуществляется от электродвигателя посредством фрикционной передачи 6.

Электродвигатель смонтирован у левой стойки на качающемся рычаге. Под рычагом установлена пусковая кнопка двойного действия. Нажатием рукоятки рычага 7 вниз фрикционный диск прижимается к шкиву и включается электродвигатель, разгоняющий ротор. При освобождении рукоятки под действием веса электродвигателя фрикцион отжимается и электродвигатель выключается.

Основанием установки служит чугунная плита, на которой закреплены стойки, несущие ротор.

Установка снабжена комплектом грузов с массами в 40, 50, 60 и 70 г, служащих для создания дисбалансов и уравновешивания.

Порядок выполнения задания

1. Для создания дисбаланса на 2-м и 4-м дисках закрепить грузы с массами m_2 и m_4 под углами α_2 и α_4 на расстояниях r_2 и r_4 от оси вращения. Массы и координаты неуравновешенных грузов указываются преподавателем и записываются в бланк отчета.
2. Составить векторное уравнение для статического уравновешивания, построить векторный треугольник. Задавась массой противовеса m , определить его координаты.
3. Противовес установить на 3-м диске и проверить статическую уравновешенность ротора: при повороте ротора на любой угол он должен находиться в безразличном равновесии.

4. Проверить динамическую неуравновешенность ротора: при разгоне ротора правый конец его начинает совершать колебания в горизонтальной плоскости.
5. Снять противовес, найденный при статическом уравновешивании.
6. Составить векторные уравнения (1.8) и (1.9) для полного уравновешивания и построить векторные многоугольники сил инерции и моментов от сил инерции, выбрав масштабы μ_{ms} и μ_{mrl} . В качестве плоскостей уравновешивания выбрать 1 и 5-й диски.
7. Задавшись массами противовесов m_I и m_{II} , определить их координаты.
8. Установить противовесы m_I и m_{II} на 1 и 5-м дисках и проверить статическую уравновешенность ротора.
9. Разогнать ротор и убедиться в его динамической уравновешенности. Правый конец ротора не должен иметь колебаний.

Оформление отчета

1. Цель задания.
2. Схема установки.
3. Исходные данные.
4. Векторное уравнение и построение векторного многоугольника для статического уравновешивания при постановке противовеса на 3-м диске и определение веса противовеса.
5. Результаты проверки статической и динамической уравновешенности ротора.
6. Векторные уравнения для полного уравновешивания и построение векторных многоугольников сил инерции и моментов от сил инерции в выбранных масштабах. В качестве плоскостей уравновешивания принять 1 и 5 диски. Задавшись m_I и m_{II} противовесов, определить их координаты r_I и r_{II} и углы установки α_I и α_{II} .
7. Результаты проверки уравновешенности ротора.

БАЛАНСИРОВКА ВРАЩАЮЩИХСЯ МАСС РОТОРА ПРИ НЕИЗВЕСТНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ НЕУРАВНОВЕШЕННЫХ МАСС

Теоретические основы эксперимента

Создание современных летательных аппаратов немыслимо без применения различного рода агрегатов, звенья которых совершают вращательное движение. К их числу относятся: двигатели, стартеры, генераторы, насосы и т. д.

Стремление к все возрастающей концентрации мощности в одном агрегате неизбежно приводит к увеличению угловой скорости роторов проектируемых машин и сил инерции от неуравновешенных масс.

Из теоретической механики известно, что все силы инерции сводятся к главному вектору и главному моменту. Сила и момент вызывают добавочные давления в подшипниках, которые передаются раме и всему корпусу машины, вызывая нежелательные вибрации. Для устранения этих сил и вызываемых ими колебаний (вибраций) необходимо уравновесить силу инерции P_n и инерционный момент M_n , действующие на ротор. Этот процесс уравновешивания называется балансировкой вращающихся масс (балансировкой ротора).

Уравновешивание сил инерции и моментов инерционных сил заключается в том, чтобы главный вектор сил инерции и главный момент от сил инерции были равны нулю либо были сведены до приемлемых в процессе работы машины величин.

При равномерном движении для уравновешенного ротора, вращающегося на двух опорах, имеем:

$$\bar{P}_n = -m\bar{W}_s = m\omega^2 \bar{r}_s; \quad (2.1)$$

$$M_n = \omega^2 I_{yz} = 0, \quad (2.2)$$

где P_n — сила инерции;

m — неуравновешенная масса;

ω — угловая скорость;

r_s — расстояние от оси вращения до неуравновешенной массы;

M_n — момент инерционных сил;

I_{yz} — центробежный момент инерции ротора.

Уравновешивание производится при помощи специальных масс, прикрепляемых к ротору и называемых противовесами.

Условие, при котором главный вектор сил инерции будет равен нулю, называется условием статической уравновешенности ротора. Оно выполняется, когда $r_s = 0$, т. е. когда центр тяжести ротора лежит на оси вращения (2.1).

Условие, при котором главный вектор и главный момент от сил инерции будут равны нулю, называется условием динамической уравновешенности ротора. Оно выполняется, когда центробежный момент инерции равен нулю (2.1) и (2.2).

Балансировка роторов проводится на специальных станках. В основу устройства станка для динамической балансировки положены два принципа:

1. Любая система неуравновешенных сил инерции вращающегося ротора может быть заменена двумя взаимно перекрещивающимися силами P_{u1} и P_{u2} , расположенными в двух произвольно выбранных плоскостях I и II (рис. 2.1), перпендикулярных оси вращения ротора.

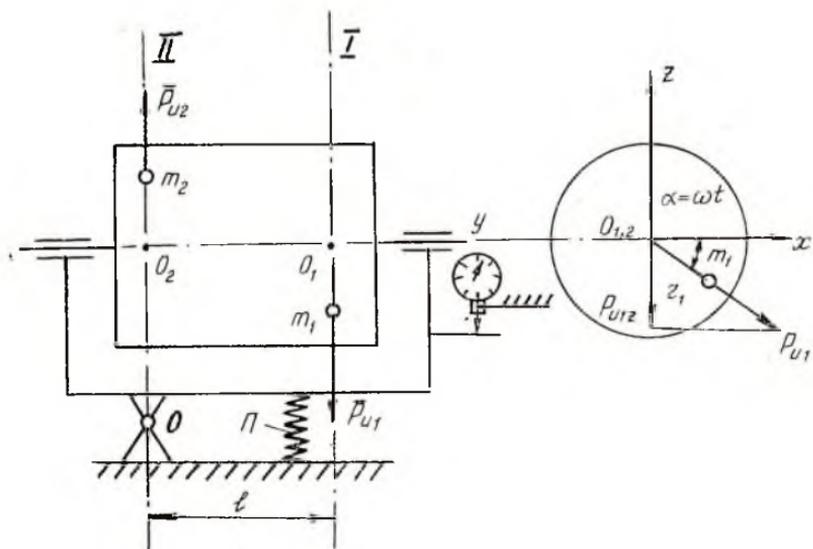


Рис. 2.1. Схема станка для динамической балансировки ротора

2. Амплитуда A_i вынужденных колебаний ротора при резонансе пропорциональна дисбалансу $G_i r_i$, т. е.

$$A_i = \psi m_i r_i ; \quad (2.3)$$

где μ — коэффициент пропорциональности, зависящий от постоянных параметров данной установки.

Согласно первому принципу все неуравновешенные массы ротора можно заменить двумя массами m_1 и m_2 , расположенными в двух произвольно выбранных плоскостях. Эти плоскости выбираются таким образом, чтобы в них можно было установить противовесы. Одна из плоскостей II проводится через ось вращения рамы O (рис. 2.2), на которой установлен ротор. Плоскость I отстоит от плоскости II на расстоянии l .

