

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра деталей машин и прикладной механики

А.М. Ефанов, Н.В. Зурнаджан, Э.А. Зурнаджан

СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ЗВЕНЬЕВ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программе высшего профессионального образования по направлениям подготовки 280700.62 Техносферная безопасность, 151000.62 Технологические машины и оборудование, 151600.62 Прикладная механика, 190600.62 Эксплуатация транспортных технологических машин и комплексов, 151900.62 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 160400.62 Ракетные комплексы и космонавтика и по специальности 190109.65 Наземные транспортно-технологические средства.

Оренбург
2013

УДК 621.01(076)
ББК 34.41 Я 7
Е90

Рецензент – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики Н.А. Морозов

Ефанов, А.М.

Е90 Статическая и динамическая балансировка вращающихся звеньев: методические указания / А.М.Ефанов, Н.В. Зурнаджан, Э.А. Зурнаджан; Оренбургский гос.ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2013.- 26с.

Основное содержание: цель работы; оборудование; порядок выполнения работы; теоретическая часть; графическое решение; аналитическое решение; контрольные вопросы; приложения.

Методические указания по курсу «Теория механизмов и машин» предназначены для студентов направления подготовки 280700.62 Техносферная безопасность, 151000.62 Технологические машины и оборудование, 151600.62 Прикладная механика, 190600.62 Эксплуатация транспортных технологических машин и комплексов, 151900.62 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 160400.62 Ракетные комплексы и космонавтика и по специальности 190109.65 Наземные транспортно-технологические средства. Всех форм обучения.

УДК 621.01(076)
ББК 34.41 Я 7...

© Ефанов А.М.,
Зурнаджан Н.В.,
Зурнаджан Э.А., 2013
© ОГУ, 2013

Содержание

Лабораторная работа № 2. Статическая и динамическая балансировка вращающихся звеньев.....	4
1 Цель работы	4
2 Оборудование	4
3 Порядок выполнения работы	4
4 Теоретическая часть.....	5
5 Графическое решение	11
6 Аналитическое решение	13
7 Контрольные вопросы	15
Список использованных источников	16
Приложение А(обязательное)	17
Приложение Б(обязательное).....	24

Лабораторная работа № 2. Статическая и динамическая балансировка вращающихся звеньев

Балансировка вращающихся звеньев приобрела особое значение в связи с повышением частоты вращения звеньев, приводящим к резкому увеличению сил и моментов сил инерции от неуравновешенных масс.

1 Цель работы

Уяснение сущности экспериментального полного уравновешивания ротора и ознакомление со способами и аппаратурой для балансировки.

2 Оборудование

Для выполнения работы необходимы установка ТММ-35М с комплектом грузов, чертежные инструменты.

3 Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с теоретической частью настоящих методических указаний.

3.2 По варианту исходных данных (приложение Б) занести заданные значения m_2 , m_3 , m_4 , r_2 , r_3 , r_4 , φ_2 , φ_3 и φ_4 в таблицу отчета (приложение А, таблица А.1).

3.3 Графически и аналитически определить произведения m_1r_1 , m_5r_5 и углы φ_1 и φ_5 .

3.4 На установке ТММ-35М на 2, 3 и 4 диски установить заданные массы m_2 , m_3 и m_4 на заданных расстояниях от оси вращения r_2 , r_3 и r_4 , под заданными углами φ_2 , φ_3 и φ_4 .

3.5 По наличию свободных грузиков определить массы m_1 и m_5 и установить их на 1 и 5 диски на найденные расстояния r_1 и r_5 под найденными углами φ_1 и φ_5 .

3.6 Включить установку и убедиться в полном уравновешивании ротора.

3.7 При наличии биения проверить расчеты и эксперимент повторить.

4 Теоретическая часть

При вращении звена вокруг оси Z с угловой скоростью ω к каждой элементарной точечной массе его будет приложена центробежная сила инерции.

$$F_{инi} = m_i \alpha_{si} = m_i r_i \omega^2$$

Элементарные силы инерции точечных масс всего звена можно свести к главному вектору центробежных сил инерции $-F_{ин}$, Н, приложенному в центре масс звена $-S$, и главному моменту (паре сил) инерции $-M_{ин}$, Нм, действующих в различных плоскостях:

$$F_{ин} = \sum F_{инi} = \omega^2 \sum m_i r_i = \omega^2 m r_s, (1)$$

$$M_{ин} = \left| \sum F_{инi} \cdot \ell_i \right|, (2)$$

где m – масса звена,

r_s - расстояние от оси вращения Z до центра масс неуравновешенного звена,

ℓ_i - расстояние между силами инерции вдоль оси вращения Z .

Сила $-F_{ин}$ и момент $-M_{ин}$ центробежных сил инерции, вращаясь вместе со звеном, вызывают вибрацию в опорах звена и станине, а при резонансе могут произойти поломки и аварии.

Для устранения этих вредных последствий необходимо свести к нулю силу $F_{ин}$ и момент $M_{ин}$, т.е., уравновесить звено. Необходимость уравновешивания быстро вращающихся звеньев можно пояснить числовым примером (рисунок 1).

Пусть звено массой $m = 10$ кг вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 1000$ (1/с).

Расстояние от оси вращения до центра масс $r_s = 0,001$ м.

Сила веса звена: $F_{\sigma} = mg = 10 \cdot 10 = 100 \text{ Н}$.

Сила инерции: $F_{\text{ин}} = ma_s = m\omega^2 r_s = 10 \cdot 1000^2 \cdot 0,001 = 10000 \text{ Н}$.

