

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ДГТУ)

ФАКУЛЬТЕТ: АВТОМАТИЗАЦИЯ, МЕХАТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
КАФЕДРА: АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к контрольной работе

по дисциплине: Моделирование систем и процессов
для студентов: Заочной формы обучения по направлению
15.03.04 “Автоматизация технологических
процессов и производств”
автор: к.т.н. доцент Чувейко М.В.

Аннотация

Приведены пояснения по выбору варианта задания для контрольной работы по дисциплине “Моделирование систем и процессов”, а также пояснения по выполнению разделов контрольной работы. Методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения по направлению 15.03.04 “Автоматизация технологических процессов и производств”.

Содержание

1	Цели и задачи	4
2	Выбор варианта задания	4
3	Задание на контрольную работу	4
3.1	Общие сведения	4
3.2	Основные этапы выполнения	5
3.3	Рекомендации по выполнению и оформлению	8
4	Индивидуальные задания	9
	Список литературы	110
	Приложение А Пример выполнения контрольной работы	111

1 Цели и задачи

Целью выполнения данной контрольной работы является получение навыков в осуществлении математического моделирования механических систем с применением средств аналитической механики. Достижение данной цели обеспечивается путем выполнения полного цикла моделирования начиная от составления уравнений динамики (уравнений Лагранжа 2-ого рода) до получения графиков переходных процессов с использованием средств компьютерного моделирования.

2 Выбор варианта задания

Исходными данными для выполнения контрольной работы является механическая система и её параметры. Для выбора задания необходимо:

- а) Определить номер варианта N. Номер варианта соответствует двум последним цифрам номера зачетной книжки.
- б) Выбрать в соответствии со своим номером варианта параметры исследуемой системы в главе 4.

3 Задание на контрольную работу

3.1 Общие сведения

В данном разделе приводится перечень заданий которые необходимо выполнить в контрольной работе. По каждому заданию даны краткие указания, а также ссылки на литературные источники в которых подробно освещены соответствующие вопросы.

Выполнение работы рекомендуется осуществлять в соответствии с примером выполнения, приведенном в приложении к данному методическому пособию.

3.2 Основные этапы выполнения

Для успешного выполнения работы необходимо осуществление следующих пунктов контрольной работы:

Выбор задания. Выбрать индивидуальное задание (см. главу 2).

Расчет параметров. Произвести расчет основных параметров системы, а именно: массы дисков, моменты инерции дисков. Для выполнения расчета массы дисков использовать формулу для определения массы сплошного цилиндра по известной плотности материала:

$$M = \pi \rho H \frac{D^2}{4}, \quad (1)$$

где: ρ - плотность материала;

H - глубина цилиндра;

D - диаметр цилиндра.

Для выполнения расчета момента инерции дисков использовать формулу для определения момента инерции сплошного цилиндра по известной массе:

$$J = 0.5M \frac{D^2}{4}, \quad (2)$$

где: M - масса диска.

Источники информации: [1].

Определение кинематических соотношений. Задать набор конфигурационных переменных для элементов системы (дисков, груза и подвижного конца пружины) из предположения что последние могут совершать независимые движения.

Учитывая механические связи между элементами системы, определить кинематические соотношения между введенными конфигурационными переменными и их производными. Учитывая что система обладает одной степенью свободы назначить произвольную конфигурационную переменную как обобщенную координату (например положение груза).

Составление уравнений динамики механической системы Определить функцию кинетической энергии системы. Для этого получить кинетическую энергию отдельных элементов системы в их естественных координатах. Используя аддитивное свойство кинетической энергии получить функцию кинетической энергии системы как сумму функций кинетических энергий отдельных её элементов. Используя полученные ранее кинематические соотношения, выразить все конфигурационные переменные и их производные через обобщенную координату (через её производную).

Получить функцию потенциальной энергии системы. Для этого получить потенциальную энергию отдельных элементов системы в их естественных координатах. Используя аддитивное свойство потенциальной энергии получить функцию потенциальной энергии системы как сумму функций потенциальных энергий отдельных её элементов. Используя полученные ранее кинематические соотношения, выразить все конфигурационные переменные через обобщенную координату.

Получить диссипативную функцию Релея для системы. Диссипация в системе обусловлена наличием диссипативных сил со стороны пружины. Учитывая что один конец пружины является неподвижным, то скорость сжатия/растяжения пружины определяется только скоростью подвижного конца v . С учетом этого диссипативная функция Релея будет иметь вид:

$$R = \frac{hv^2}{2}, \quad (3)$$

где h - коэффициент диссипации пружины.

Используя полученные ранее кинематические соотношения, выразить v через обобщенную координату (через её производную). Используя полученные функции построить математическую модель механической системы. Для этого необходимо использовать уравнение Лагранжа 2-ого рода для диссипативных систем:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (4)$$

где: q_i - обобщенные координаты;

Q_i - обобщенные силы;

L - Лагранжиан системы (разность функций кинетической и потенциальной энергий).

При этом следует учесть, что обобщенная сила определяется по формуле:

$$Q_i = -\frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i}.$$

Источники информации: [1], [2].

Исследование линеаризованной системы. Найти стационарную точку, то есть точку равновесия системы. Для нахождения стационарной точки необходимо учесть то обстоятельство, что в стационарном режиме функционирования все производные равны нулю. Это позволяет определить значение обобщенных координат соответствующих данному режиму функционирования системы используя уравнения динамики механической системы. Совокупность найденных обобщенных координат и определяют стационарную точку системы.

Линеаризовать математическую модель механической системы в окрестности найденной стационарной точки. Для этого удобно привести дифференциальное уравнение модели механической системы к форме Коши. Якобиан полученной системы уравнений определит системную матрицу линеаризованной системы уравнений.

Источники информации: [3].

Компьютерное моделирование. Произвести компьютерное моделирование не линеаризованных уравнений динамики механической системы. Для проведения моделирования в качестве начальных условий выбрать координаты любой точки в окрестности стационарной. Получить графики переходных процессов, а именно график изменения положения груза во времени.

Источники информации: [4], [5].

Компьютерное моделирование линеаризованной системы. Произвести компьютерное моделирование линеаризованной системы по аналогии с компьютерным моделированием оригинальной нелинейной системы. Для проведения моделирования в качестве начальных условий выбрать координаты точки, использованной в качестве начальной в предыдущем пункте.

Выводы о проделанной работе. Сделать выводы о навыках усвоенных в процессе выполнения работы. Сравнить результаты динамики линеаризованной и нелинейной моделей.