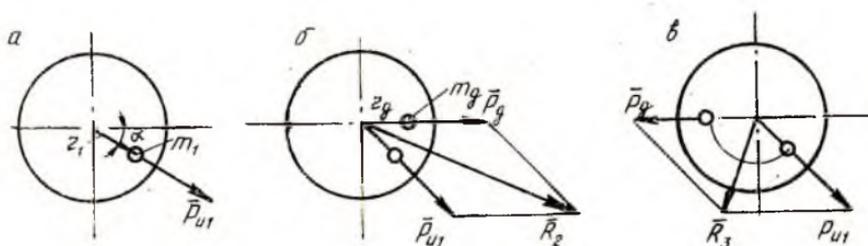


Рис. 2.2. Силы, действующие на ротор

При вращении ротора с угловой скоростью ω от масс m_1 и m_2 возникнут центробежные силы P_{u1} и P_{u2} :

$$P_{u1} = m_1 r_1 \omega^2 \quad \text{и} \quad P_{u2} = m_2 r_2 \omega_{u2}^2.$$

Сила P_{u2} лежит в плоскости II , проходящей через ось вращения рамы, и поэтому уравновешивается реакцией шарнира. Силу P_{u1} можно разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие: $P_{u1x} = P_{u1} \cos \omega t$, $P_{u1z} = P_{u1} \sin \omega t$. Эти силы, действуя относительно точки O , на плече l создают моменты, действующие на раму. Момент от горизонтальной составляющей будет уравновешиваться реактивным моментом в заделке рамы — шарнире O . Момент от вертикальной составляющей будет вызывать вынужденные колебания рамы с ротором относительно шарнира O . При равенстве частоты возникающей силы и собственных колебаний системы возникает резонанс. Так как в установке имеется сила сопротивления, определяемая жесткостью пружин 2, то максимальная амплитуда A_{\max} достигнет конечной величины, которая фиксируется с помощью индикатора.

Согласно второму принципу величина максимальной амплитуды A_{\max} при резонансе пропорциональна статическому моменту неуравновешенной массы. Эта пропорциональность использована в станке конструкции Б. В. Шитикова, позво-

ляющем определять величину и положение неуравновешенной массы следующим образом. В плоскости l проводится линия отсчета $X-X$ (рис. 2.1 и рис. 2.2.). Пусть неуравновешенная масса m_1 находится на расстоянии r_1 , составляющем с направлением $X-X$ угол α . Разогнав ротор до оборотов, при которых частота возмущающей силы будет больше частоты собственных колебаний системы, дают ротору возможность свободного выбега (торможение осуществляется за счет аэродинамических сопротивлений и сопротивлений трения в опорах качения). Когда при уменьшении числа оборотов ротора частота возмущающей силы совпадет с собственной частотой системы, возникнет явление резонанса и рама станка будет иметь наибольшую амплитуду колебаний. Тогда согласно второму принципу будем иметь:

$$A_1 = \mu' P_{н1}, \quad (2.4)$$

где μ' — коэффициент пропорциональности.

Поместим на линии $X-X$ на расстоянии r_2 от оси вращения ротора дополнительную массу m_2 и снова разогнав ротор, измерим максимальную амплитуду колебаний A_2 с помощью индикатора. Очевидно эта амплитуда будет пропорциональна центробежной силе инерции R_2 , являющейся равнодействующей центробежной силы инерции $P_{н1}$ от неуравновешенной массы и центробежной силы P_2 добавочной массы m_2 :

$$A_2 = \mu' R_2. \quad (2.5)$$

Снимем добавочную массу с прежнего места и поместим ее на той же линии $X-X$, на том же расстоянии от оси вращения, но с противоположной стороны (рис. 2.2, в). Снова разогнем ротор и снова измерим амплитуду A_3 резонансных колебаний. Эта амплитуда будет пропорциональна центробежной силе инерции R_3 :

$$A_3 = \mu' R_3. \quad (2.6)$$

Полученные на рис. 2.2, б, в параллелограммы сил равны, так как они имеют равные стороны и равные углы. Построим параллелограмм $OBCA$ (рис. 2.3), в котором силы заменены пропорциональными им величинами амплитуды. В этом параллелограмме

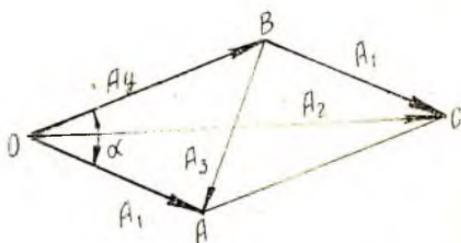


Рис. 2.3. Параллелограммы сил

нам известны стороны и диагонали A_2 и A_3 . Сторона $OB = A_d$ нам известна. Она равна максимальной амплитуде, которая получилась бы при резонансе от одной дополнительной массы m_d . Из рис. 2.3 имеем

$$2A_d^2 + 2A_1^2 = A_2^2 + A_3^2, \quad (2.7)$$

откуда

$$A_1 = \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 - 2A_d^2}{2}}. \quad (2.8)$$

$$\text{Но} \quad A_1 = \mu' P_d. \quad (2.9)$$

Так как центробежные силы инерции пропорциональны статическим моментам от веса масс, то можно определить коэффициент пропорциональности между амплитудами и статическими моментами от масс:

$$\mu = \frac{A_d}{m_d r_d}, \quad (2.10)$$

где $m_d r_d$ — статический момент от массы дополнительного груза.

Теперь можно определить для искомой неуравновешенной массы произведение ее веса на расстояние ее до оси вращения $m_1 r_1$:

$$m_1 r_1 = \frac{A_1}{\mu}. \quad (2.11)$$

Статический момент противовеса $m_n r_n$ должен быть равен статическому моменту неуравновешенной массы $m_1 r_1$ и направлен в противоположную сторону:

$$m_n r_n = m_1 r_1. \quad (2.12)$$

Задавшись весом противовеса $Q_{н.п.}$, определяем величину r_n :

$$r_n = \frac{m_1 r_1}{m_n} = \frac{A_1 m_d}{A_d m_n} r_d. \quad (2.13)$$

Определяем величину и направление радиуса-вектора (угла α) на основании рис. 2.3 из треугольника OAB :

$$A_3^2 = A_1^2 + A_d^2 - 2A_1 A_d \cos \alpha. \quad (2.14)$$

Тогда

$$\cos \alpha = \frac{A_1^2 + A_d^2 - A_3^2}{2A_1 A_d} \quad (2.15)$$

или

$$\alpha = \arccos \left(\frac{A_1^2 + A_d^2 - A_3^2}{2A_1 A_d} \right). \quad (2.16)$$

Однако одному значению косинуса соответствуют два значения угла α_1 . Следовательно, противовес должен располагаться на окружности радиуса $r_{н1}$, а положение радиуса-вектора определится углом $\pm \alpha$.

После того, как найден вес противовеса и его радиус-вектор в плоскости *I*, переходят к определению массы противовеса, расположенного в плоскости *II*. Ротор снимают с рамы, поворачивают в плоскости, проходящей через его ось, на 180° и вновь устанавливают на раму. При этом плоскости *I* и *II* меняются местами. После разворота ротора проводят вторично определение массы противовеса.

Описание установки

При выполнении данного задания знакомятся с методами уравнивания вращающихся роторов путем постановки добавочных балансировочных масс (противовесов).