Сила инерции в 100 раз больше силы веса. Для полного уравнивания вращающегося звена необходимо, чтобы главный вектор $F_{\text{ин}}$ и главный момент $M_{\text{ин}}$ сил инерции были равны нулю.

$$F_{\text{ин}} = 0 \quad (3)$$

$$M_{\text{ин}} = 0 \quad (4)$$

Выполнение только первого условия равносильно условию расположения центра масс на оси вращения звена. Такое уравнивание вращающегося звена называется статическим. Оно применимо для звеньев имеющих малую протяженность вдоль оси вращения (шкивы, маховики и т.п., рисунок 1)

Для статического уравнивания надо в направлении противоположном центру масс установить добавочную (уравнивающую) массу – m_{yp} на расстоянии от оси вращения – r_{yp} , таким образом, чтобы сила инерции уравнивающего груза была равна, но противоположна направлена силе инерции неуравновешенного звена: т.е.,

$$\vec{F}_{yp} = -\vec{F}_{\text{ин}}$$

$$F_{yp} = m_{yp} \cdot \omega^2 r_{yp}$$

$$F_{\text{ин}} = m \cdot \omega^2 r_s$$

или

$$\overrightarrow{m_{yp} \cdot r_{yp}} = -\overrightarrow{mr_s}$$

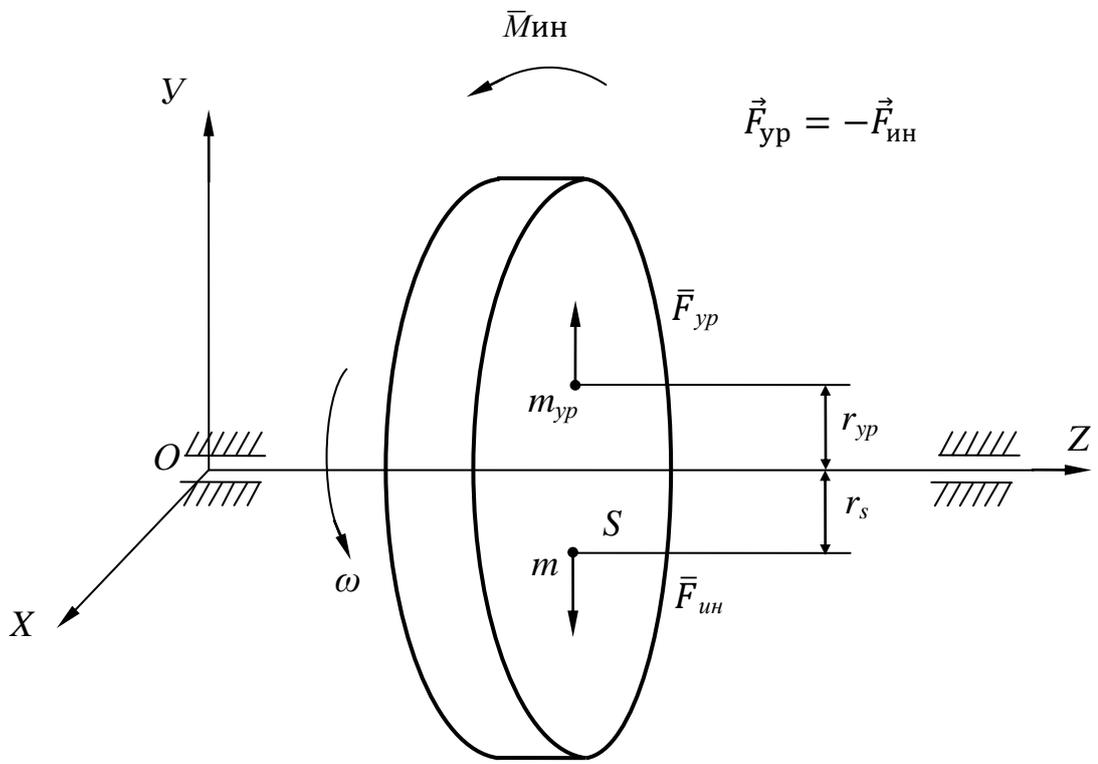


Рисунок 1 – Схема балансировки плоского диска

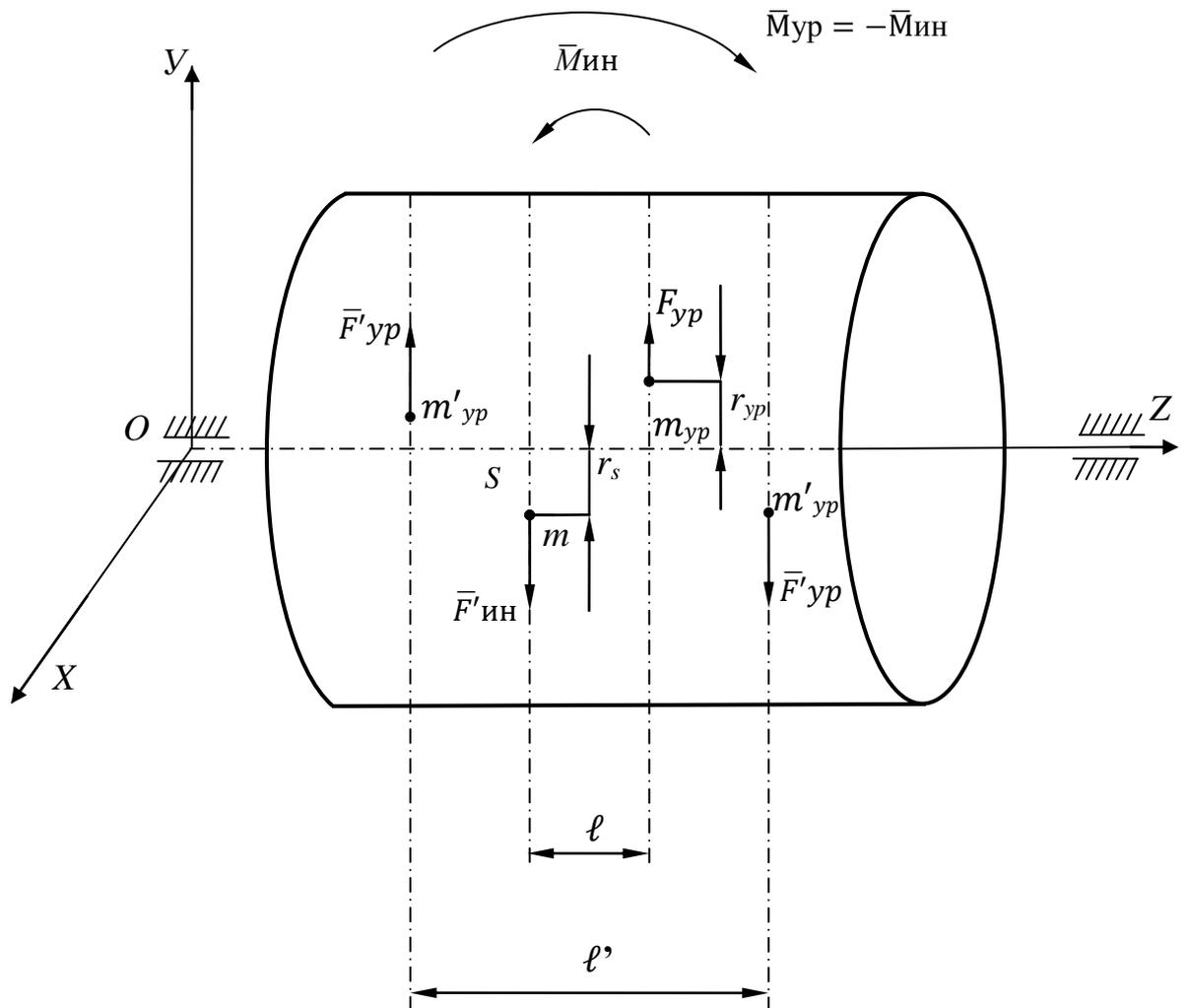


Рисунок 2 – Схема балансировки протяженного ротора

Результирующая сила инерции при этом условии будет равна нулю. То есть, за меру статической неуравновешенности или статического дисбаланса принимают величину статического момента масс звена относительно оси вращения:

$$\Delta = mr_s$$

Если для широкого барабана выполнить то же самое условие, но уравновешивающую массу установить на расстоянии вдоль оси вращения ℓ от центра масс (рисунок 2), то статически барабан будет уравновешен:

$$\overrightarrow{mr_s} = \overrightarrow{m_{yp} \cdot r_{yp}}$$

Но при вращении появляется момент пары сил инерций:

$$M_{ин} = F_{ин} \cdot \ell = m\omega^2 r_s \cdot \ell$$

который также вызывает биения. Для динамической балансировки необходимо выполнить второе условие:

$$M_{ин} = 0$$