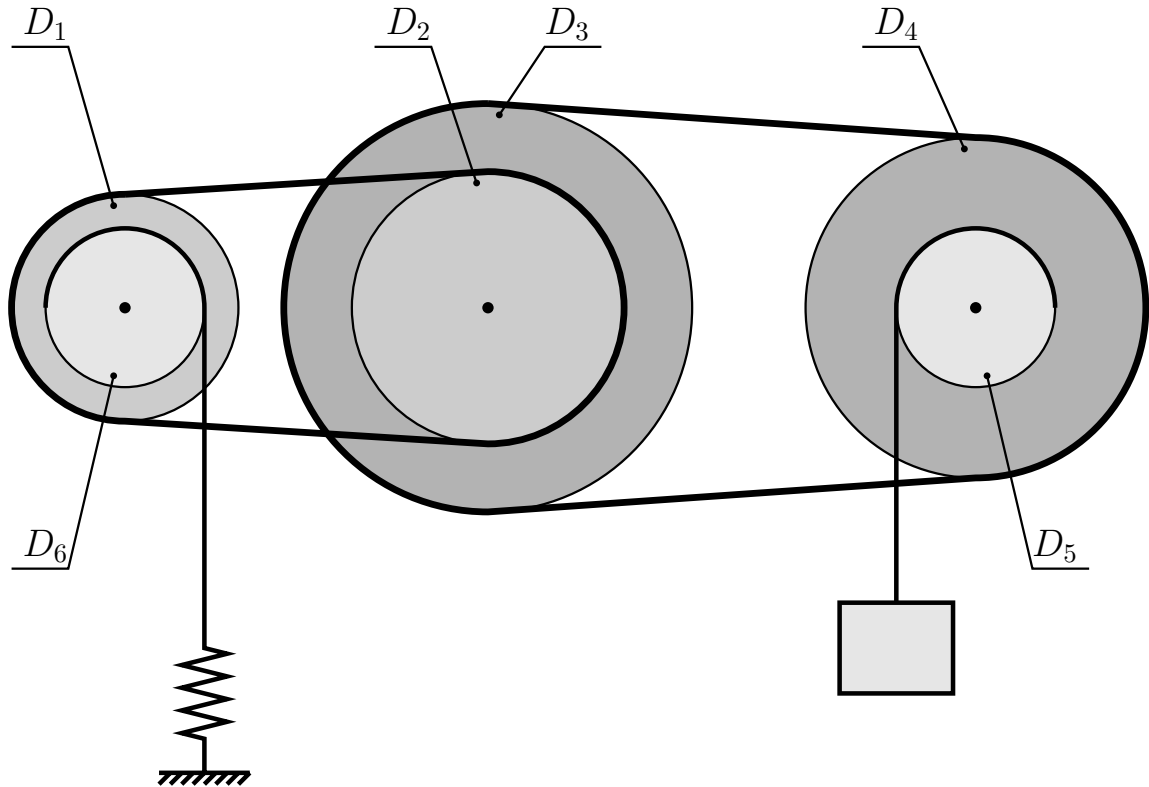
3.3 Рекомендации по выполнению и оформлению

В контрольной работе необходимо приводить все схемы, графики, аналитические выкладки при выводе уравнений и других выражений. В работе присутствует довольно большое количество сложных вычислительных операций. Эти вычисления можно выполнять без применения ЭВМ. В этом случае подробное описание процесса вычислений приводится в приложении к контрольной работе. Если для вычисления используется ЭВМ, то их детальное описание в контрольной работе можно не приводить. Вместо этого приводятся листинги программ (тексты программ) при помощи которых выполнялись вычисления.

Для проведения численного моделирования динамики динамической системы использование ЭВМ так же не является необходимым. Допускается ручное вычисление методом Рунге-Кутты с приведением всех соответствующих расчетов в тексте контрольной работы. При использовании ЭВМ для проведения вычислений необходимо привести листинги программ или, в случае использования для моделирования программ типа Simulink, снимки с экрана (screenshot), а также графики выходного сигнала.

4 Индивидуальные задания

Вариант №0



Диаметры дисков: $D_1 = 142\text{мм}$, $D_2 = 144\text{мм}$, $D_3 = 188\text{мм}$, $D_4 = 172\text{мм}$, $D_5 = 110\text{мм}$, $D_6 = 134\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 7\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

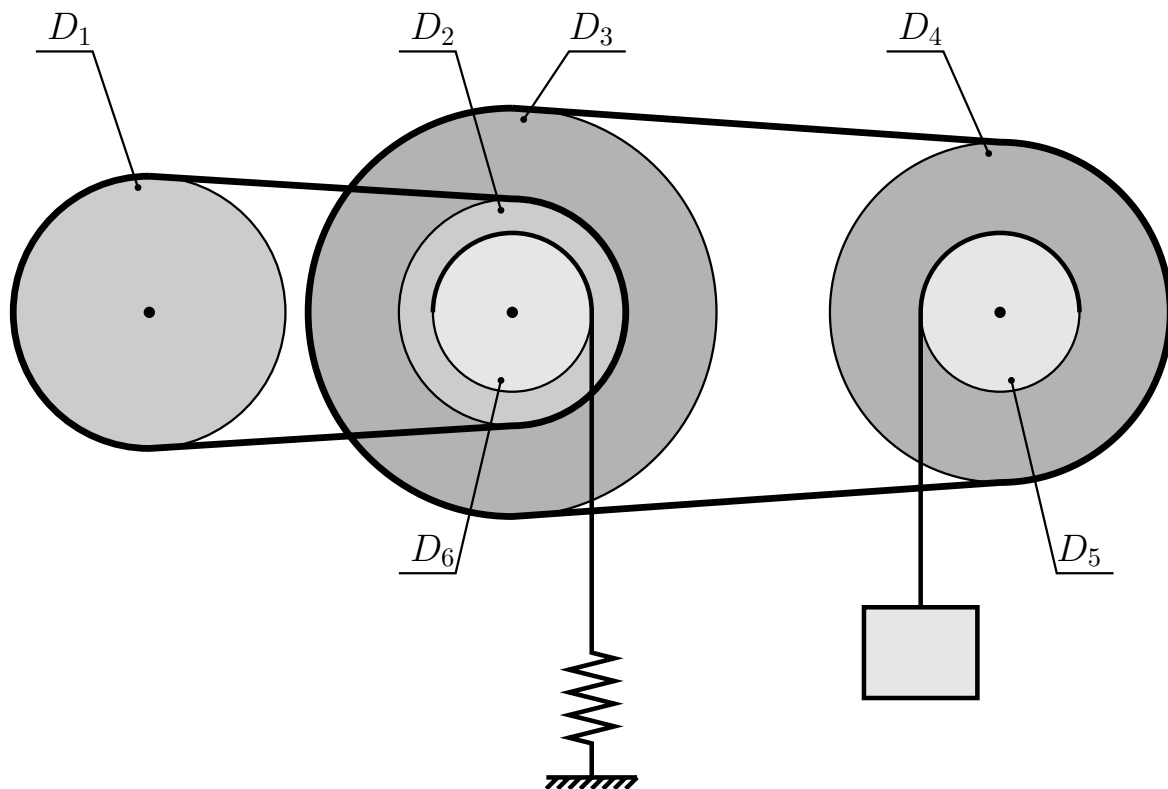
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 798x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{нс/м}$.

Вариант №1



Диаметры дисков: $D_1 = 116\text{мм}$, $D_2 = 104\text{мм}$, $D_3 = 152\text{мм}$, $D_4 = 118\text{мм}$, $D_5 = 150\text{мм}$, $D_6 = 176\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 19\text{мм}$, $H_2 = 15\text{мм}$, $H_3 = 10\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 8\text{мм}$.

