

## Сборка и уравнивание роторов ГТД

### 1. Цель работы

Целью работы является приобретение практических навыков по комплектованию дисков лопатками с обеспечением минимальной предварительной неуравновешенности, сборке и уравниванию ротора и исследованию возможности замены лопаток в условиях эксплуатации.

### 2. Методические указания

#### 2.1 Сборка ротора турбины ГТД (трехдисковой с групповым болтовым соединением)

##### 2.1.1. Внешний осмотр деталей, поступивших на сборку.

##### 2.1.2. Подбор лопаток по тангенциальным люфтам.

Лопатки по тангенциальному люфту подбираются следующим образом. На произвольно выбранном пазе диска выявляются лопатки с наибольшим и наименьшим тангенциальным люфтом, который не должен выходить за пределы технических требований. Далее с помощью двух отобранных лопаток с наибольшим и наименьшим тангенциальным углом выявляются максимальный и минимальный тангенциальный люфт лопаток по пазам диска (рис. 1).

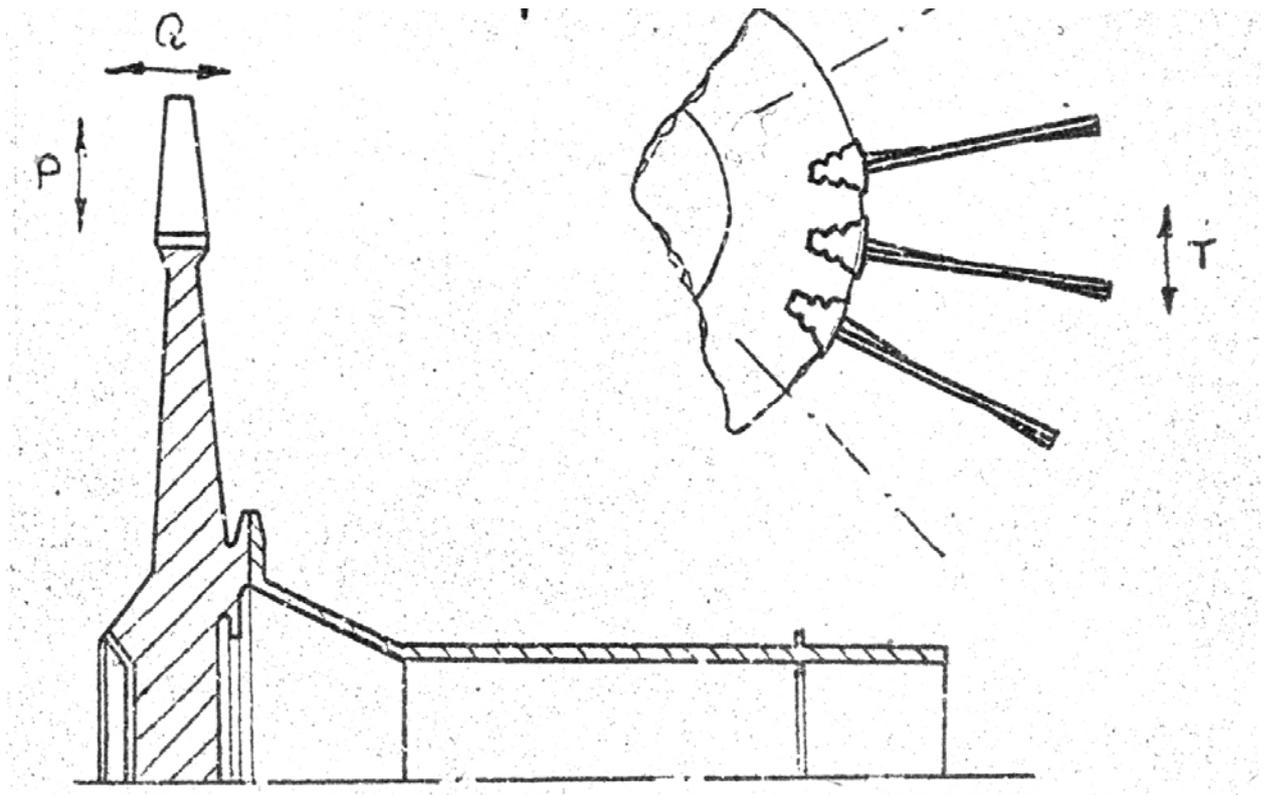


Рис 1. Схема проверки люфтов лопаток турбины:  
Т – тангенциальный; Р – радиальный; Q – осевой.

##### 2.1.3. Шлифование торцов лопаток.

Лопатки располагают в произвольном порядке по пазам диска, расклинивают с помощью деревянных клиньев или стягивают резиновыми хомутами, а затем производят шлифование торцов лопаток по наружному диаметру ротора.

##### 2.1.4. Определение весового момента лопаток.

Лопатки, у которых определен весовой момент, а не их вес, обеспечивают наименьшую предварительную неуравновешенность и облегчают последующий процесс динамического уравнивания за счет учета их центра тяжести.