т.е., в плоскости действия $M_{ин}$ нужно двумя новыми уравновешивающими грузами m'_{yp} создать равный по величине, но противоположно направленный уравновешивающий момент:

$$M_{yp} = F'_{yp} \cdot \ell' = m'_{yp} \cdot \omega^2 r_s \cdot \ell'$$

или из равенства: $\vec{M}_{ин} = -\vec{M}_{yp}$

$$\overline{mr_s \ell} = - \overline{m'_{yp} r_s} \cdot \ell'$$

Звено будет сбалансировано статически и динамически, если равна нулю сумма произведений неуравновешенных масс m_i на их расстояния от оси вращения Z_i и на расстояния её от произвольной точки на оси вращения до плоскостей вращения этих масс, т.е.:

$$\sum m_i r_i \ell_i = 0$$

Статическое и динамическое уравнивание вращающихся масс осуществляется на установке типа ТММ-35М настольного типа (рисунок 3)

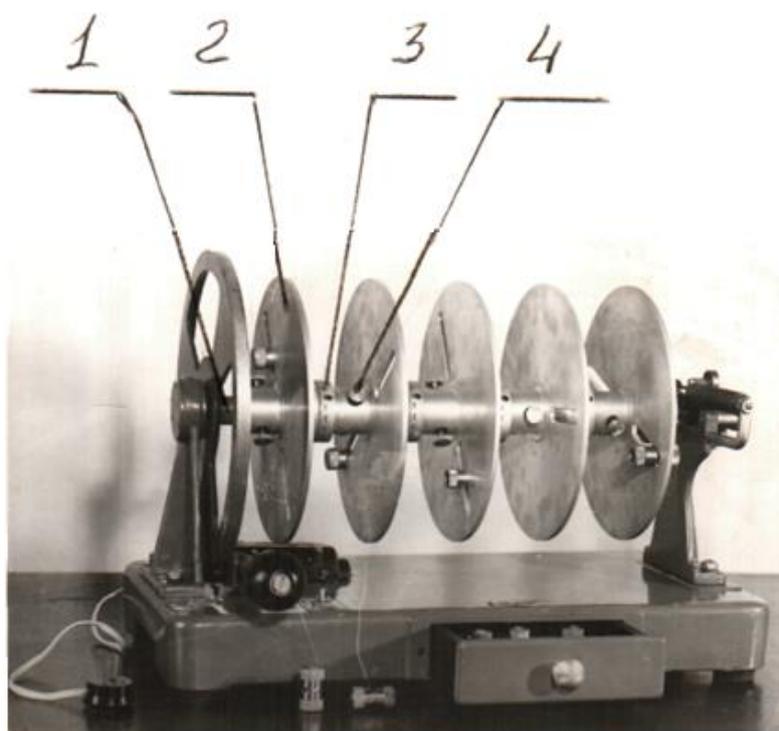


Рисунок 3 – Установка ТММ-35М

Вращающееся звено (ротор) представляет собой вал 1, на котором свободно посажены, пять алюминиевых дисков 2 на расстоянии 80 мм друг от друга.

В осевом направлении диски ограничиваются кольцами 3, жестко закрепленными на валу. Кольца градуированы по образующей через 1 градус, а ступицы дисков имеют риску, позволяющую установить диск под заданным углом. Фиксация дисков осуществляется винтами 4. Диски имеют два сквозных паза: - один для крепления грузов, другой – для уравнивания диска (пазы расположены под углом 180^0). На диске рядом с пазом для крепления грузов привернута шкала, позволяющая установить груз на нужный радиус.

По варианту исходных данных (приложение Б) на 2, 3 и 4 диски задаются массы m_2 , m_3 и m_4 , расстояния от оси вращения до точек их крепления на дисках (радиусы) r_2 , r_3 и r_4 , углы поворота дисков φ_2 , φ_3 и φ_4 . (Приложение А, рисунок А.1). Исходные данные занести в таблицу А.1 приложения А.

Необходимо определить уравнивающие массы m_1 и m_5 , радиусы r_1 и r_5 и углы поворота φ_1 и φ_5 для первого и пятого дисков так, чтобы установка была сбалансирована статически и динамически.