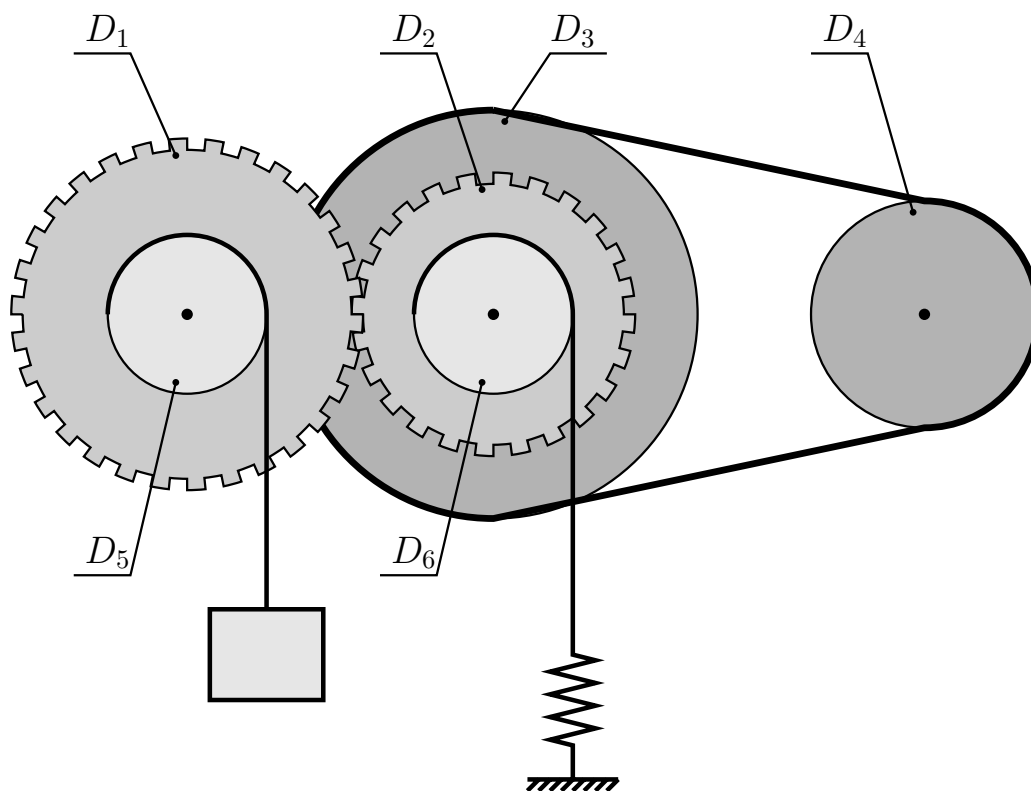
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 235x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №2



Диаметры дисков: $D_1 = 152\text{мм}$, $D_2 = 136\text{мм}$, $D_3 = 190\text{мм}$, $D_4 = 130\text{мм}$, $D_5 = 130\text{мм}$, $D_6 = 172\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 16\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

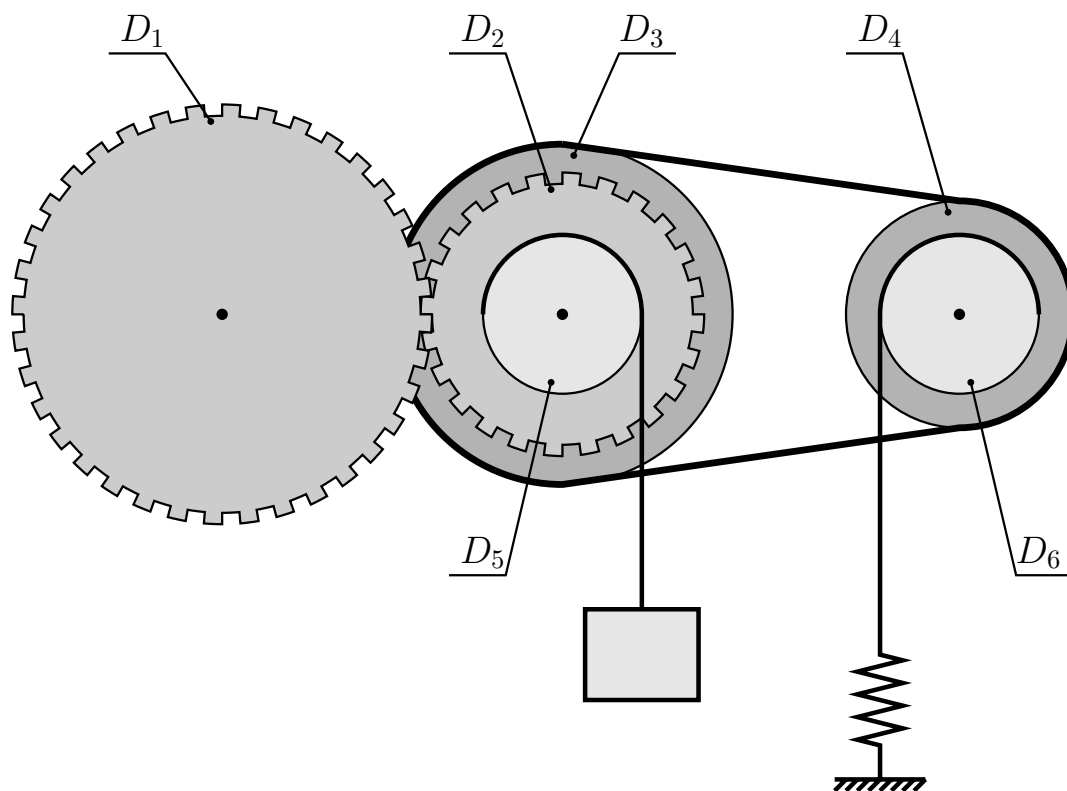
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 431x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №3



Диаметры дисков: $D_1 = 194\text{мм}$, $D_2 = 164\text{мм}$, $D_3 = 184\text{мм}$, $D_4 = 138\text{мм}$, $D_5 = 146\text{мм}$, $D_6 = 124\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 6\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 17\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 10\text{мм}$.

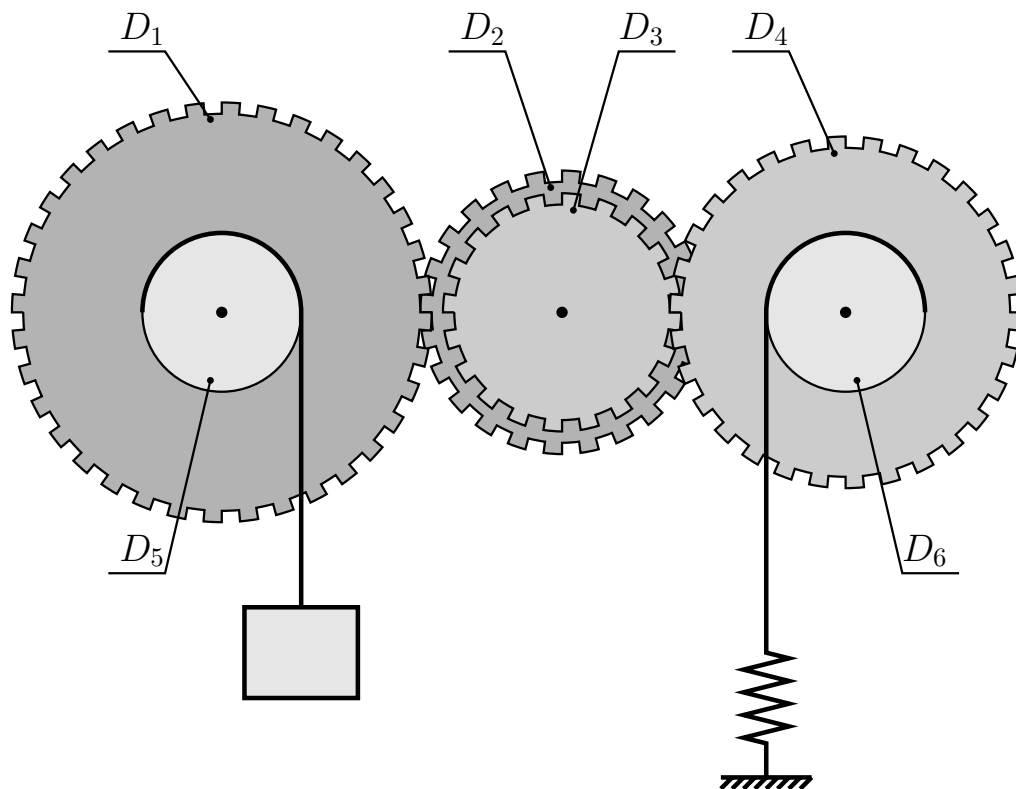
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 626x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1\text{ нс/м}$.