Весовой момент лопаток определяется на специальных весах (рис.2) по формуле:

$$M = P \cdot L - (H \cdot m), \quad (1)$$

где  $P$  – вес разновесов,  $H$  (определяется с точностью  $\Delta P$ );

$L$  – плечо (для диска первой ступени – 0,165 м, для диска второй ступени – 0,185 м).  
Затем лопатки раскладываются в ряд по мере убывания весового момента.

### 2.1.5 Распределение лопаток по пазам диска

Комплект лопаток разбивается на две половины. Первая лопатка с наибольшим весовым моментом устанавливается в первый паз (произвольно выбранный). Вторая

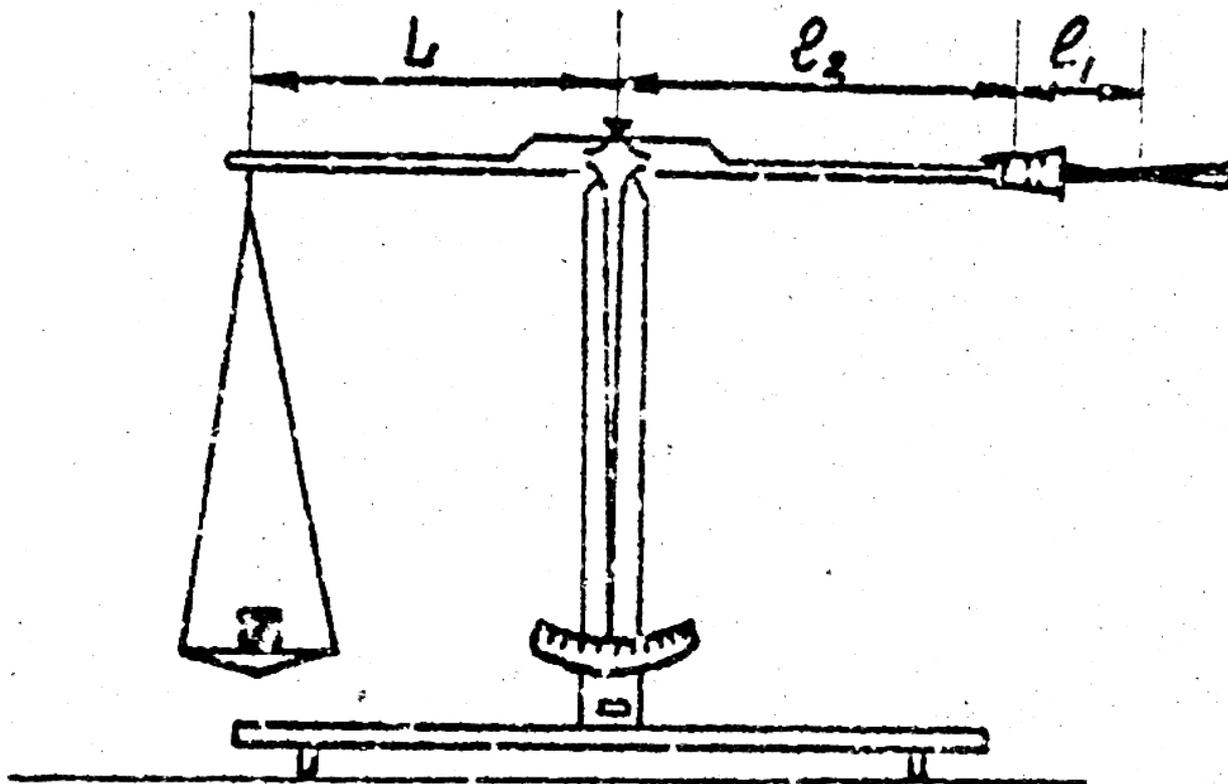


Рис.2 Схема весов для определения весовых моментов лопаток турбин.

лопатка – в противоположный паз. Третья – в третий паз, четвертая – в противоположный паз и и.д. После установки первой половины лопаток производится установка оставшихся лопаток. Последняя лопатка (с наименьшим весовым моментом) устанавливается во второй паз, предпоследняя – в противоположный паз и т.д. (рис.3). Лопатка, находящаяся в середине комплекта, при нечетном количестве лопаток устанавливается в последний паз. Такое расположение лопаток позволяет получить диск с наименьшей предварительной неуравновешенностью.

Крепление лопаток в пазах диска осуществляется пластинчатыми замками.

Комплектование диска лопатками можно производить на ЭВМ, используя соответствующую программу. Затем производится сборка второго и третьего диска.

2.1.6. Запрессовка дисков первой и второй ступени и вала на пояски друг друга с постановкой между ними втулок для передачи Мкр.

2.1.7. Стягивание дисков и вала болтовыми соединениями.

2.1.8. Монтаж на вал лабиринтных колец, внутреннего кольца РП и их крепление гайкой. Контроль биений.

2.1.9. Динамическая балансировка.