Это достигается решением двух векторных уравнений, которые необходимо решить графическим и аналитическим методом.

$$\sum_{i=1}^5 \overline{m_i r_i} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^5 \overline{m_i r_i} \ell_i = 0 \quad (6)$$

Расчет упрощается если его начать с решения второго уравнения. При этом за точку отсчета удобнее принять точку крепления первого диска, тогда $\ell_1 = 0$ и векторное уравнение (6) принимает вид:

$$\overline{m_2 r_2} \ell_2 + \overline{m_3 r_3} \ell_3 + \overline{m_4 r_4} \ell_4 + \overline{m_5 r_5} \ell_5 = 0$$

5 Графическое решение

Найти модули векторов:

$$m_2 r_2 \ell_2, m_3 r_3 \ell_3, m_4 r_4 \ell_4 \quad (m_1 r_1 \ell_1 = 0).$$

Найти длины векторов в выбранном масштабе, мм

$$\mu_{mr\ell} = \frac{m_i r_i \ell_i}{m_i r_i \ell_i}, \frac{\Gamma \cdot \text{мм}^2}{\text{мм}},$$
$$\overrightarrow{m_2 r_2} \ell_2 = \frac{m_2 r_2 \ell_2}{\mu_{mr\ell}},$$
$$\overrightarrow{m_3 r_3} \ell_3 = \frac{m_3 r_3 \ell_3}{\mu_{mr\ell}},$$
$$\overrightarrow{m_4 r_4} \ell_4 = \frac{m_4 r_4 \ell_4}{\mu_{mr\ell}},$$

- решая графически уравнение (6) на первом плане векторного уравнения (приложение А, рисунок А.2) найти длину и направление вектора $\overrightarrow{m_5 r_5} \ell_5$, мм. Для этого из полюса построения плана – O_1 под углом φ_2 от оси X против вращения часовой стрелки построить вектор $\overrightarrow{m_2 r_2} \ell_2$ (обозначить конец его точкой А).

Из конца этого вектора под углом φ_3 построить вектор $\overrightarrow{m_3 r_3} \ell_3$ (точка В). Из точки В под углом φ_4 построить вектор $\overrightarrow{m_4 r_4} \ell_4$ (точка С). Конец последнего вектора (точку С) соединить с началом координат – O_1 .

Вектор CO_1 есть вектор $\overrightarrow{m_5 r_5} \ell_5$. Его длину (мм) и направление (угол φ_5) замерить на плане построения.

$$\text{Модуль: } m_5 r_5 \ell_5 = \overrightarrow{m_5 r_5} \ell_5 \cdot \mu_{mr\ell}, \Gamma \cdot \text{мм}^2.$$

$$\text{Произведение: } m_5 r_5 = \frac{m_5 r_5 \ell_5}{\ell_5}, \Gamma \cdot \text{мм}.$$

Значения $m_5 r_5 \ell_5$, $m_5 r_5$ и φ_5 занести в таблицу А.1 (приложение А).

На втором плане решая графическое уравнение (5) (приложение А, рисунок А.3) от начала координат O_2 последовательно построить вектора $\overline{m_2 r_2}$, $\overline{m_3 r_3}$, $\overline{m_4 r_4}$ и $\overline{m_5 r_5}$ и в масштабе построения:

$$\mu_{mr} = \frac{m_i r_i}{\overline{m_i r_i}}, \quad \frac{\Gamma \cdot \text{мм}}{\text{мм}}$$

Конец последнего вектора (точку Д) соединить с началом координат O_2 .

Вектор DO_2 есть вектор $\overline{m_1 r_1}$. Его длину (мм) и направление (угол φ_1) замерить на плане построения.

Модуль: $m_1 r_1 = \overline{m_1 r_1} \cdot \mu_{mr}$, Г·мм.

Полученные значения $m_1 r_1$ и φ_1 занести в таблицу А.1. (приложение А).

Полюсы построения планов O_1 и O_2 и масштабные коэффициенты выбирать произвольно, так, чтобы графики решения не были мелкими и умещались бы каждый на одной странице отчета.

6 Аналитическое решение

Решить второе векторное уравнение для чего найти проекции X_5 и Y_5 вектора $\overrightarrow{m_5 r_5 \ell_5}$ на координатные оси X и Y . (Приложение А, рисунок А.2).

$$\chi_5 = + \sum_{i=2}^4 \chi_i = + \sum_{i=2}^4 m_i r_i \ell_i \cdot \cos \varphi_i \quad (7)$$

$$\gamma_5 = + \sum_{i=2}^4 \gamma_i = + \sum_{i=2}^4 m_i r_i \ell_i \cdot \sin \varphi_i \quad (8)$$

Модуль вектора: $m_5 r_5 \ell_5 = \sqrt{x_5^2 + y_5^2}$, (9)

Произведение: $m_5 r_5 = \frac{m_5 r_5 \ell_5}{\ell_5}$, Г·мм (10)

Угол φ_5 определяется в зависимости от того, в какой четверти находится точка C – начало искомого вектора $\overrightarrow{m_5 r_5 \ell_5}$, что можно узнать по знакам при X и Y (рисунок 4)