Вариант №4



Диаметры дисков: $D_1 = 190\text{мм}$, $D_2 = 126\text{мм}$, $D_3 = 108\text{мм}$, $D_4 = 146\text{мм}$, $D_5 = 102\text{мм}$, $D_6 = 184\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 17\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 5\text{мм}$, $H_4 = 20\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

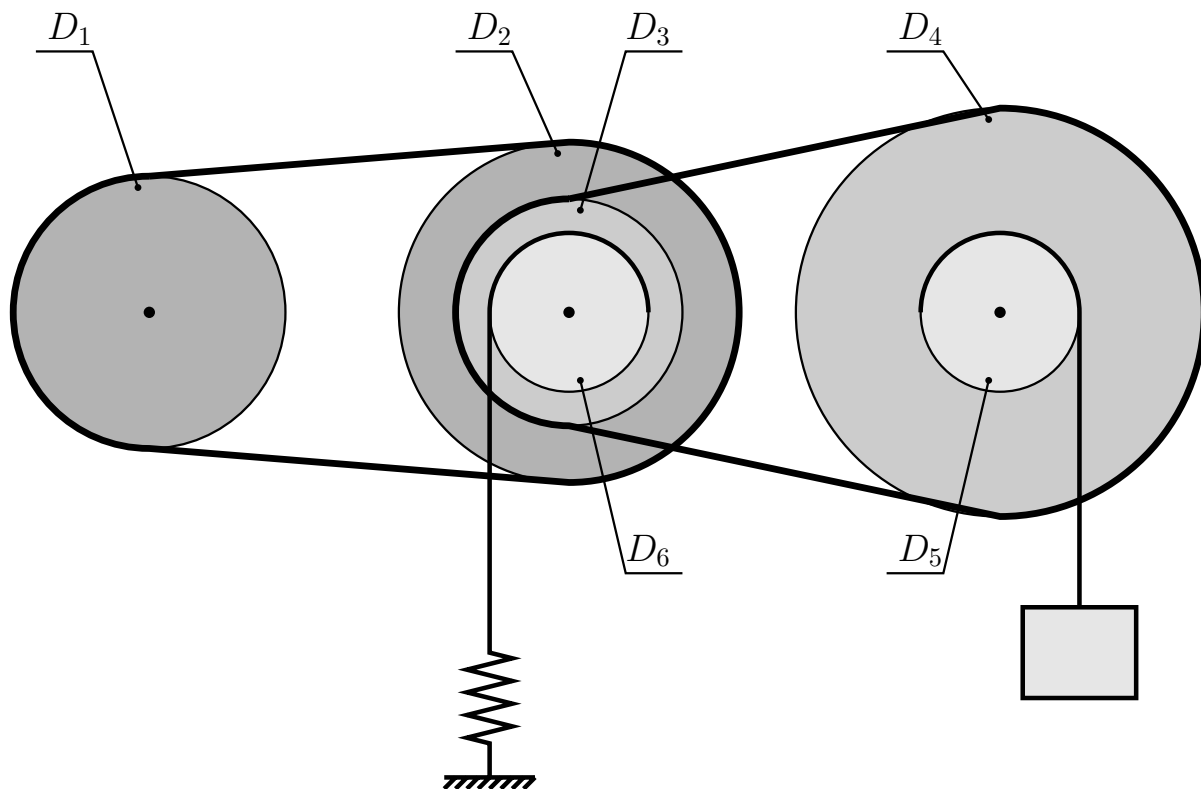
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 346x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.8\text{нс/м}$.

Вариант №5



Диаметры дисков: $D_1 = 118\text{мм}$, $D_2 = 120\text{мм}$, $D_3 = 108\text{мм}$, $D_4 = 198\text{мм}$, $D_5 = 110\text{мм}$, $D_6 = 198\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 14\text{мм}$, $H_4 = 5\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

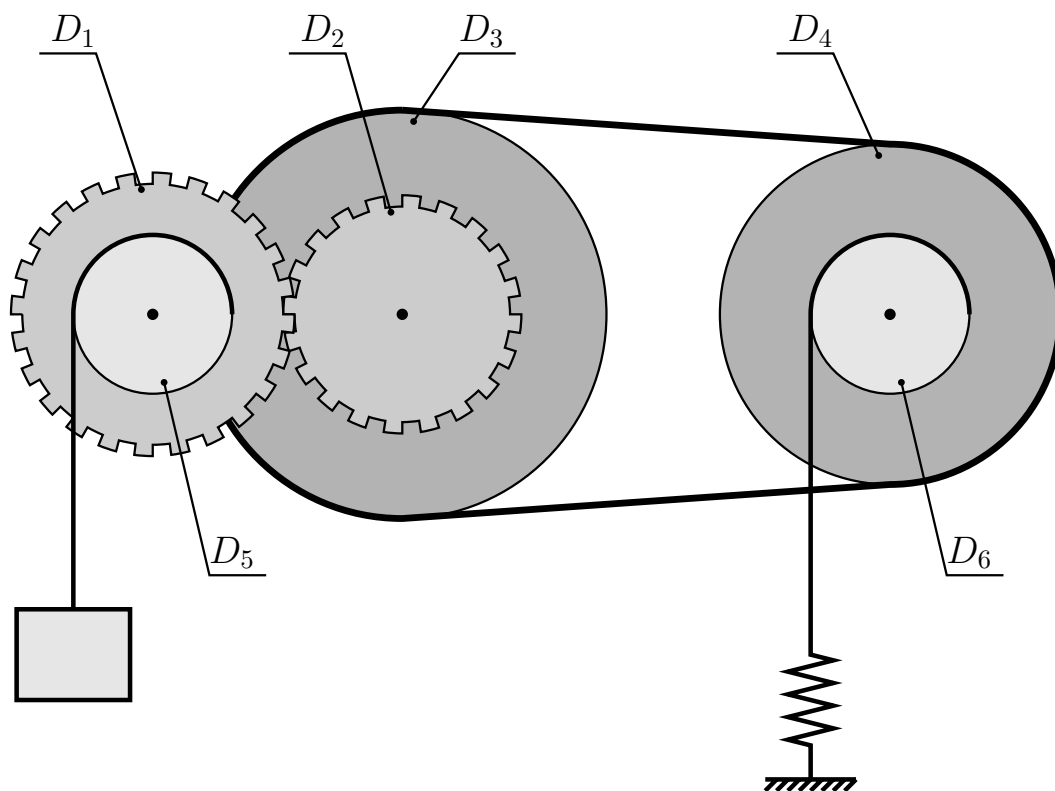
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 483x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.6\text{ нс/м}$.

Вариант №6



Диаметры дисков: $D_1 = 128\text{мм}$, $D_2 = 116\text{мм}$, $D_3 = 180\text{мм}$, $D_4 = 134\text{мм}$, $D_5 = 164\text{мм}$, $D_6 = 120\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 7\text{мм}$, $H_2 = 5\text{мм}$, $H_3 = 8\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