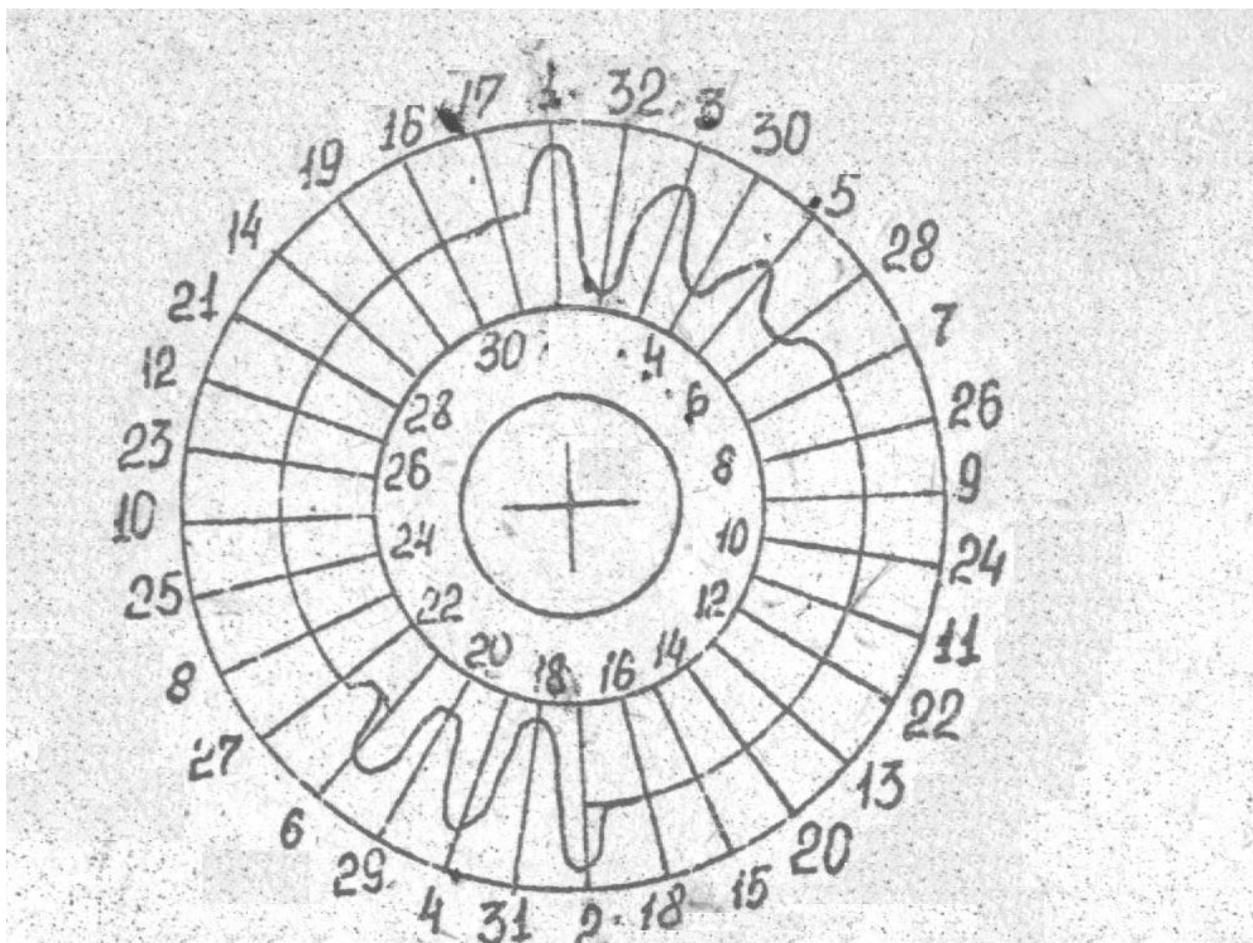


Рис. 3. Диаграмма изменения весовых моментов лопаток по диску.

2.1.9.1. Под статически уравновешенным изделием понимается изделие, у которого центр тяжести лежит на оси вращения.

2.1.9.2. Под динамически уравновешенным изделием понимается изделие, у которого центр тяжести лежит на оси вращения и моменты относительно оси вращения равны нулю.

2.1.9.3. Динамическая балансировка осуществляется на балансировочной машине, которая позволяет определять величину и место неуравновешенности по плоскостям коррекции (для нашего ротора первая и вторая ступень являются соответственно левой и правой плоскостями коррекции).

2.1.9.4. Уравновешивание производится следующими способами: установка дополнительного груза в легкое место; снятие металла с тяжелого места; путем перестановок лопаток; комбинированный (сочетание способов).

2.1.9.5. Для получения уравновешенного ротора путем перестановки лопаток предлагается для выбора лопаток воспользоваться следующим соотношением:

$$\Delta M = \frac{R}{2 \cdot \sin(\varphi / 2)} \quad (2)$$

где  $\Delta M$  – разность весовых моментов переставляемых лопаток (Нм);  
 $R$  – величина неуравновешенности, определенная на балансировочной машине (Нм). В нашем случае определяется с использованием ЭВМ.  
 $\varphi$  – угол между переставляемыми лопатками.

Переставляемые лопатки выбираются симметрично относительно перпендикуляра вектора неуравновешенности (с двух сторон от вектора неуравновешенности) и одна из лопаток, имеющая больший весовой момент, должна располагаться ближе к вектору неуравновешенности (тяжелому месту) – рис. 4.