Описание балансировочного станка системы Б. В. Шитикова

Кинематическая схема станка (рис. 2.4) составлена так, что маятниковая рама *1* благодаря шарикоподшипниковым опорам может колебаться относительно оси *O*. Момент, противодействующий перемещению маятниковой рамы, создается консольной стержневой пружиной (прессорой) *2* круглого сечения.

Конструктивно станок выполнен со специальным ротором *3*, установленным на шарикоподшипниковых опорах *4*. В роторе с помощью болта, поставленного в одном из его торцов, создан постоянный дисбаланс.

На полуосях ротора с каждой стороны установлены два хорошо отбалансированных диска *5*, в которых выполнены две диаметрально противоположные радиальные прорези с мерными делениями.

В этих прорезях можно устанавливать на различных расстояниях от оси вращения дополнительные грузы.

Диски могут поворачиваться в окружном направлении, величина поворота фиксируется с помощью лимба. Для фиксации углового положения дисков на их ступицах установлены стопорные винты. Разгон ротора осуществляется посредством фрикционного диска, установленного на валу электро-

двигателя типа ШУП-2, смонтированного на одном из плеч качающегося рычага. Другое плечо рычага заканчивается рукояткой, при помощи которой через микровыключатель осуществляется включение и выключение электродвигателя, а также прижатие фрикционного диска к ротору.

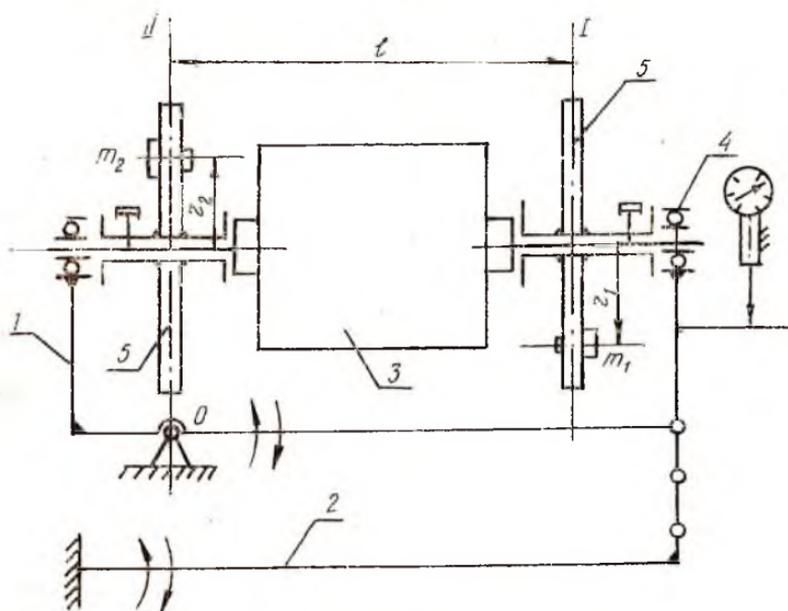


Рис. 2.4. Схема станка системы Б. В. Шитикова

Амплитуда колебаний маятниковой рамы измеряется с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Установка рамы в горизонтальное положение осуществляется регулировочными винтами с контролем по сферическому уровню, смонтированному на маятниковой раме.

Если раму с ротором вывести из равновесия путем кратковременного приложения силы к консольной части установки, то рама придет в колебательное движение с затухающими колебаниями.

Частота колебаний «К» для данной установки постоянна и зависит от момента инерции колеблющейся системы относительно оси вращения, жесткости рессоры и потерь на трение в опорах.

Параметр «К» называется частотой собственных (свободных) колебаний системы.

Порядок выполнения задания

1. Составить схему установки.
2. Установить нулиусы балансировочных дисков в нулевое положение и закрепить стопорными болтами.
3. Привести шток индикатора в соприкосновение с контактным винтом маятниковой рамы в плоскости диска 2.
4. Совместить нулевое деление шкалы индикатора с центральной большой стрелкой.
5. Привести ротор во вращение путем плавного энергичного нажатия рукоятки рычага вниз до упора, избегая при этом слишком больших усилий и чрезмерного разгона ротора. Время разгона ротора составляет 5—8 с.
6. Отпустить рукоятку.
7. Измерить с помощью индикатора максимальную амплитуду A_1 колебания системы при резонансе и собственной неуравновешенности ротора.
Опыт провести три раза и найти среднее арифметическое значение $A_{1\text{ср}}$.
8. Выбрав произвольно вес добавочного груза Q_d и радиус его установки r_d , смонтировать его в одной из прорезей диска I .
9. Разогнать ротор в течение 5—8 секунд и отпустить рукоятку.
10. Провести измерения наибольшей амплитуды колебаний A_2 с трехкратным проведением опыта.
11. Остановить ротор.
12. Ослабить фиксирующие болты дисков.
13. Повернуть диск I на валу ротора на 180° и вновь закрепить его фиксирующими болтами.
14. Провести трехкратный замер максимальной амплитуды A_3 по п. 5—7 и вычислить ее среднее значение.
15. Задаваясь весом противовеса $Q_{\text{п}}$ с учетом соотношений (11) — (17), определить радиус $r_{\text{п}}$, на котором должен быть установлен противовес, и угол $\alpha_{\text{п}}$ между нулевым положением диска и направлением радиуса вектора $r_{\text{п}}$.
16. Снять добавочный груз, установить противовес на найденном расстоянии $r_{\text{п}}$ на диске I и повернуть диск на угол $\alpha_{\text{п}}$ по отношению к нулевому положению.
17. Провести измерение амплитуды $A_{\text{н}}$ по п. 5—7. Проверка уравновешенности ротора производится при четырех значениях угла установки диска: 1) $+\alpha$; 2) $-\alpha$; 3) $180^\circ - \alpha$; 4) $180^\circ + \alpha$.

18. Определить относительную величину остаточной неуравновешенности

$$\delta_{\text{д}} = \frac{A_{\text{к ср}}}{A_{1 \text{ ср}}} \quad (2.17)$$

19. Уравновешивание в плоскости // можно не производить.

Техника безопасности при выполнении данной работы

1. Включение установки в электрическую сеть производить только после проверки полной ее готовности к работе. При этом винты, фиксирующие диски, должны быть прочно зажаты.
2. Установка добавочных грузов на вращающиеся диски должна производиться так, чтобы направляющие грани грузов входили в прорезь диска.
3. Прижимные гайки добавочных грузов должны быть накручены на резьбу до плотного упора в диск.
4. Перед включением электродвигателя убедиться в том, что никто из присутствующих не прикасается к ротору или дискам.
5. В плоскости вращения грузов не стоять.
6. Торможение ротора после прохождения резонанса осуществлять легким прикосновением ладони к гладкой части ротора.
7. В случае несрабатывания микровыключателя двигателя после освобождения рукоятки, необходимо срочно отключить электроснабжение установки, вынув вилку из розетки.

Оформление отчета

1. Схема установки.
2. Результаты измерений до балансировки.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Результаты измерений после балансировки.
5. Таблица, содержащая все измерения:

Обозначения	Номера замеров			
	1	2	3	Среднее арифметическое
A_1				
A_2				
A_3				
A_k				

6. Определение всех расчетных параметров.
7. Определение относительной величины остаточной неуравновешенности.