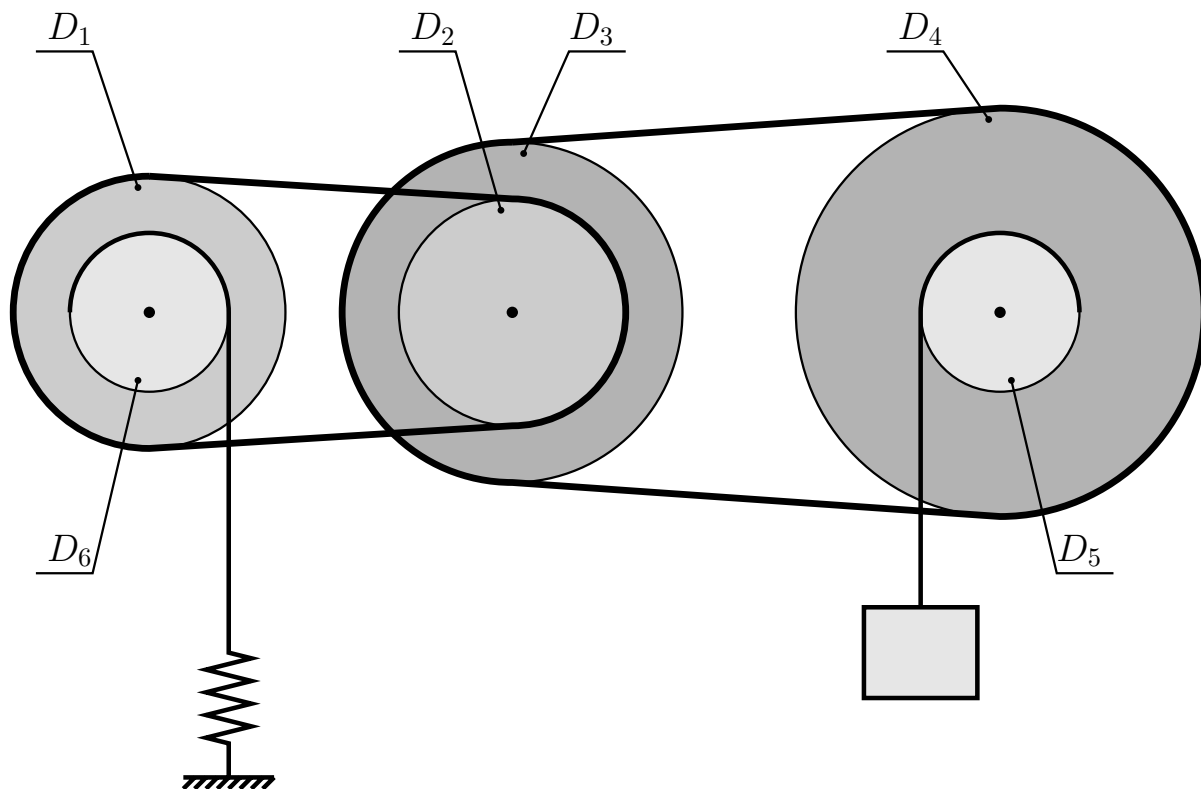
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 325x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.4\text{ нс/м}$.

Вариант №7



Диаметры дисков: $D_1 = 168\text{мм}$, $D_2 = 130\text{мм}$, $D_3 = 170\text{мм}$, $D_4 = 188\text{мм}$, $D_5 = 188\text{мм}$, $D_6 = 150\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 11\text{мм}$, $H_3 = 17\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 10\text{мм}$, $H_6 = 16\text{мм}$.

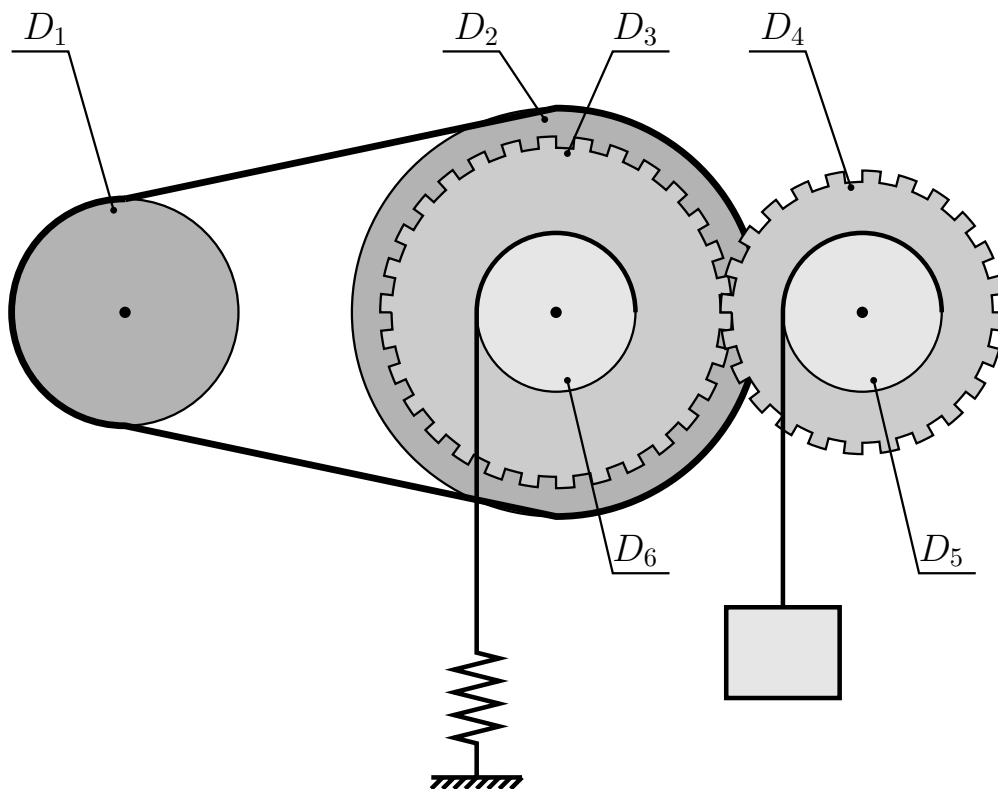
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 281x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.6\text{ нс/м}$.

Вариант №8



Диаметры дисков: $D_1 = 142\text{мм}$, $D_2 = 200\text{мм}$, $D_3 = 176\text{мм}$, $D_4 = 166\text{мм}$, $D_5 = 166\text{мм}$, $D_6 = 186\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 8\text{мм}$, $H_4 = 17\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 6\text{мм}$.

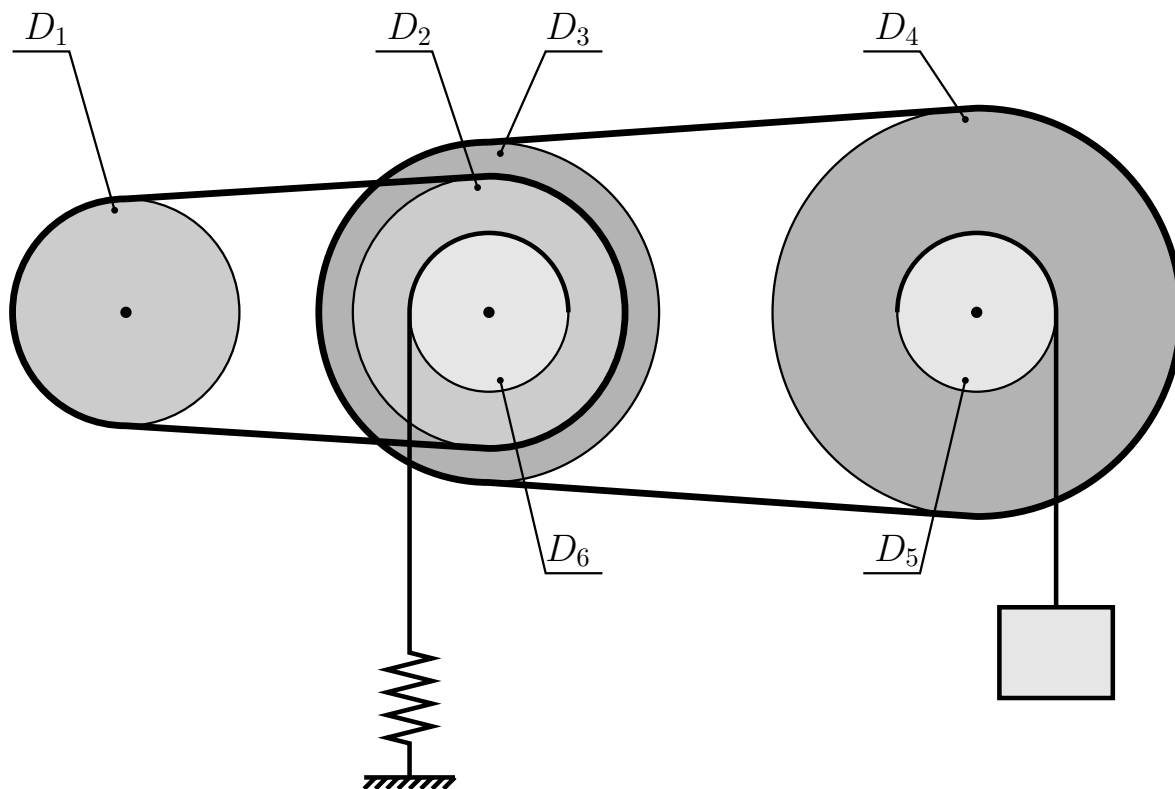
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 648x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1\text{ нс/м}$.