Выбор лопаток для их перестановки можно произвести на ЭВМ с использованием соответствующей программы.

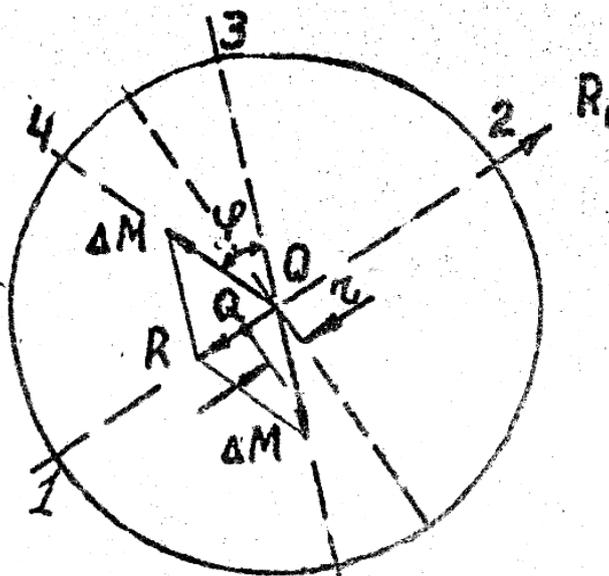


Рис. 4. Схема устранения дисбаланса перестановкой лопаток

2.1.10. Установка третьей ступени.

2.1.11. Динамическая балансировка.

Левая плоскость коррекции – первая ступень диска, правая плоскость коррекции – третья ступень диска.

Контроль правильности и точности балансировки проверяется следующим образом. Изделие считается динамически уравновешенным, когда крепление контрольного груза в зоне «легкое место» на расстоянии от центра вращения, равном радиусу коррекции, изменяет положение «легкого места» на 180 градусов.

2.1.11.1. Настройка балансировочной машины.

Перед динамической балансировкой машины необходимо ее настроить. Настройка машины осуществляется без наличия эталонного ротора и состоит из следующих этапов: получение уравновешенного изделия (с использованием пластилина); отстройка влияния одной плоскости коррекции от другой; тарировка балансировочной машины; от-

стройка влияния эластичной муфты; определение величины остаточного дисбаланса. (Приложение № 1).

## 2.2. Исследование возможности замены лопаток ГТД

Исследование возможности замены лопаток в условиях эксплуатации без последующей динамической балансировки (графическим и аналитическим способами).

Величина максимально возможной неуравновешенности

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_0$$

где  $\Delta_1$  - разброс величины весового момента для данного комплекта, Нм;

$\Delta_2$  - максимально возможная неуравновешенность за счет неточного подбора лопаток по весу, который определяется на основании допуска на точность подбора лопаток по весу ( $\Delta P$ ), Нм;

$\Delta_0$  - максимальная неуравновешенность, допустимая при динамической балансировки данного ротора, Нм.

Максимально возможная центробежная сила, приложенная в плоскости дисбаланса

$$F_{\text{оп}} = \Delta (2 * 3,14 * n)^2 / g$$

где  $n$  – число оборотов ротора в сек.

Если  $R_{\text{оп}}$  – составляющая сила веса ротора на опору, то условие возможной замены лопаток выразится неравенством

$$F_{\text{оп}} \leq 0,35 R_{\text{оп}}$$

При не соблюдении неравенства возможен резонансный режим работы ротора, при котором происходит отрыв вала и удар его о подшипники. Ротор будет уравновешен, если в плоскости диска турбины неуравновешенность не превысит величины

$$\Delta' = 0,35 R_{\text{оп}} g / (2 * 3,14 * n)^2, \text{Нм}$$

Допуск на подбор лопаток по весовому моменту должен быть равен

$$\pm (\Delta' - \Delta_0) / 2, \text{Нм}$$

## 3. Протокол выполнения работы

3.1. Составить технологический процесс сборки ротора турбины ГТД.

3.2. Распределить лопатки по пазам диска.

3.3. Исследование возможности замены лопаток без последующей динамической балансировки.

3.4. Определить " $\Delta_1$ ", " $\Delta_2$ ", " $\Delta$ "

Для определения максимально возможной неуравновешенности  $\Delta$  можно использовать следующие способы ее определения: аналитический и графический.

3.4.1. Аналитический способ определения максимально возможной неуравновешенности.

В основу положен метод наименьших квадратов, т.е. определяются коэффициенты "а" и "b" уравнения линейной регрессии вида  $M_i = a + bP_i$ .

Так,

$$b = \frac{n \sum P_i M_i - \sum P_i \sum M_i}{n \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2} \quad (3), \quad a = \frac{\sum P_i^2 \sum M_i - \sum P_i \sum P_i M_i}{n \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2} \quad (4)$$

где n – количество лопаток в комплекте.