ЗАДАНИЕ № 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ МАШИНЫ

Теоретические основы эксперимента

Между характеристиками спроектированной идеальной машины и реальной всегда имеются расхождения, так как в теории механизмов исходят из допущений, что звенья абсолютно твердые, размеры их точно соответствуют чертежу и зазоры в кинематических парах отсутствуют, чего на самом деле нет. Кроме того, наличие неотбалансированных масс, переменность силы трения и появление вибраций приводят к увеличению сил и напряжений в звеньях и парах. Учесть теоретически все факторы невозможно и требуется экспериментальное исследование, позволяющее: а) установить соответствие машины техническим требованиям (например, по КПД и производительности); б) проверить рациональность конструкции (нет ли лишнего веса); в) выявить слабые звенья, требующие доработки.

При экспериментальном исследовании определяют:

1. Действующие на звенья силы и моменты.
2. Кинематические параметры (линейные и угловые скорости и ускорения).

Описание установки

При выполнении данного задания знакомятся с методами опытного определения перемещений, скоростей, ускорений, сил и крутящих моментов при исследовании синусного кривошипно-кулисного механизма компрессора (установка ТММ-2) (рис. 3.1).

От вала электродвигателя 1 через клиноременную передачу 2 вращение передается на шкив 3, играющий роль маховика и укрепленный на ведущем кривошипном валу 4 кулисного механизма.

Кривошип 4 имеет противовес 5 и палец 6 с посаженным на него бронзовым ползуном, который при вращении кривошипа перемещается в вертикальных направляющих поступательно движущейся кулисы 7. Штоки 8 и 9 двигаются в прямолинейных направляющих корпуса. Шток 8 соединен со штоком поршня 10 с помощью динамометра 11.

При движении поршня вправо воздух сжимается и в конце хода поршня пропускается через специальное дросселирующее устройство 12, тем самым осуществляется нагрузка звеньев механизма одноступенчатого компрессора.

При обратном движении воздух свободно поступает через клапан 13.

Для измерения механических параметров установка оснащена следующими датчиками:

1. На валу электродвигателя 1 установлен магнитоэлектрический датчик 14 неравномерности движения, состоящий из постоянного магнита и стального колеса с четырьмя звеньями.

2. На валу 4 кривошипа установлены:

- а) магнитоэлектрический датчик перемещений 15 (колесо с 12 зубьями и постоянный магнит);
- б) датчик, отмечающий начало рабочего хода, и состоящий из кулачка 16, размыкающего контакты в тот момент, когда кулиса придет в крайнее левое положение;
- в) датчик для измерения крутящего момента 17 с тремя токосъемными кольцами.

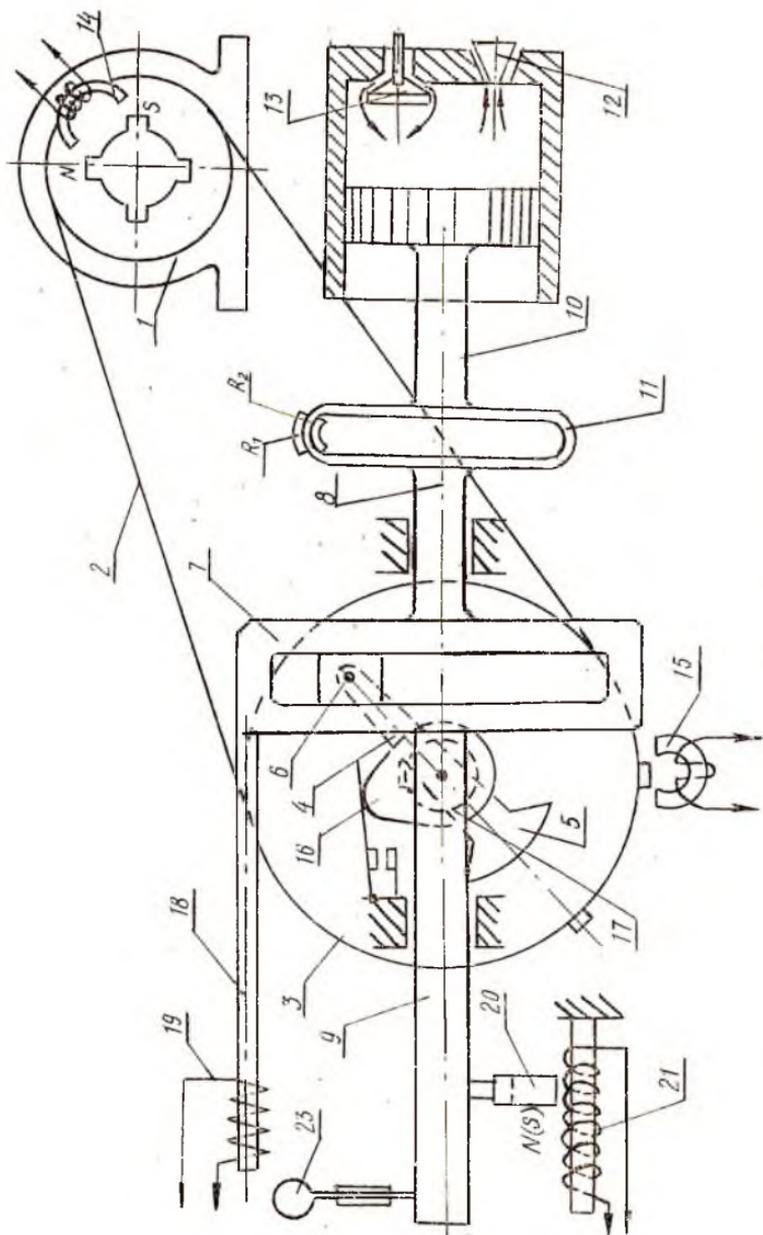


Рис. 3.1. Схема установки ТММ-2

3. На поступательно движущейся кулисе установлены:
- а) датчик линейных перемещений, состоящий из сердечника 18 и катушки 19;
 - б) датчик линейных скоростей, состоящий из постоянного магнита 20, укрепленного на конце штока, и сердечника с обмоткой 21;
 - в) датчик линейных ускорений 23, также закрепленный на конце штока;
 - г) датчик R_1 и R_2 для измерения усилий в штоке, смонтированный на упругом овальном кольце 11, соединяющем штоки кулисы и поршня.

Выводы всех датчиков объединены в общий экранированный кабель, конец которого разветвляется и служит для присоединения к усилителю и осциллографу, причем каждая ветвь отмечена соответствующими бирочками.

Основные параметры установки:

ход поршня — 0,1 м;	родвигателя АОЛЗ1-4 — 144
давление воздуха — $12 \cdot 10^{-3}$	1/с;
Н/м ² (12 атм);	КПД двигателя — 74%;
наибольшее усилие на шток —	мощность 0,6 кВт;
1440 Н;	передаточное отношение кли-
частота вращения вала элект-	ременной передачи — 2,5 или
	4.

Датчики сил, моментов и ускорений

В качестве датчиков сил, моментов и ускорений применены проволочные датчики сопротивления из константановой проволоки диаметром 0,025—0,030 мм, свернутой в петли и наклеенной на полоски тонкой бумаги (рис. 3.2).

1. Датчик измерения момента (рис. 3.2).

Датчики R_1 и R_2 одинакового сопротивления наклеиваются под углом 45° к образующей вала и включаются в сопряженные плечи I и II мостовой схемы. В два других плеча III и IV включены компенсационные датчики R_3 и R_4 , сопротивления которых также одинаковые.

До нагружения вала моментом мост балансируется с помощью реостата R_4 или специального устройства, помещенного в усилитель, и через гальванометр ток не течет.