Вариант №9



Диаметры дисков: $D_1 = 116\text{мм}$, $D_2 = 144\text{мм}$, $D_3 = 152\text{мм}$, $D_4 = 184\text{мм}$, $D_5 = 180\text{мм}$, $D_6 = 140\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 13\text{мм}$, $H_2 = 6\text{мм}$, $H_3 = 10\text{мм}$, $H_4 = 17\text{мм}$, $H_5 = 6\text{мм}$, $H_6 = 6\text{мм}$.

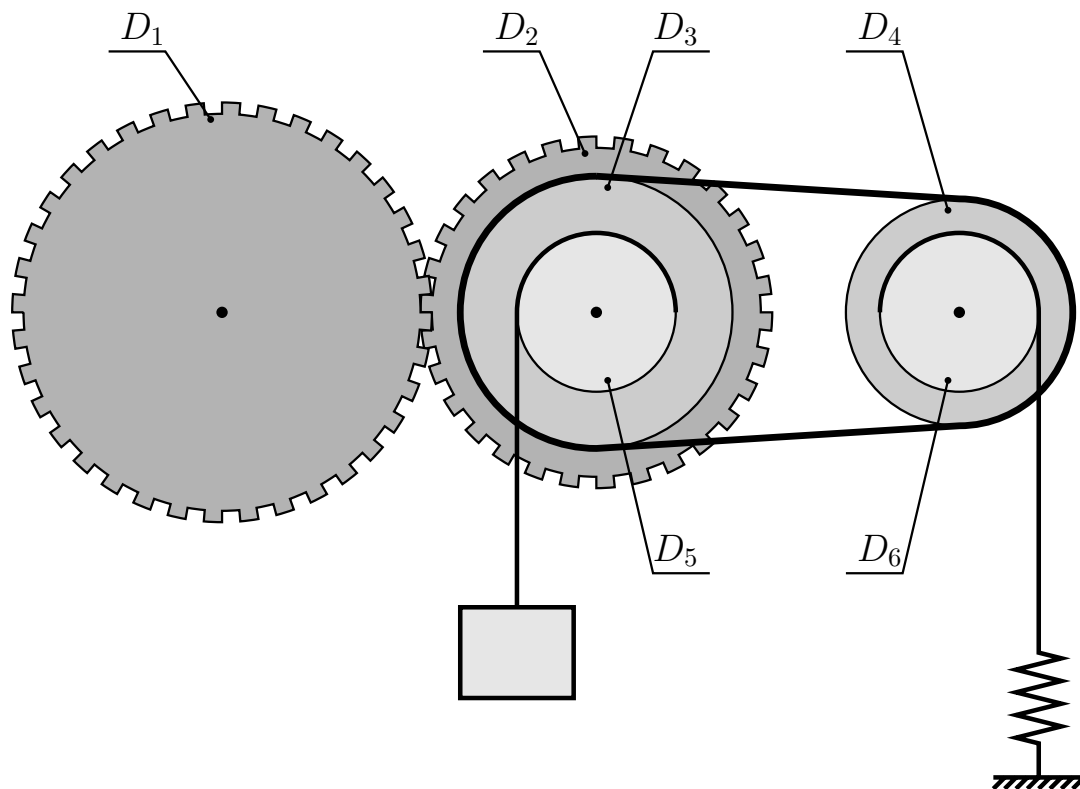
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 612x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.6\text{ нс/м}$.

Вариант №10



Диаметры дисков: $D_1 = 192\text{мм}$, $D_2 = 176\text{мм}$, $D_3 = 120\text{мм}$, $D_4 = 118\text{мм}$, $D_5 = 164\text{мм}$, $D_6 = 192\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 17\text{мм}$, $H_2 = 16\text{мм}$, $H_3 = 8\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 9\text{мм}$.

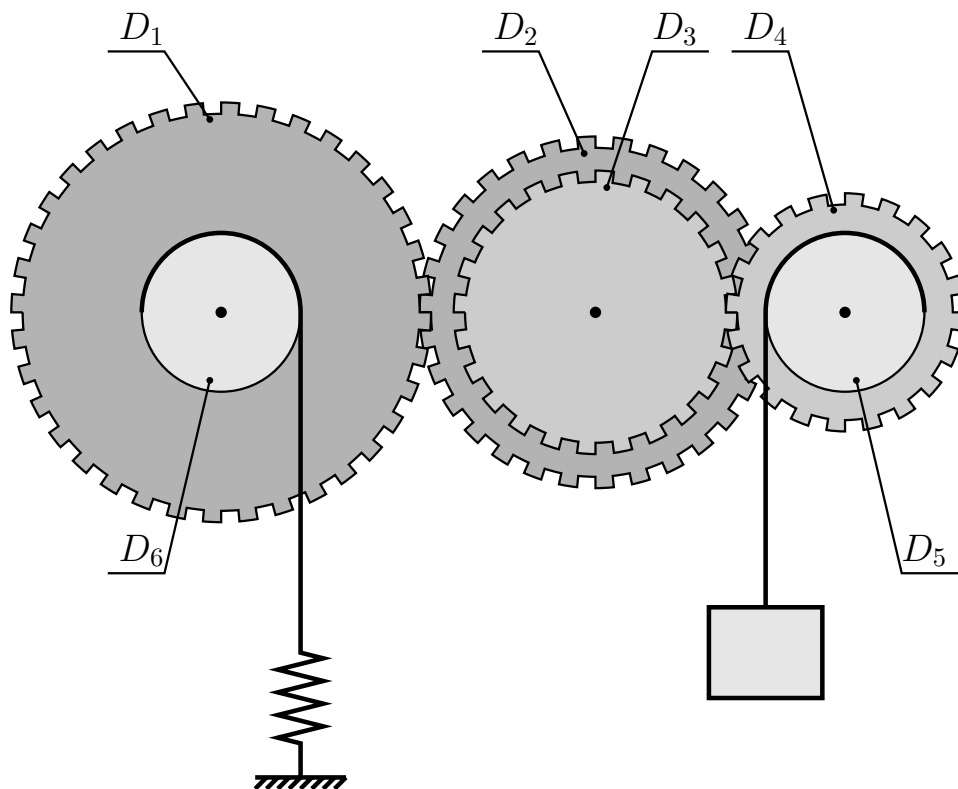
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 564x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1\text{ нс/м}$.