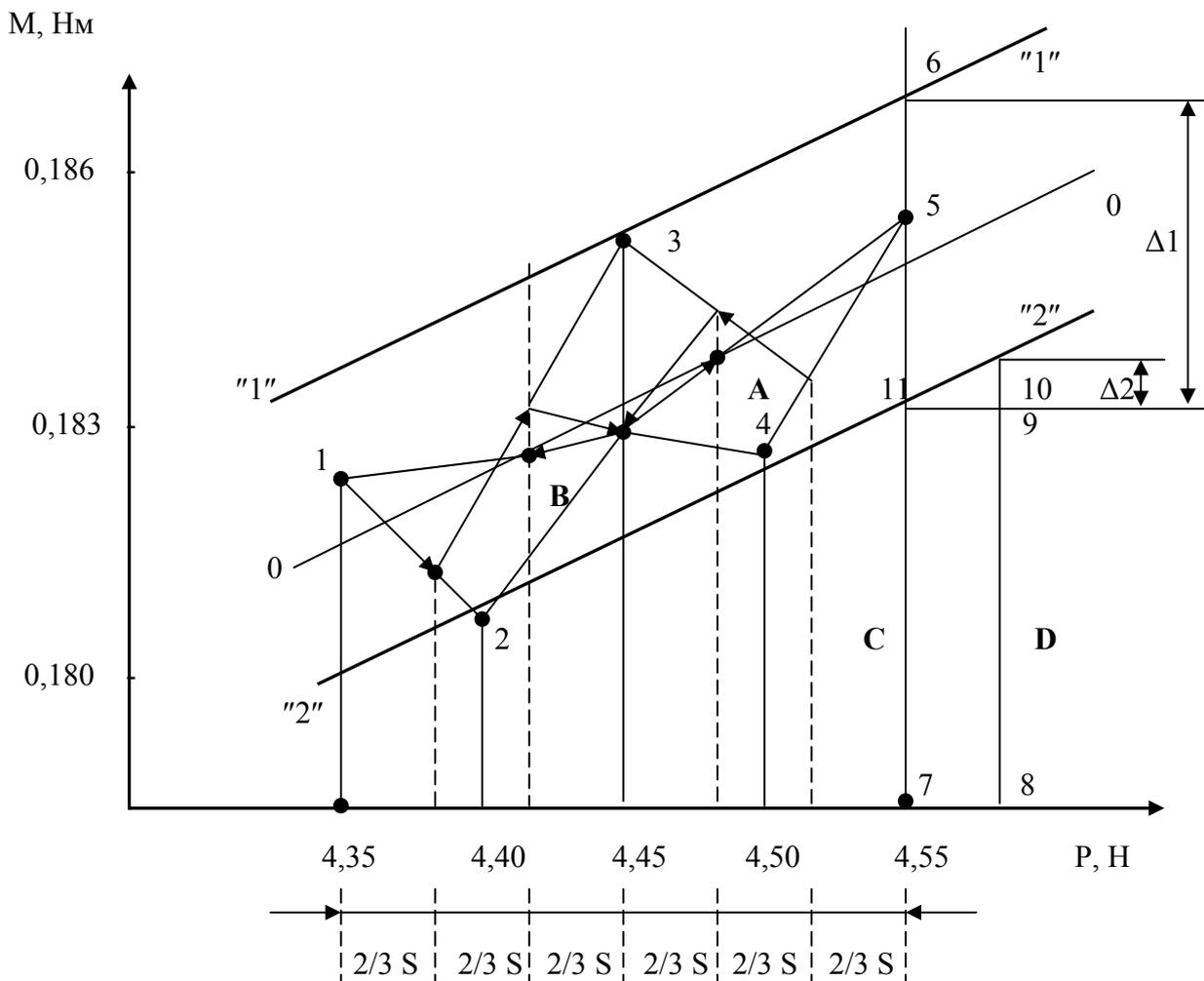
Для расчетов предлагается использовать одну из версий Excel (Excel 2000). При этом после определения коэффициентов регрессии определяются расчетные значения  $M_{ti}$  для каждой лопатки весом  $P_i$ , находятся разности  $\Delta M_i$  между  $M_i$  и  $M_{ti}$  и выявляются максимальные и минимальные значения  $\Delta M_i$ . Следовательно,  $\Delta_1 = |\Delta M_i \max| + |\Delta M_i \min|$ . Тогда  $\Delta_2 = b\Delta P$ , где  $\Delta P$  – точность подбора лопаток по весу. Зная  $\Delta_0$  (задается), можно вычислить величину максимальной неуравновешенности данного комплекта лопаток  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_0$ .

3.4.2. Графический способ определения максимально возможной неуравновешенности.

На графике (рис.5) зависимости  $M$  от  $P$  наносятся пять точек соответствующих пяти лопаткам, у которых интервалы между значениями веса лопаток одинаковы ( $S$ ) (лопатки с номерами 28, 9, 51, 32, 2).