При нагружении моментом M , как видно из рис. 3.2, б, сечение bd повернется относительно сечения ac на угол φ и

участок поверхности вала $abcd$ деформируется, приняв форму $ab'd'c$. Проволочный датчик, наклеенный по диагонали ad (R_1), будет растягиваться (ad'), а наклеенный по диагонали bc (R_2) будет сжиматься ($b'c$).

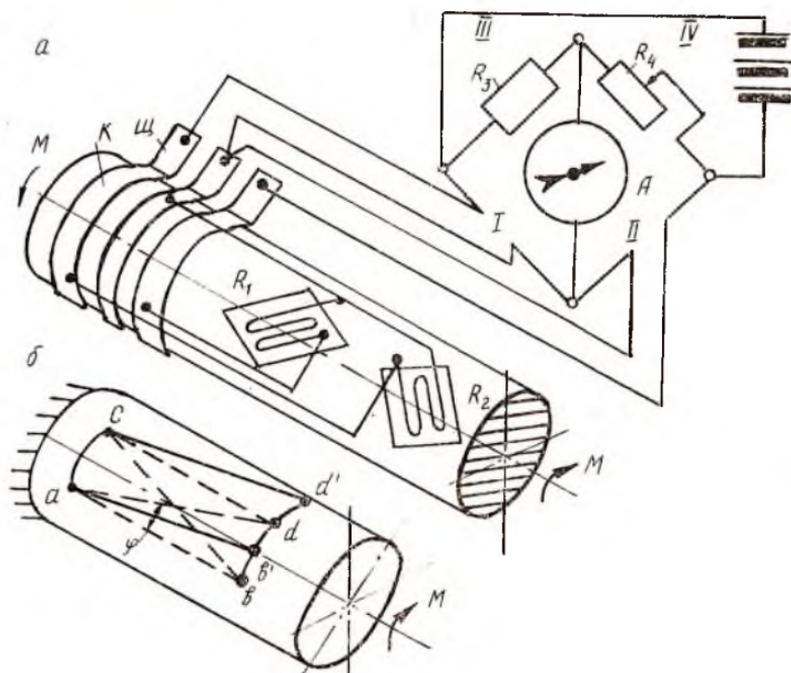


Рис. 3.2. Схема замера моментов

Из курса физики известно, что сопротивление проводника

$$R = \rho \frac{l}{q},$$

где ρ — удельное сопротивление;

q — площадь сечения;

l — длина проводника.

При растяжении проволочного датчика R_1 , увеличивается l , уменьшается q и, следовательно, растет сопротивление. Датчик R_2 сожмется и сопротивление уменьшится. Балансировка моста нарушится и через прибор A потечет ток, пропорциональный деформации и моменту.

Применение двух датчиков R_1 и R_2 не только повышает чувствительность измерений, но устраняет влияние изменения температуры. Так как датчики включены в соответствующие плечи мостовой схемы и абсолютные величины изменений их сопротивлений практически одинаковы, то при изменении температуры разбалансировка моста не происходит.

В связи с тем, что вал вращается, подключение датчиков R_1 и R_2 к плечам I и II мостовой схемы производится с помощью токосъемников, состоящих из колец K и щеток $Ш$ (рис. 3.2).

2. Датчик измерения сил.

Аналогично по такой же схеме производится измерение усилия на штоке (рис. 3.1).

Датчики R_1 и R_2 наклеены на кольцо-динамометр II , причем в случае сжатия штока датчик R_1 растягивается, а R_2 — сжимается, а при растяжении — наоборот.

Присоединение датчиков к плечам моста (рис. 3.2) производится с помощью гибких проводов.

3. Датчик для измерения линейных ускорений.

Этот датчик представляет собой металлический шарик I (рис. 3.3) с массой m , прикрепленный при помощи балочки

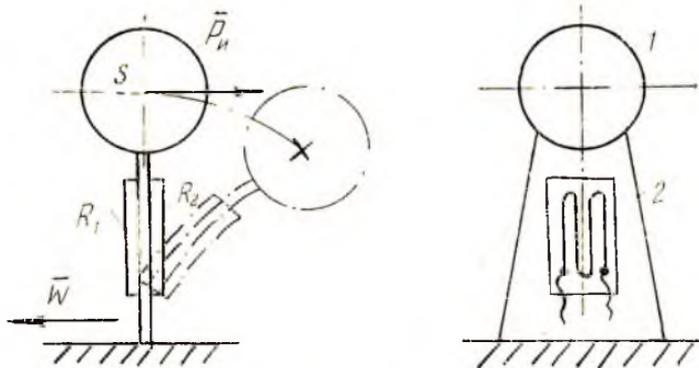


Рис. 3.3. Датчик для измерения линейных ускорений

равного сопротивления 2 к штоку. При движении последнего с ускорением W сила инерции $\vec{P}_n = -m \vec{W}_s$ будет изгибать балочку 2 с наклеенными на нее проволочными датчиками R_1 и R_2 , включенными в плечи мостиковой схемы. При малых деформациях изгиб балки будет пропорционален силе инерции, и, следовательно, измеряемому ускорению. В указанном

на рис. 3.3 положении датчик R_1 будет растягиваться, а датчик R_2 — сжиматься.

Чтобы собственные колебания шарика на балочке не влияли на показания датчика, необходимо его подобрать так, чтобы частота собственных колебаний была в 3—5 раз больше частоты исследуемого процесса.

Для регистрации меняющихся механических величин применяется магнитоэлектрический или катодный осциллограф. Так как чувствительность осциллографа недостаточна для регистрации незначительных изменений тока, вызванных в мостиковой схеме деформацией датчиков, этот ток предварительно усиливают с помощью тензометрического усилителя, который и включает в себя плечи III и IV моста (рис. 3.2).

Таким образом, роль регистрирующего прибора А (рис. 3.2) мостиковой схемы играет шлейф или экран осциллографа. Записанные на пленке или отмеченные на экране осциллографа процессы имеют вид, изображенный на рис. 3.4.

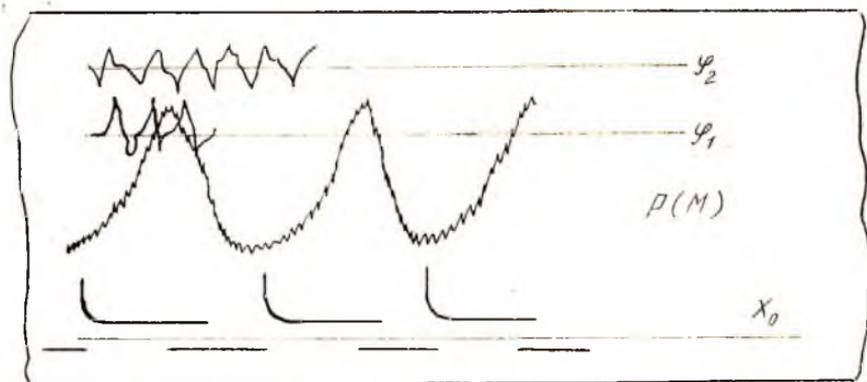


Рис. 3.4. Запись на пленке осциллографа для силы и момента: φ_1 — от датчика угловых перемещений вала кривошипа; φ_2 — от датчика угловых перемещений ротора двигателя; P — от датчика силы, действующих на шток поршня; M — от датчика крутящих моментов на валу кривошипа; X_0 — от датчика отметки начала цикла

Датчики для измерения линейных перемещений, линейных и угловых скоростей

1. Датчик линейных перемещений (рис. 3.1) представляет собой катушку 19 с двумя обмотками, внутри которой перемещается сердечник 18. Первичная обмотка питается переменным током, частотой 50 Гц. Напряжение

второй обмотки зависит от того, насколько глубоко в катушку вдвинут стержень.