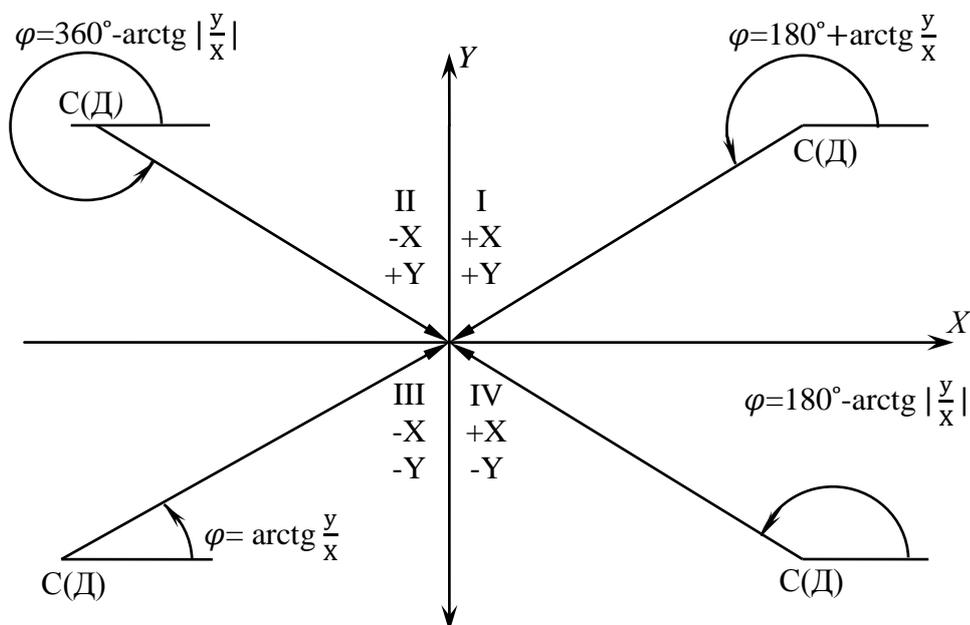


Рисунок 4 – Определение углов

Решить векторное уравнение (5), для чего найти проекции X_I и Y_I вектора $\overrightarrow{m_1 r_1}$ на координатные оси X и Y . (приложение А, рисунок А.3)

$$\chi_1 = + \sum_{i=2}^5 \chi_i = + \sum_{i=2}^5 m_i r_i \cdot \cos \varphi_i, \quad (11)$$

$$\gamma_1 = + \sum_{i=2}^5 \gamma_i = + \sum_{i=2}^5 m_i r_i \cdot \sin \varphi_i. \quad (12)$$

$$\text{Модуль вектора: } m_1 r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \quad (13)$$

Угол φ_1 определяется аналогично углу φ_5 по формулам, приведенным на рисунке 4. Результаты расчетов занести в таблицу А.2 (приложение А).

Если результаты графического и аналитического расчетов имеют небольшие расхождения (не более 1 %), то следует переходить к проведению эксперимента.

По полученным произведениям $m_1 r_1$ и $m_5 r_5$ определить массы m_1 и m_5 и радиусы установки их на дисках r_1 и r_5 .

Например, $m_1 r_1 = 1451$ г·мм.

Экспериментальная установка дает возможность изменять радиус в пределах от 40 до 90 мм.

Тогда массу m_1 можно выбирать в пределах:

$$m_1 = \frac{m_1 r_1}{40 \dots 90} = \frac{1451}{40 \dots 90} = 36,3 \dots 16,3 \text{ г}$$

Пусть имеется свободный грузик массой $m_1 = 20$ г, тогда

$$r_1 = \frac{m_1 r_1}{m_1} = \frac{1451}{20} = 72,55 \text{ мм}$$

Аналогично выбирается масса m_5 и радиус r_5 установки грузика на 5 диске. Для проведения эксперимента на машине на диски 1 и 5 установить массы m_1 и m_5 на расстояниях r_1 и r_5 под углами φ_1 и φ_5 .

Массы и радиусы можно менять, оставив произведения mr без изменений.

Проверить статическую балансировку ротора. В статическом состоянии ротор должен сохранять положение безразличного равновесия.

Включить электродвигатель и сообщить ротору вращение. Если корпус правого подпружиненного подшипника находится в покое от начала вращения до остановки, то он статически и динамически уравновешен. Если ротор не уравновешен, то будет иметь место биение подпружиненного подшипника.

Внимание!

Если в ходе эксперимента будет обнаружен статический или динамический дисбаланс эксперимент немедленно приостановить и проверить расчеты. Вращение неуравновешенного ротора может привести к разрушению установки.

7 Контрольные вопросы

1. Что является причиной неуравновешенности вращающихся роторов? К каким отрицательным последствиям она приводит?
2. Назовите и напишите условие полной уравновешенности звена.
3. Какие задачи ставятся при статическом и динамическом уравновешивании звеньев?
4. Что называется балансировкой? Для каких звеньев должна проводиться динамическая балансировка, и для каких статическая?
5. Что такое главный вектор и главный момент системы сил?
6. Как влияет угловая скорость на амплитуду колебания?
7. Как найти векторное произведение по модулю и направлению.

Список использованных источников

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин/ И.И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД Альянс, 2012. – 640 с.
2. Тимофеев, Г.А. Теория механизмов и машин/ Г.А. Тимофеев. – М.:ЮРАЙТ, 2011. – 351 с.
3. Ефанов, А.М. Теория механизмов и машин/ А.М. Ефанов, В.П. Ковалевский. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2006. – 267 с.: ил. 198.
4. Козловский, М.З. Теория механизмов и машин/ М.З. Козловский. – 2-е изд. – М.: Академия, 2008. – 559 с.

Приложение А

(обязательное)

Пример выполнения лабораторной работы и оформление отчета.

Лабораторная работа № 2. Статическая и динамическая балансировка вращающихся звеньев

Цель работы

Уяснение сущности экспериментального полного уравновешивания ротора и ознакомление со способами и аппаратурой для балансировки.

А.1 Эскиз установки для проведения эксперимента (массы расположить в соответствии с заданным вариантом)