Точки 1 (лоп. 28) и 2 (лоп. 9) соединяем отрезком прямой. Двигаясь в сторону точки 2, проходим вдоль этого отрезка расстояние, соответствующее  $2/3 S$  и делаем отметку. Соединяем полученную точку с точкой 3 (лоп. 51), двигаясь в сторону точки 3, снова проходим расстояние соответствующее  $2/3 S$ , и делаем новую отметку. Повторяем эту процедуру до тех пор, пока не будет получена последняя точка. Эта последняя точка (А) лежит на наилучшей прямой, т.е. прямой наименьших квадратов. Теперь начинаем построение с другого конца и повторяем весь процесс, двигаясь в противоположном направлении от точки 5 (лоп.2) к точке 4 (лоп. 32). Находим вторую точку (В), проводим через точки А и В прямую соответствующей средней линии "0-0". Через крайнюю верхнюю и нижнюю точки проводятся прямые "1-1" и "2-2" параллельные средней линии "0-0". Для определения  $\Delta_1$  необходимо восстановить перпендикуляр  $\perp C$  через точку 5. Величина отрезка "6-11" соответствует величине  $\Delta_1$ . От точки "7" откладывается вправо величина  $\Delta P$  (точность подбора лопаток по весу) и из точки "8" восстанавливается перпендикуляр  $\perp D$  до пересечения с нижней линией "2-2". Величина отрезка "9,10" соответствует величине  $\Delta_2$ , следовательно,

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_0 \quad (5)$$



( $P_1 - P_2 = P_2 - P_3 = P_3 - P_4 = P_4 - P_5 = 0,05 \text{ Н}$ ;  $0,05 \text{ Н} \rightarrow 15 \text{ мм} = S$ ;  $2/3 S = 10 \text{ мм}$ )

Рис. 5 Зависимость весового момента  $M$  от веса лопаток  $P$

- 3.5. Определить "F"
- 3.6. Определить режим работы ротора, сделать выводы
- 3.7. Определить " $\Delta^1$ "
- 3.8. Определить допуск на подбор лопаток без последующей динамической балансировки.
- 3.9. Анализ и выводы

### Литература

1. Ерошкин А.Н. Сборка ступеней ротора ГТД.-М.: РИО МИИГА, 1986-16с.

## Приложение №1 Настройка балансировочной машины

### 1. Получение уравновешенного ротора

На пульте управления балансировочной машины (рис.6) ручки устанавливаются в следующее положение (рис.7):

«1» и «6» - на деление 100 (максимальное);

«2» и «7» - на деление 0 (минимальное);

«3» и «8» - произвольно «А» и «Б»;

«4» - в положение «Б»;

«9» - в положение «А»;

«5» и «10» - в нейтральное положение.

Включается питание усилителя (ручка 15) и после его прогрева включается электродвигатель. Ручка «13» устанавливается в положение «Г» (Грубо), «12» - поочередно в «Л» и «П» (левая и правая плоскости коррекции). Ручка «11» определяет величину неуравновешенности по отклонению стрелки гальванометра (17), если она стоит в положении «Б» и нахождение места неуравновешенности по стробоскопу (14) и если в положении «М». Переключением на правую и левую опоры ручкой «12» определяется, на какой опоре отклонение стрелки будет больше. С этой опоры необходимо начинать динамическую балансировку системы. Динамическую уравновешенность осуществляют при помощи навески грузов.

### 2. Отстройка влияния одной плоскости коррекции от другой

Берется произвольный груз и устанавливается на произвольном радиусе на правой и ли левой плоскости попеременно, после чего включают электродвигатель привода ротора. Если груз поставлен на левую плоскость, то ручка «12» ставится в положение «П»; ручка «13» - в положение «Т»; ручка «10» включается поочередно в положение «А» или «Б» и остается в том положении, в котором показания гальванометра будут минимальными. Затем ручкой «7» стрелка гальванометра устанавливается на самое минимальное положение. То же самое производится по другой плоскости приведения, но уже используя ручки «5» и «2».

### 3. Тарировка балансировочной машины

Берется взвешенный груз и устанавливается на замеренном радиусе на одной из плоскостей коррекции.

Во время вращения ротора ручкой «1» для левой плоскости коррекции (или ручкой «6» для правой плоскости коррекции) стрелка гальванометра устанавливается на величину фактически вносимого дисбаланса. Например, при установке на левой плоскости коррекции груза  $P = 0.05 \text{ Н}$  на  $r = 0.08 \text{ м}$  дисбаланс составляет  $R = 0.004 \text{ Н*м}$ , следовательно ручкой «1» стрелку гальванометра нужно установить на  $0.004 \text{ Н*м}$  по точной шкале. Аналогичная операция производится по правой плоскости коррекции.

### 4. Отстройка влияния эластичной муфты

Отворачиваются четыре болта крепления эластичной муфты с цангой, муфта с изделием разворачивается относительно цанги на 180 градусов, после чего производится соединение муфты с цангой.

Если после поворота муфты показания гальванометра при работе балансировочной машины возрастут, то половина дисбаланса снимается за счет изделия, а вторая половина – за счет эластичной муфты. И так повторяют до тех пор, пока изменение показаний гальванометра не будут находиться в пределах допуска на балансировку ротора.