2. Датчик линейных скоростей (рис. 3.1).

Скорость измеряют, используя явление электромагнитной индукции. Если в постоянном магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, передвигать катушку, намотанную на сердечник с большой магнитной проницаемостью, то в катушке будет индуцироваться ЭДС E пропорциональная скорости движения проводника V . В установке магнит 20 укреплен на штоке 9 кулисы, а катушка 21 с сердечником прикреплена к корпусу. Формула связи —

$$E = Blv = kV.$$

3. Датчики угловых скоростей (рис. 3.1).

Установлены на валу двигателя и на валу кривошипа. Состоят из неподвижно установленного постоянного магнита с обмоткой и стального диска с Z зубьями. При прохождении зубьев в катушке будет индуцироваться ток. Импульсы тока не требуют усиления и могут непосредственно идти на осциллограф (рис. 3.4, φ_1 и φ_2). У датчика на валу двигателя $Z_2=4$, а у датчика на кривошипном валу $Z_1 = 12$.

Записанные на пленку осциллографа графики перемещений поршня S , его скорости V и ускорения W имеют вид, показанный на рис. 3.5. Это кривые, близкие к синусоиде или косинусоиде.

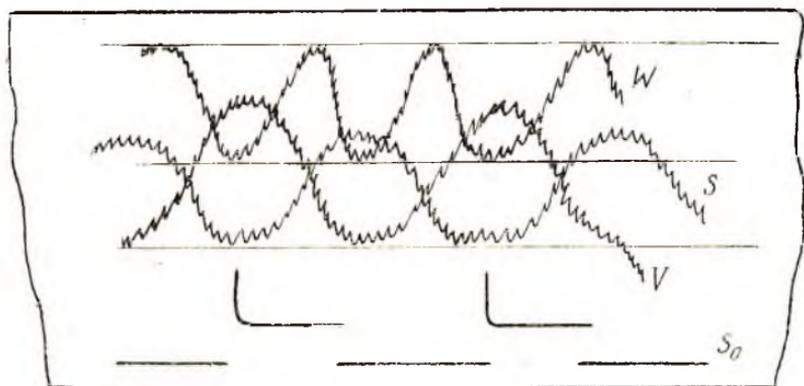


Рис. 3.5. Запись на пленке осциллографа кинематических величин

Порядок выполнения задания

1. Осциллограф и усилитель включить в сеть и подготовиться к работе согласно данным в их описании.
2. Выводы от датчиков установки ТММ-2: перемещения S , скорости V и отметки начала цикла (S_0) подключить непосредственно к осциллографу. Выводы от датчиков ускорения W , усилия P , момента M подключаются к осциллографу через каналы усилителя. В шлейфовом осциллографе устанавливается отметчик времени.
3. Двигатель установки с помощью тумблера запустить в работу и на экране осциллографа наблюдать изображение соответствующей осциллограммы. Характер этого изображения фиксировать на кальке или бумаге и приложить к отчету.

Оформление отчета

1. Цель задания.
2. Схема установки и ее описание.
3. Схемы основных датчиков.
4. Кинематические диаграммы и пояснения к ним.

ЗАДАНИЕ № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ РОТОРА МЕТОДОМ ПАДАЮЩЕГО ГРУЗА

Теоретические основы эксперимента

Технические условия при монтаже и эксплуатации машин в ряде случаев требуют определения момента инерции звеньев машин, не подвергая их разборке. В этом случае наиболее удобным является метод падающего груза.

Ротор I , момент инерции которого надо определить, установлен на горизонтальной либо вертикальной оси в подшипниках (рис. 4.1 и 4.2).

С ротором соединяют шкив 2, на который намотана нить 3. Нить перекинута через блок 4, к ее концу прикреплен груз 5.

Вначале груз находится на высоте h над уровнем пола и в этом положении фиксируется каким-либо устройством. В определенный момент времени груз освобождают, и он под действием собственного веса начинает падать, приводя во вращение ротор 1 .

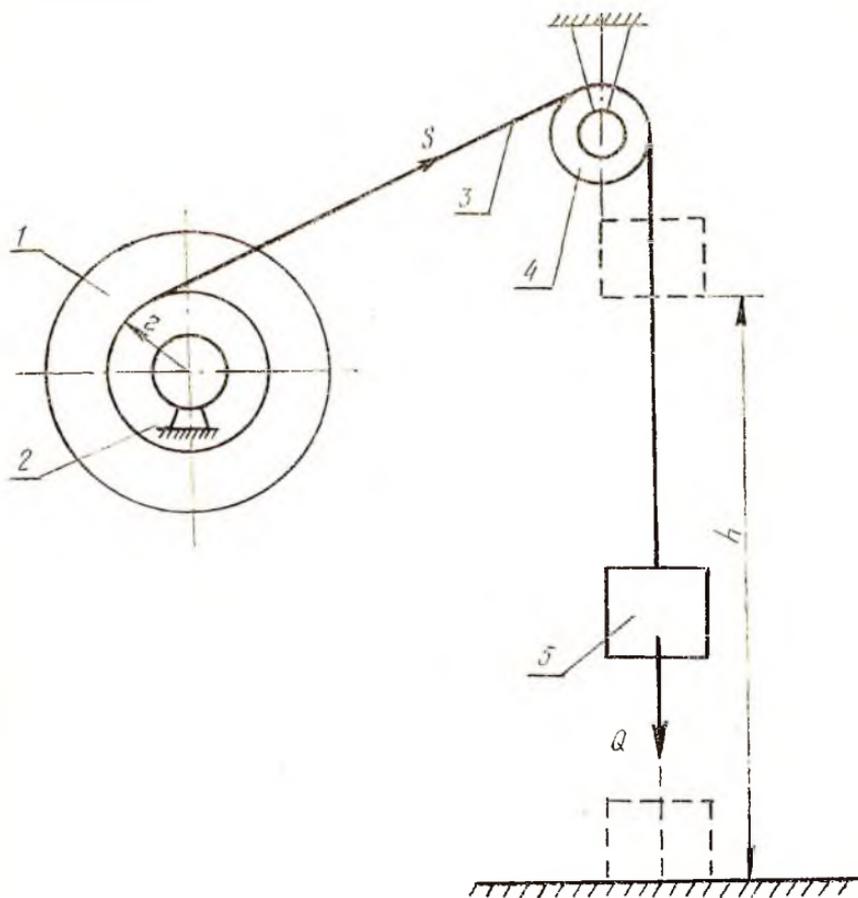


Рис. 4.1. Схема установки с горизонтальным ротором

Падение груза и вращение ротора можно считать равноускоренным, если приложенный к шкиву момент, который создается грузом 5 , больше момента трения ротора в подшипниках. Величина ускорения будет зависеть от величины груза и момента инерции звена. Обозначим:

I_p — момент инерции ротора, кгм^2 ;

- Q — вес груза, Н;
 r — радиус шкива на роторе, м;
 S — натяжение троса, вызываемое грузом, Н;
 M_T — момент трения в опорах ротора, Нм;
 ε — угловое ускорение ротора, $1/c^2$;
 T — время, с.
 ω — угловая скорость, $1/c$;
 g — ускорение силы тяжести, m/c^2 ;
 W — ускорение падающего груза, m/c^2 ;
 h — высота, м.