Вариант №11



Диаметры дисков: $D_1 = 196\text{мм}$, $D_2 = 170\text{мм}$, $D_3 = 148\text{мм}$, $D_4 = 136\text{мм}$, $D_5 = 182\text{мм}$, $D_6 = 152\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 6\text{мм}$, $H_3 = 15\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

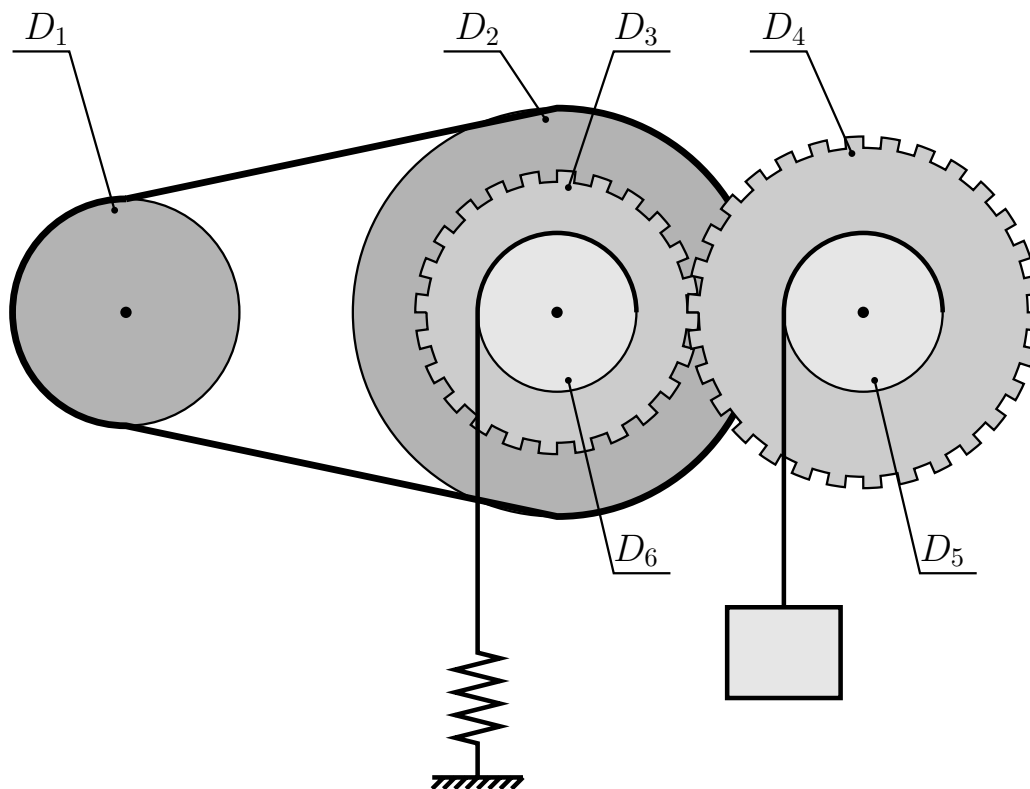
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 900x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3\text{ нс/м}$.

Вариант №12



Диаметры дисков: $D_1 = 102\text{мм}$, $D_2 = 156\text{мм}$, $D_3 = 130\text{мм}$, $D_4 = 140\text{мм}$, $D_5 = 200\text{мм}$, $D_6 = 170\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 15\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 12\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 15\text{мм}$.

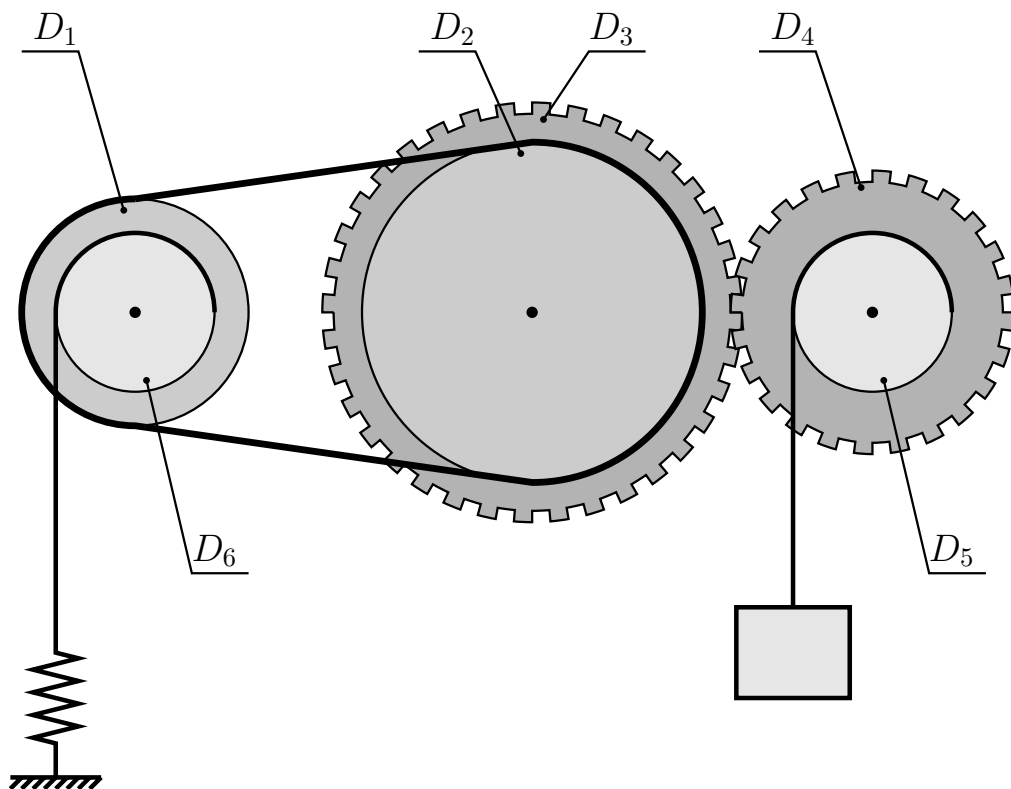
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 893x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.2\text{ нс/м}$.

Вариант №13



Диаметры дисков: $D_1 = 120\text{мм}$, $D_2 = 154\text{мм}$, $D_3 = 166\text{мм}$, $D_4 = 152\text{мм}$, $D_5 = 162\text{мм}$, $D_6 = 134\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 9\text{мм}$, $H_4 = 16\text{мм}$, $H_5 = 16\text{мм}$, $H_6 = 8\text{мм}$.

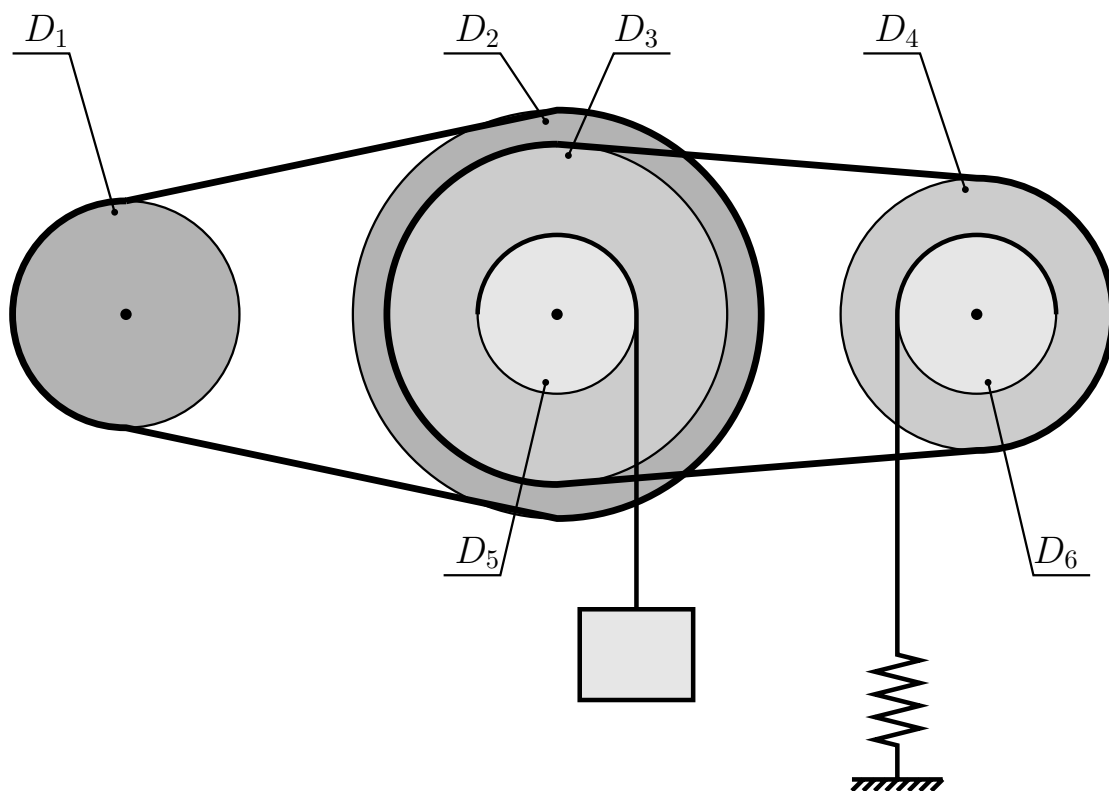
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 539x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.4\text{нс/м}$.