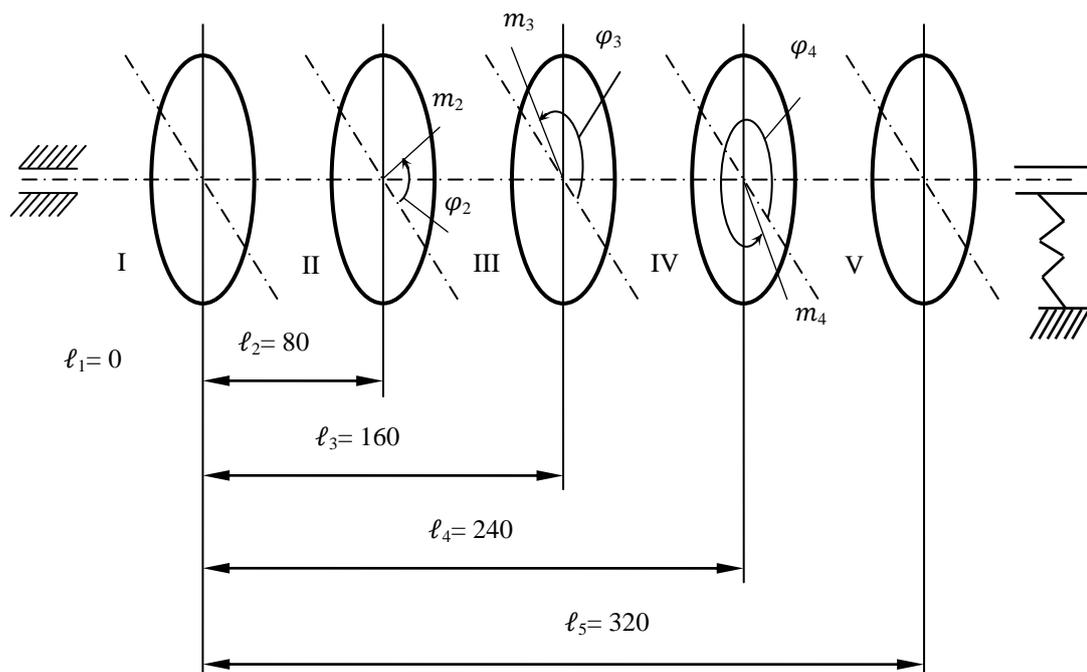


Рисунок А.1 – Схема установки ТММ-35М

А.2 Графическое решение векторных уравнений

Таблица А.1 – Таблица параметров статической и динамической балансировки

№ диска	Масса груза m , г	Расстояние от центра диска r , мм	Угол поворота диска φ , град	Расстояние от начала координат ℓ , мм	Динамическое равновесие		Статическое равновесие	
					$\sum_{i=1}^5 \overrightarrow{m_i r_i} \ell_i = 0$	$\sum_{i=1}^5 \overrightarrow{m_i r_i} = 0$	$m_i r_i \ell_i$ Г·мм·мм	$\overrightarrow{m_i r_i \ell_i}$ в масшт. (мм)
1	50	57,3	250,5	0	0	0	2850	114
2	40	60	40	80	192000	76,8	2400	96
3	60	65	110	160	624000	249,6	3900	156
4	30	50	310	240	360000	144	1500	60
5	20	72,5	249	320	465000	186	1453	58

Графическое решение уравнения (6), (рисунок А.2)

$$\sum_{i=1}^5 \overrightarrow{m_i r_i} \ell_i = 0$$

Масштабный коэффициент:

$$\mu_{mr\ell} = 2500, \quad \frac{\text{Г} \cdot \text{мм}^2}{\text{мм}}$$

Результаты замера:

$$\overrightarrow{m_5 r_5 \ell_5} = 186 \text{ мм} \quad \varphi_5 = 249^\circ,$$

$$m_5 r_5 \ell_5 = m_5 r_5 \ell_5 \cdot \mu_{mr\ell} = 186 \cdot 2500 = 465000 \text{ Г} \cdot \text{мм}^2,$$

$$m_5 r_5 = \frac{m_5 r_5 \ell_5}{\ell_5} = \frac{465000}{320} = 1453 \text{ Г} \cdot \text{мм}.,$$

$$\text{Примем } m_5 = 20 \text{ г, тогда } r_5 = \frac{m_5 r_5}{m_5} = \frac{2865}{50} = \frac{1453}{20} = 72,5 \text{ мм.}$$

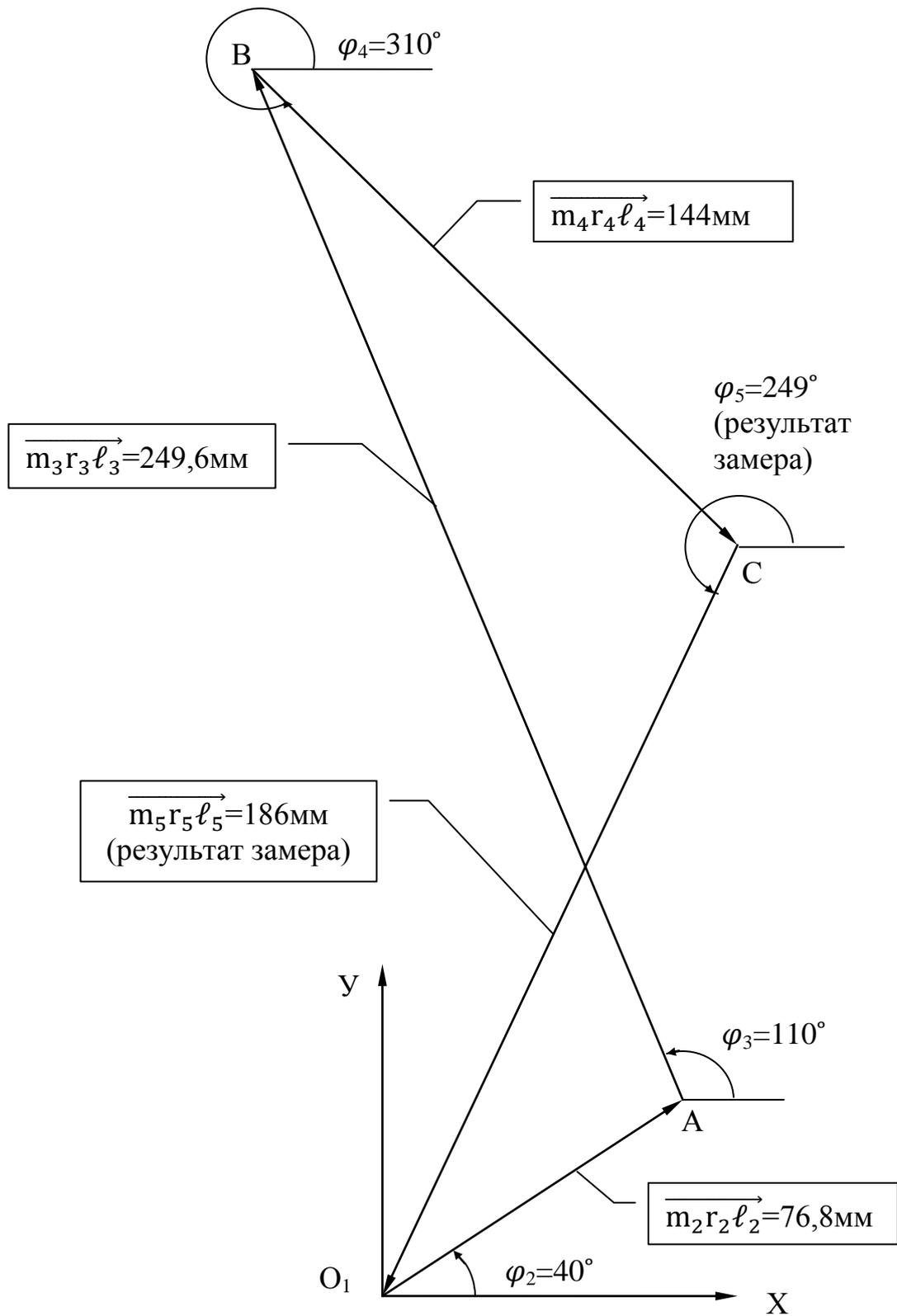


Рисунок А.2 – Векторное уравнение сил

Графическое решение уравнения (5), (рисунок А.3)