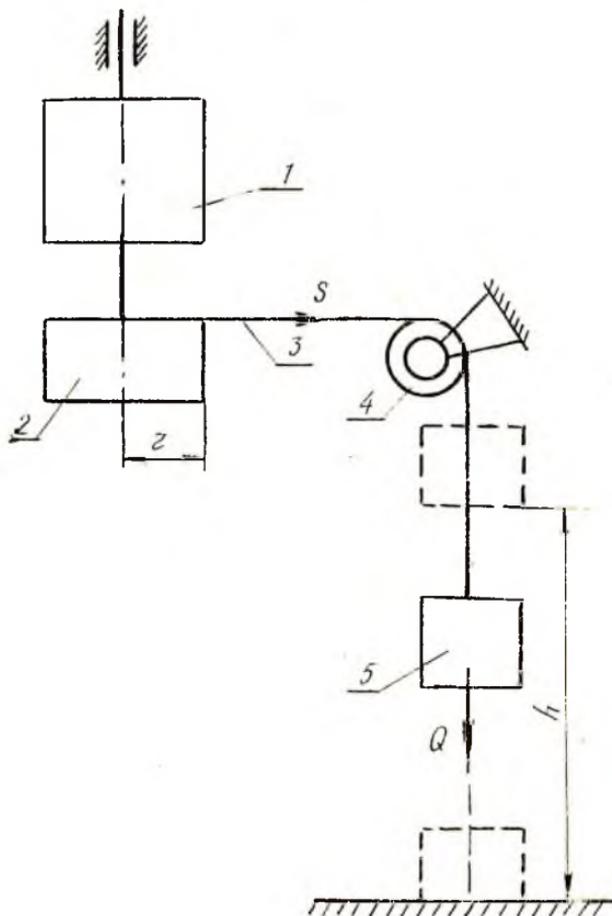


Рис. 4.2. Схема установки с вертикальным ротором

Составим дифференциальное уравнение движения ротора:

$$Sr - M_T = I_p \varepsilon. \quad (4.1)$$

Чтобы исключить из опыта влияние трения в опорах, опыты проводят дважды с различными по весу грузами Q_1 и Q_2 . Тогда будем иметь два уравнения, в которых различными будут величины S и ε :

$$S_1 r - M_T = I_p \varepsilon_1; \quad (4.2)$$

$$S_2 r - M_T = I_p \varepsilon_2. \quad (4.3)$$

Считая момент трения в опорах постоянным и решая уравнения (4.2) и (4.3) совместно, получим:

$$(S_1 - S_2) r = I_p (\varepsilon_1 - \varepsilon_2), \quad (4.4)$$

откуда

$$I_p = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} r. \quad (4.4)$$

Так как

$$\varepsilon_1 = \frac{W_1}{r} \text{ и } \varepsilon_2 = \frac{W_2}{r}, \text{ то получим}$$

$$I_p = \frac{(S_1 - S_2) r^2}{W_1 - W_2}. \quad (4.5)$$

По уравнению (4.5) определяют момент инерции ротора методом падающего груза.

Входящие в это уравнение величины W и S определяются следующим образом. Полагая, что падение груза на всю высоту h происходит с постоянным ускорением, будем иметь:

$$h = \frac{W_1 T_1^2}{2} = \frac{W_2 T_2^2}{2}, \quad (4.6)$$

следовательно,

$$W_1 = \frac{2h}{T_1^2}; \quad W_2 = \frac{2h}{T_2^2}. \quad (4.7)$$

Для определения величины натяжения нити необходимо из ускорения силы тяжести вычесть величину ускорения, с которым груз падает, и эту величину умножить на массу груза:

$$S = \frac{Q}{q} (g - W). \quad (4.8)$$

Следовательно, для различных грузов будем иметь:

$$S_1 = \frac{Q_1}{q} (g - W_1) \text{ и } S_2 = \frac{Q_2}{q} (g - W_2). \quad (4.9)$$

Полученные значения величин S и W подставляют в формулу (4.5) и находят момент инерции ротора. Величины h , r , Q_1 , Q_2 являются, как правило, постоянными для данного прибора и определяются перед опытом. Основным параметром, измеряющимся в процессе эксперимента, является время.

Метод падающего груза можно применять и в том случае, когда ротор установлен вертикально (рис. 4.2).

Описание установки

При выполнении данного задания знакомятся с определением момента инерции ротора методом падающего груза.

Принципиальная схема установки показана на рис. 4.3. Конструктивно установка состоит из алюминиевого коробчатого корпуса 1, прикрепленного к стене, на верхней плоскости которого установлен электродвигатель 2 типа АОЛЗ1-1.

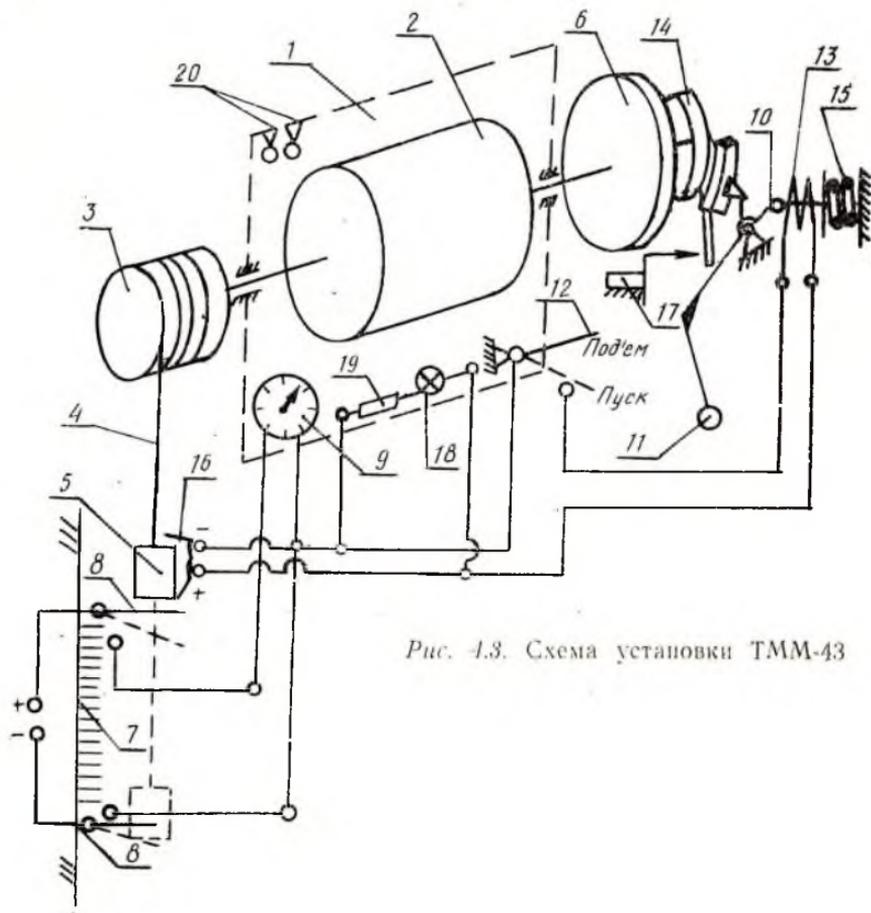


Рис. 4.3. Схема установки ТММ-43

На валу электродвигателя закреплены дополнительный диск 6 и барабан 3 для наматывания и самоукладки в один слой закрепленного на нем канатика 4, на конце которого подвешен груз 5. Рядом с основной частью прибора — коробчатым корпусом к стене прикреплен штанга 7, имеющая шкалу и два блок-контакта 8. Верхний блок-контакт штанги неподвижный.

Подвижный нижний блок-контакт дает возможность установить необходимую расчетную высоту падения груза h .