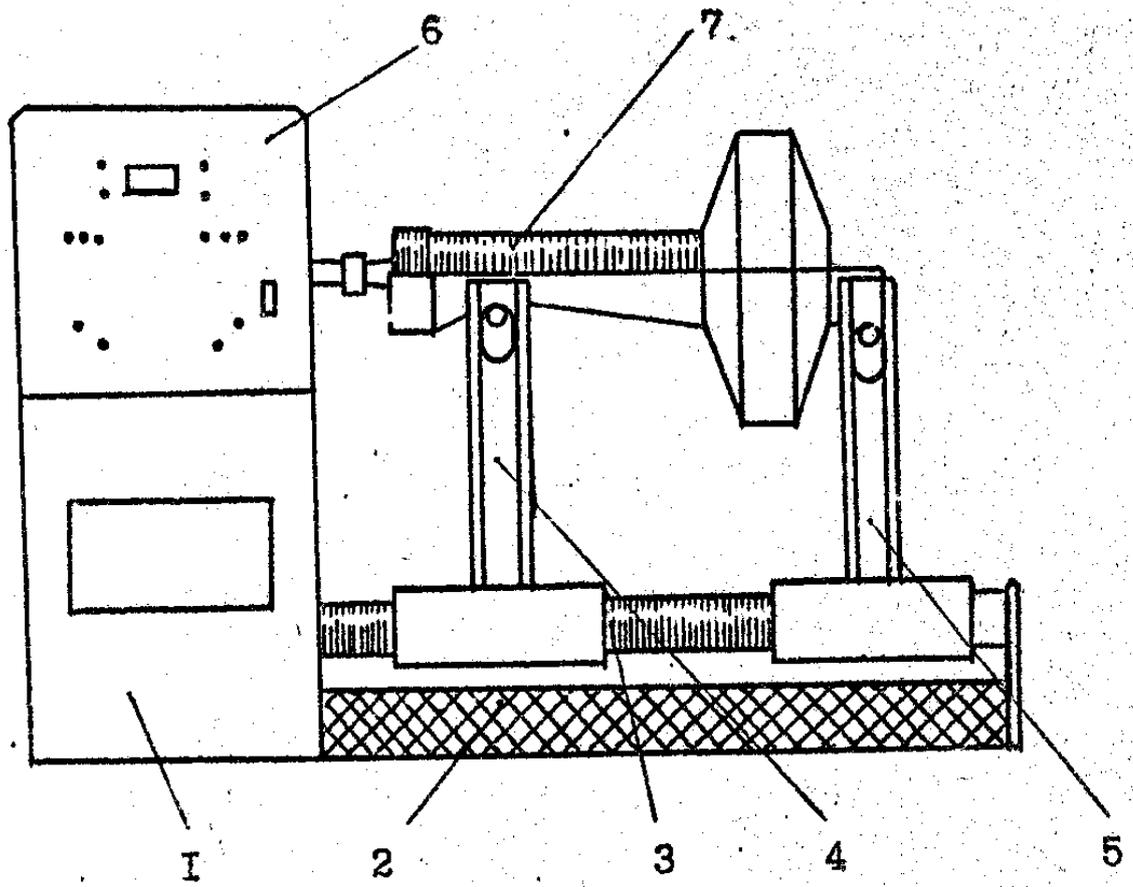


Рис. 6. Общий вид балансировочной машины.