$$\sum_{i=1}^5 m_i r_i = 0$$

Масштабный коэффициент:

$$\mu_{mr} = 25, \quad \frac{\Gamma \cdot \text{мм}}{\text{мм}}$$

Результаты замера:

$$\overline{m_1 r_1} = 114 \text{ мм}, \quad \varphi_1 = 250,5^\circ,$$

$$m_1 r_1 = \overline{m_1 r_1} \cdot \mu_{mr} = 114 \cdot 25 = 2850 \text{ г} \cdot \text{мм}.,$$

$$\text{Примем } m_1 = 50 \text{ г, тогда } r_1 = \frac{m_1 r_1}{m_1} = \frac{2850}{50} = 57 \text{ мм}.$$

Примечания

1 Перед установкой грузиков на ротор, радиус и угол φ , полученные согласно расчету, округлить до целых чисел.

2 Массы и радиусы можно менять, оставив произведение $m \cdot r$ без изменения.

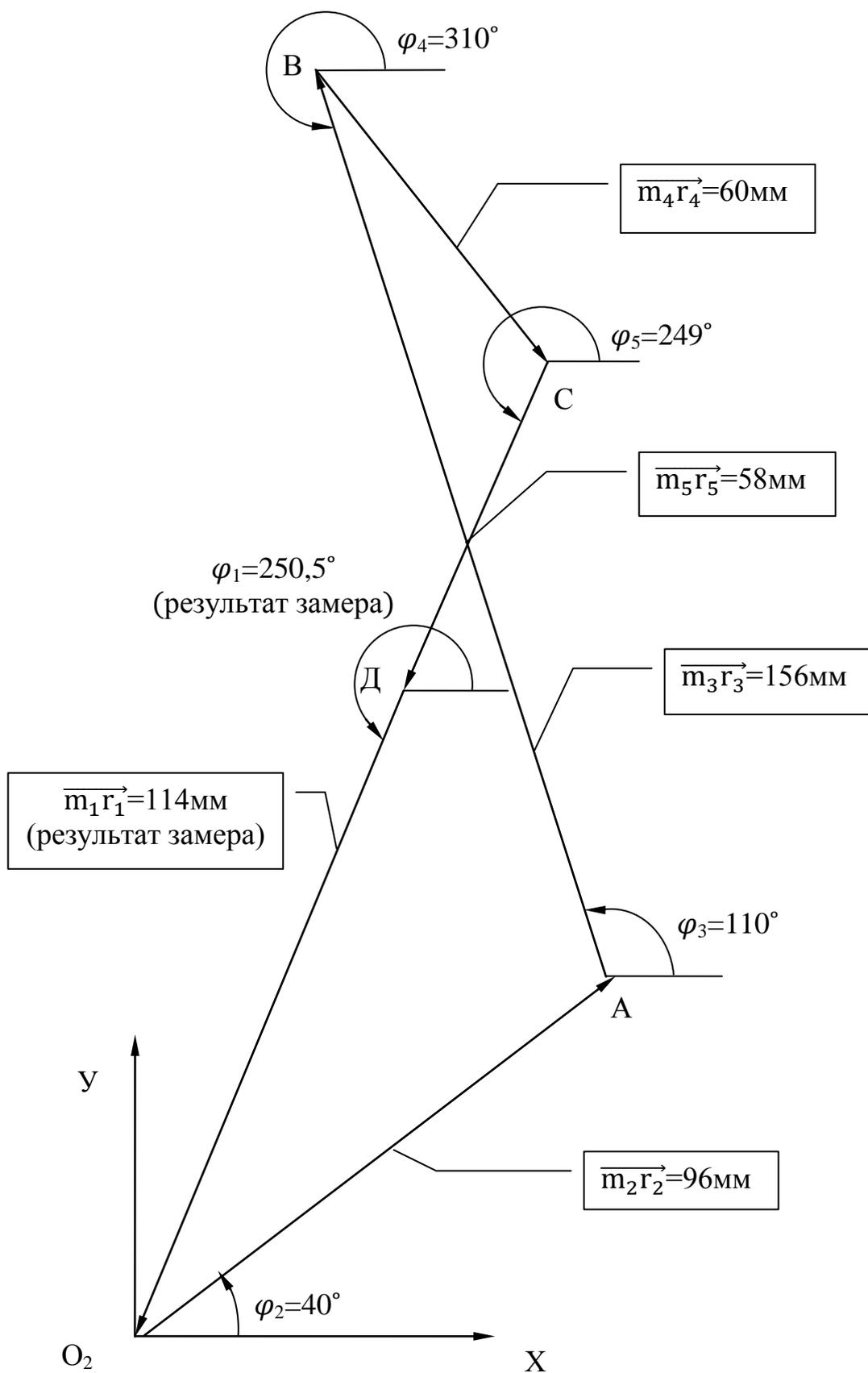


Рисунок А.3 – Векторное уравнение сил

А.3 Аналитическое решение векторных уравнений

Таблица А.2 - таблица параметров статической и динамической балансировки

№ диска	Масса груза m_i , г	Расстояние от центра диска r_i , мм	Угол поворота диска φ_i , град	Расстояние от начала координат	Динамическое равновесие		Статическое равновесие	
					$\sum_{i=1}^5 m_i r_i \ell_i = 0$	$\sum_{i=1}^5 m_i r_i = 0$	$x_i = m_i r_i \ell_i \cos \varphi_i$	$y_i = m_i r_i \ell_i \sin \varphi_i$
1	50	57,3	250,6	0	0	0		
2	40	60	40	80	147080,6	123415,3	1838,5	1542,7
3	60	65	110	160	-213420,5	586368,4	-1333,9	3664,8
4	30	50	310	240	231403,7	-275775,8	964,2	-1149
5	20	72,55	249,2	320	-	-	-515,7	-1356,3