Блок-контакты электрически связаны с электросекундомером 9, встроенным в передней части корпуса прибора.

В момент начала падения груза верхний блок-контакт включает электросекундомер, в конце падения — нижний блок-контакт выключает его. Пуск груза осуществляется электрически, путем переключения тумблера 12 «подъем» — «пуск» на положение «пуск». В момент пуска ток поступает в электромагнит 13, оттягивающий рычаг 10 с тормозной колодкой от барабана 14. При этом магнит преодолевает сопротивление тормозной пружины 15. При размыкании нижнего блок-контакта электромагнит обесточивается, а тормозная пружина включает тормоз, затормаживающий падение груза, не допуская обрыва контакта и удара груза о пол. Подъем груза осуществляется вручную наматыванием каната на барабан, вращением его вместе с ротором электродвигателя за дополнительный диск. Перед подъемом груза тумблер «подъем» — «пуск» должен быть переключен на положение «подъем», в результате чего ток, поступая в электромагнит, растормаживает ротор с барабаном.

Груз, дойдя до упора в крайнее верхнее положение, концевым выключателем 16 размыкает цепь электромагнита, обесточивая его, а пружина с помощью рычага прижимает тормозную колодку к барабану, тем самым фиксируя груз в верхнем положении.

Помимо электрического пуска груза в установке предусмотрен ручной пуск нажатием от себя на сферическую рукоятку 11. Рукоятка 11 расположена в нижней части корпуса установки. Выключенное положение тормоза может быть зафиксировано с помощью фиксатора 17, расположенного с правой стороны корпуса в нижней его части.

В установке предусмотрены:

сигнальная лампа 18, показывающая, что установка включена;

постоянное сопротивление 19, включенное последователь-

но с сигнальной лампой для снижения напряжения, подаваемого на лампу;

переключатель 20 (два спаренных тумблера на три положения), дающий возможность:

обесточить установку полностью;

включить установку для выполнения лабораторной работы.

Технические данные установки:

веса падающих грузов — 0,35 кг (3,5 Н); 0,9 кг (9 Н) и 1,45 кг (14,5 Н);

высота падения грузов — 1—1,5 м;

цена деления основной шкалы секундомера — 0,01 с;

цена деления шкалы штанги — 1 мм;

маховой момент ротора электродвигателя типа АОЛ31-4—0,015 кгм²;

момент инерции ротора электродвигателя — 0,0038 кгм²;

мощность двигателя 0,6 кВт при 1410 об/мин;

число дополнительных дисков — 3;

момент инерции дополнительных дисков — 0,00382 кгм².

Порядок выполнения задания

1. Установить высоту падения грузов. Для этого, пользуясь шкалой на штанге, соответственно переместить и закрепить нижний подвижный блок-контакт 8 (рис. 4.3). Правильность установленной высоты проверить, измерив стальной рулеткой расстояние между откидными пластинками блок-контактов.
2. Подвесить к тросу груз без довеска.
3. Включить напряжение (контроль по сигнальной лампе).
4. Придерживая диски 6 от поворота, выключатель 12 перевести в положение «подъем» и плавным вращением дисков поднять груз 5 вверх до упора в нижнюю плоскость А—А основания установки. При этом сработает микровыключатель и отключит электромагнит тормозного устройства, барабан 3 затормозится и зафиксирует груз в верхнем положении.
5. Пластинки блок-контактов поднять вверх, в рабочее положение.
6. Нажатием на рычаг стрелку секундомера поставить в нулевое положение.

7. Пуск прибора осуществить переводом переключателя I_2 в положение «пуск».

Дальнейшая работа установки осуществляется автоматически: освобожденный груз начнет падать и после прохождения верхнего блок-контакта включит секундомер, а после прохождения нижнего блок-контакта выключит секундомер.

Отсчет времени происходит по шкале электросекундомера с точностью до 0,01 с.

Опыт повторить 3 раза.

8. На груз прикрепить довесок и снова измерить время падения 3 раза. Все получаемые данные записать в протокол. Из паспорта установки записать в бланк приведенный радиус r барабана (рассчитанный с учетом толщины троса), установленную высоту подъема h и веса грузов Q_1 и Q_2 .

Затем вписывают измеряемые промежутки времени падения грузов соответственно для каждого груза.

9. Вычислить средние значения времени T_1 и T_2 падения первого и второго грузов и погрешности измерения.

10. Рассчитать величину момента инерции ротора по формуле (4.5).

Оформление отчета

1. Цель задания.

2. Схема установки.

3. Основные параметры установки:

вес первого дополнительного груза $Q_1 =$

вес второго дополнительного груза $Q_2 =$

радиус шкива на роторе $r =$

высота падения груза $h =$

4. Таблица, содержащая измерения для h_1 и h_2 :

Q	Номера замеров		
	1	2	3
350 г			
900 г			
1450 г			

5. Расчеты по формулам (4.7), (4.8), (4.9) и определение момента инерции ротора по формуле (4.5). Расчеты проводить в системе СИ.

Контрольные вопросы

1. К чему приводятся инерционные силы вращающегося ротора?
2. Когда ротор считается статически уравновешенным?
3. Когда ротор считается динамически уравновешенным?
4. В каком случае центробежный момент инерции равен нулю?
5. Какое минимальное количество противовесов необходимо для полного уравновешивания ротора?
6. Что такое резонанс, когда он возникает?
7. Для чего необходимо экспериментальное исследование машин?
8. Какие параметры и с помощью каких датчиков определяются при эксперименте?
9. Как работает установка ТММ-2?
10. Для чего используется мостиковая схема?
11. На каком принципе основана работа проволочных датчиков сопротивления и для измерения каких параметров их используют?
12. Как производится измерение усилий и момента?
13. От чего зависит момент инерции ротора?
14. Факторы, определяющие время падения груза.
15. На какие параметры движения машины оказывает влияние момент инерции ротора?

Рекомендуемая литература

1. *Артоболевский И. И.* Теория механизмов и машин. М., «Машиностроение», 1975.
2. *Кожевников С. Н.* Теория механизмов и машин. М., «Машиностроение», 1973.
3. *Баранов Г. Г.* Курс теории механизмов и машин. М., «Машиностроение», 1975.
4. *Артоболевский С. И.* Теория механизмов и машин. М., «Высшая школа», 1963.
5. *Юдин В. А., Петрокас Л. В.* Теория механизмов и машин. М., «Высшая школа», 1977.
6. *Юденич В. В.* Лабораторные работы по теории механизмов и машин. М., «Высшая школа», 1962.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

З а д а н и е № 1

Динамическое и статическое уравнивание ротора с известным расположением неуравновешенных масс 1

З а д а н и е № 2

Балансировка вращающихся масс ротора при неизвестном расположении неуравновешенных масс 8

З а д а н и е № 3

Экспериментальные методы исследования механизмов машин 17

З а д а н и е № 4

Определение момента инерции ротора методом падающего груза 25
Контрольные вопросы 33
Рекомендуемая литература 33

Составители: *Владимир Модестович Ястребов, Михаил Федорович Кричевер, Юрий Иванович Байбородов, Адольф Павлович Савинов*

ДИНАМИКА МЕХАНИЗМОВ

Лабораторная работа по ТММ

Редактор Н. В. Касаткина
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Т. В. Полякова

Сдано в набор 29.09.78 г. Подписано в печать 16.10.78 г.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага оберточная белая. Печать высокая.
Гарнитура литературная. Усл. п. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2.
Тираж 1000 экз. Заказ № 852. Бесплатно.

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

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