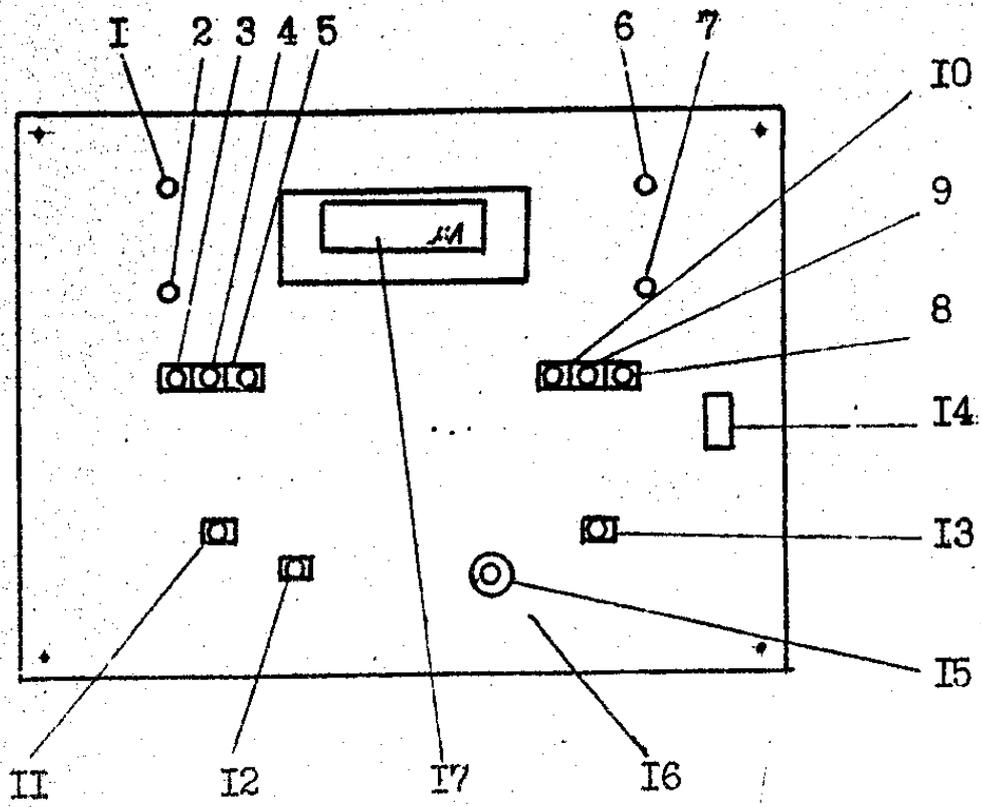


Рис. 7. Пульт управления.

5. Проверка точности балансировки и определение величины остаточного дисбаланса (Рис.4.)

После уравнивания вращающегося ротора ГТД проверка точности динамической балансировки осуществляется круговым обходом фиксированного груза  $Q$  по радиусу  $r$ . Предположим, что такая проверка показала на наличие неуравновешенности  $R$ , равной  $f = Q \cdot r$

Величина статического момента уравнивающего груза будет равна  
 $f = 2 \cdot \Delta M$

где  $\Delta M$  – величина разности весовых моментов противоположно расположенных лопаток. Если величина  $\Delta M$  равна точности балансировки  $g$ , т.е.  $\Delta M = g$ , то помещая на радиусе  $r$  груз весом  $Q$ , получим:

$$f = 2 \cdot \Delta M = 2 \cdot g = Q \cdot r$$

$$Q = 2 \cdot \frac{g}{r}, \text{ откуда}$$

В этом случае может иметь место два случая, характеризующих степень точности динамической балансировки:

если ротор установлен в пределах требований технических условий, тогда  $g > R$ , а величина  $2 \cdot g - r$  будет больше величины остаточной неуравновешенности, т.е.  $2 \cdot g - r > R$ . В этом случае стрелка прибора балансировочной машины будет все время отклоняться в сторону большего дисбаланса, что указывает на достигнутую по техническим условиям точность динамической балансировки;

если ротор неуравновешен в пределах требований технических условий, тогда  $R > g$ , а величина остаточной неуравновешенности будет больше величины  $2 \cdot g - R$ , т.е.  $R > 2 \cdot g - R$ .

В этом случае стрелка прибора будет отклоняться в сторону меньшего дисбаланса, что указывает на недостаточность точности балансировки ротора ГТД.

Если необходимо определить величину остаточной неуравновешенности, то круговой обход можно производить грузом, вес которого знать необязательно. В этом случае определяется величина остаточного отклонения стрелки прибора  $m_{\max}$ , которая равна  $Q = r + R$ , и величина минимального отклонения  $m_{\min}$ , равная  $Q = r - R$ . Разность между максимальным и минимальным отклонением стрелки гальванометра, умножая на масштаб шкалы  $Z$ , равна удвоенной величине неуравновешенности, т.е.  
 $(m_{\max} - m_{\min}) \cdot Z = Q - r + R - Q + r + R = 2R$

откуда находим значение остаточной неуравновешенности

$$R = (m_{\max} - m_{\min}) \cdot \frac{Z}{2}$$

Приложение №2  
 Определение составляющих веса ротора и центробежной силы

Первый режим ротора

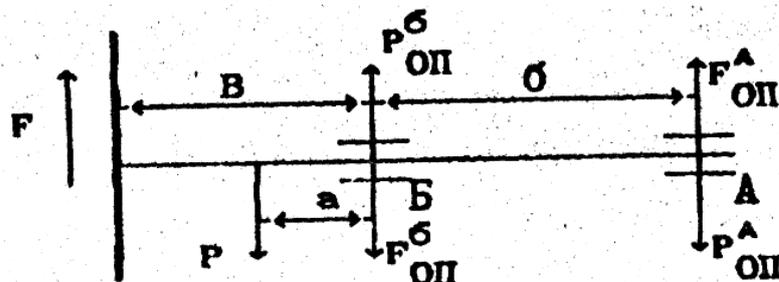
$$F_{оп} < 0.35 \cdot P_{оп}$$

Второй режим ротора

$$F_{оп} = 0.35 \cdot P_{оп}$$

Третий режим ротора

$$F_{оп} > 0.35 \cdot P_{оп} \text{ (резонансный режим)}$$



Опора А  $\Sigma M_B = P a - P_{оп}^A \sigma = 0 ; P_{оп}^A = P \frac{a}{\sigma}$

$\Sigma M_B = -F B + F_{оп}^A \sigma = 0 ; F_{оп}^A = F \frac{B}{\sigma}$

Опора Б  $\Sigma M_A = P(a+\sigma) - P_{оп}^\sigma \sigma = 0 ; P_{оп}^\sigma = P \frac{a+\sigma}{\sigma}$

$\Sigma M_A = -F(B+\sigma) + F_{оп}^\sigma \sigma = 0 ; F_{оп}^\sigma = F \frac{B+\sigma}{\sigma}$