$$x_5 = +(x_2+x_3+x_4) = +(147080,6 - 213420,5 + 231403,7) = +165063,8$$

$$y_5 = +(y_2+y_3+y_4) = +(123415,3 + 586368,4 - 275775,8) = +434007,9$$

$$m_5 r_5 \ell_5 = \sqrt{x_5^2 + y_5^2} = \sqrt{165063,8^2 + 434007,9^2} = 464307 \text{ Г} \cdot \text{мм} \cdot \text{мм.}$$

$$\text{Примем } m_5 = 20 \text{ г, тогда } r_5 = \frac{m_5 r_5 \ell_5}{m_5 r_5} = \frac{46 \cdot 307}{20 \cdot 320} = 72,55 \text{ мм}$$

$$\varphi_5 = 180^\circ + \text{arc tg} \frac{y_5}{x_5} = 180^\circ + \text{arc tg} \frac{434007,9}{165663,8} = 249,2^\circ$$

$$x_1 = +(x_2+x_3+x_4+x_5) = +(1838,5 - 1333,9 + 964,2 - 515,7) = +953,1$$

$$y_1 = +(y_2+y_3+y_4+y_5) = +(1542,7 + 3664,8 - 1149 - 1356,3) = +2702,2$$

$$m_1 r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} = \sqrt{353,1^2 + 2702,2^2} = 2865.$$

Примем $m_1 = 50$ г, тогда $r_1 = \frac{m_1 r_1}{m_1} = \frac{2865}{50} = 57,3$ мм

$$\varphi_1 = 180^\circ + \operatorname{arc\,tg} \frac{y_1}{x_1} = 180^\circ + \operatorname{arc\,tg} \frac{2702,2}{953,1} = 250,6^\circ$$

Работу выполнил _____

Работу принял _____

Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Варианты исходных данных

Вариант	диск	m	r	φ°	Вариант	диск	m	r	φ°
1	2	70	60	50	13	2	50	60	40
	3	60	80	150		3	70	90	330
	4	70	85	250		4	60	70	110
2	2	40	90	120	14	2	60	90	230
	3	50	60	20		3	50	80	350
	4	70	70	260		4	70	50	50
3	2	60	60	300	15	2	50	60	110
	3	70	80	110		3	40	70	310
	4	50	60	60		4	60	80	110
4	2	50	90	10	16	2	50	80	110
	3	40	70	240		3	60	90	240
	4	60	80	320		4	70	60	300
5	2	70	60	210	17	2	40	90	280
	3	40	80	260		3	70	60	350
	4	50	90	70		4	60	80	150
6	2	70	40	20	18	2	60	80	160
	3	40	80	290		3	50	70	260
	4	60	70	70		4	70	90	320
7	2	40	80	80	19	2	40	90	70
	3	70	90	150		3	60	80	150
	4	60	40	290		4	70	60	340
8	2	50	90	210	20	2	60	80	280
	3	60	80	340		3	70	90	110
	4	70	70	40		4	60	70	350
9	2	60	70	100	21	2	70	90	300
	3	70	80	230		3	70	60	350
	4	40	90	20		4	40	80	120
10	2	40	90	280	22	2	40	80	50
	3	50	60	60		3	60	90	140
	4	60	70	140		4	50	60	210
11	2	70	80	10	23	2	50	70	220
	3	40	80	310		3	70	80	40
	4	60	90	120		4	40	90	330
12	2	60	80	160	24	2	50	80	40
	3	40	70	210		3	60	90	350
	4	70	90	330		4	40	60	150

Продолжение таблицы Б.1

Вариант	диск	m	r	φ°	Вариант	диск	m	r	φ°
25	2	70	90	20	38	2	60	75	15
	3	40	80	110		3	40	65	85
	4	60	70	200		4	70	55	200
26	2	60	70	50	39	2	70	80	70
	3	40	90	150		3	50	60	210
	4	70	60	230		4	40	50	220
27	2	40	80	290	40	2	70	70	150
	3	60	60	190		3	60	90	200
	4	70	90	120		4	50	60	300
28	2	50	90	50	41	2	60	90	25
	3	60	60	340		3	40	80	170
	4	70	80	160		4	50	80	310
29	2	70	80	40	42	2	50	60	75
	3	50	90	110		3	50	80	10
	4	60	70	220		4	60	70	140
30	2	40	50	5	43	2	60	50	280
	3	50	65	65		3	60	60	340
	4	60	90	160		4	70	60	50
31	2	40	85	25	44	2	40	90	40
	3	60	70	110		3	60	70	140
	4	70	60	260		4	60	60	250
32	2	40	75	40	45	2	40	80	145
	3	50	85	350		3	50	90	210
	4	70	65	150		4	50	70	340
33	2	70	50	290	46	2	60	50	200
	3	40	65	210		3	70	80	290
	4	50	80	10		4	60	90	15
34	2	70	85	80	47	2	40	75	35
	3	40	50	110		3	70	65	85
	4	60	75	260		4	70	55	200
35	2	70	50	250	48	2	60	80	55
	3	60	80	220		3	50	65	115
	4	40	90	120		4	70	90	235
36	2	70	80	140	49	2	70	55	110
	3	60	50	230		3	40	90	260
	4	50	75	340		4	50	70	340
37	2	60	90	300	50	2	60	60	350
	3	40	60	210		3	70	70	210
	4	50	80	120		4	40	70	125

Продолжение таблицы Б.1

Вариант	диск	m	r	φ°	Вариант	диск	m	r	φ°
51	2	60	80	40	54	2	70	50	250
	3	40	80	80		3	40	90	160
	4	50	60	200		4	50	70	330
52	2	50	90	75	55	2	60	90	260
	3	70	70	230		3	40	85	190
	4	40	80	340		4	70	60	15
53	2	60	90	100	56	2			
	3	40	90	220		3			
	4	50	60	310		4			