Вариант №14



Диаметры дисков: $D_1 = 104\text{мм}$, $D_2 = 194\text{мм}$, $D_3 = 188\text{мм}$, $D_4 = 126\text{мм}$, $D_5 = 144\text{мм}$, $D_6 = 166\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 14\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 14\text{мм}$, $H_6 = 6\text{мм}$.

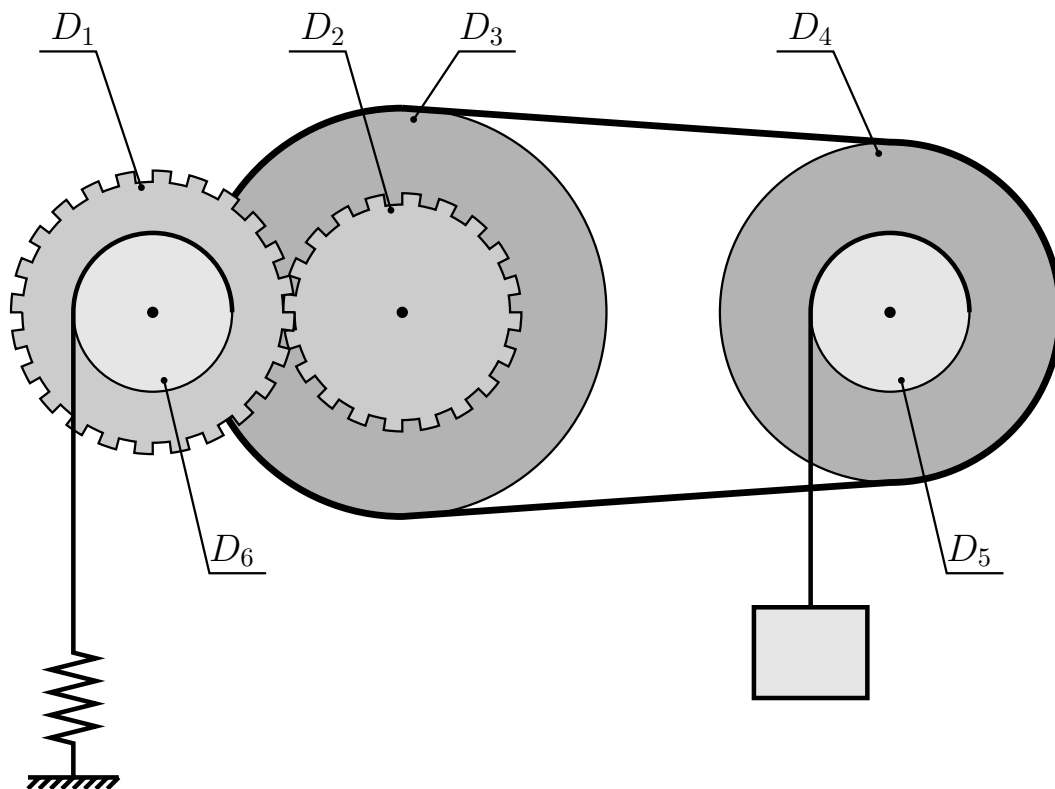
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 200x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.6\text{ нс/м}$.

Вариант №15



Диаметры дисков: $D_1 = 108\text{мм}$, $D_2 = 100\text{мм}$, $D_3 = 196\text{мм}$, $D_4 = 120\text{мм}$, $D_5 = 122\text{мм}$, $D_6 = 120\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 10\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 7\text{мм}$.

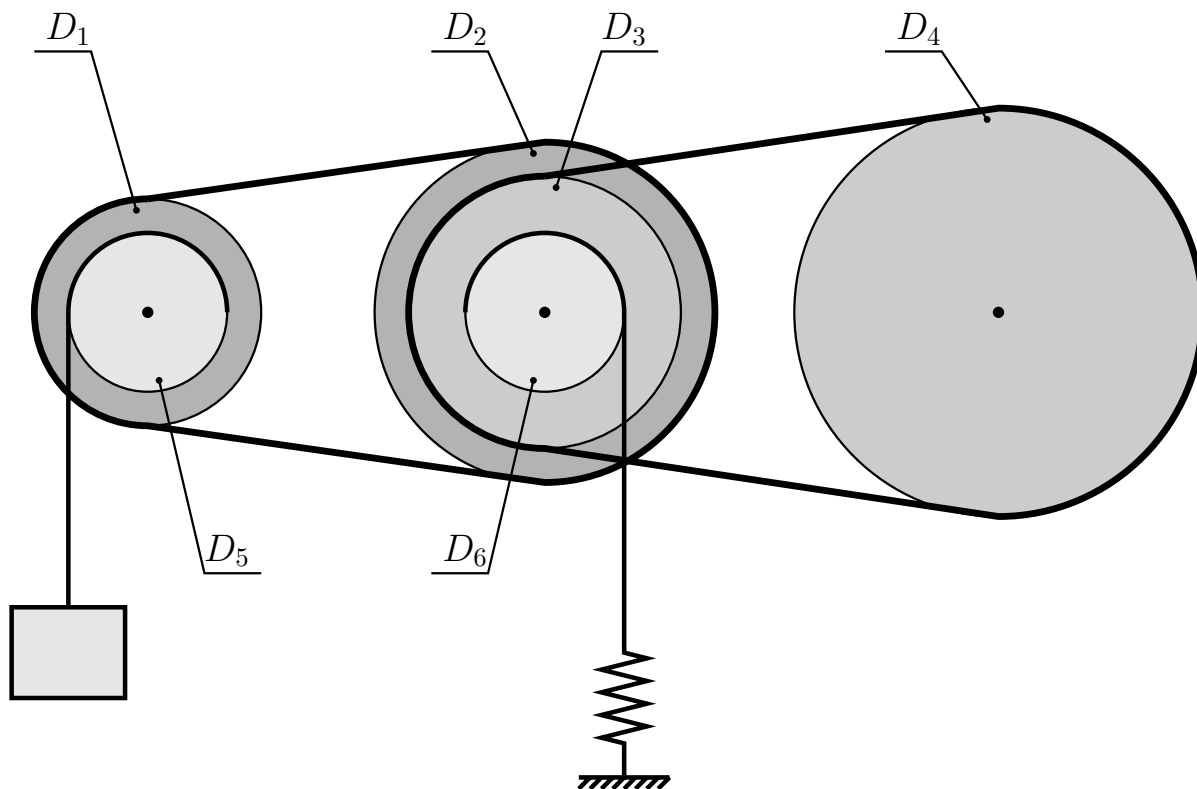
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 829x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2$ нс/м.

Вариант №16



Диаметры дисков: $D_1 = 138\text{мм}$, $D_2 = 188\text{мм}$, $D_3 = 166\text{мм}$, $D_4 = 194\text{мм}$, $D_5 = 134\text{мм}$, $D_6 = 134\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 20\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

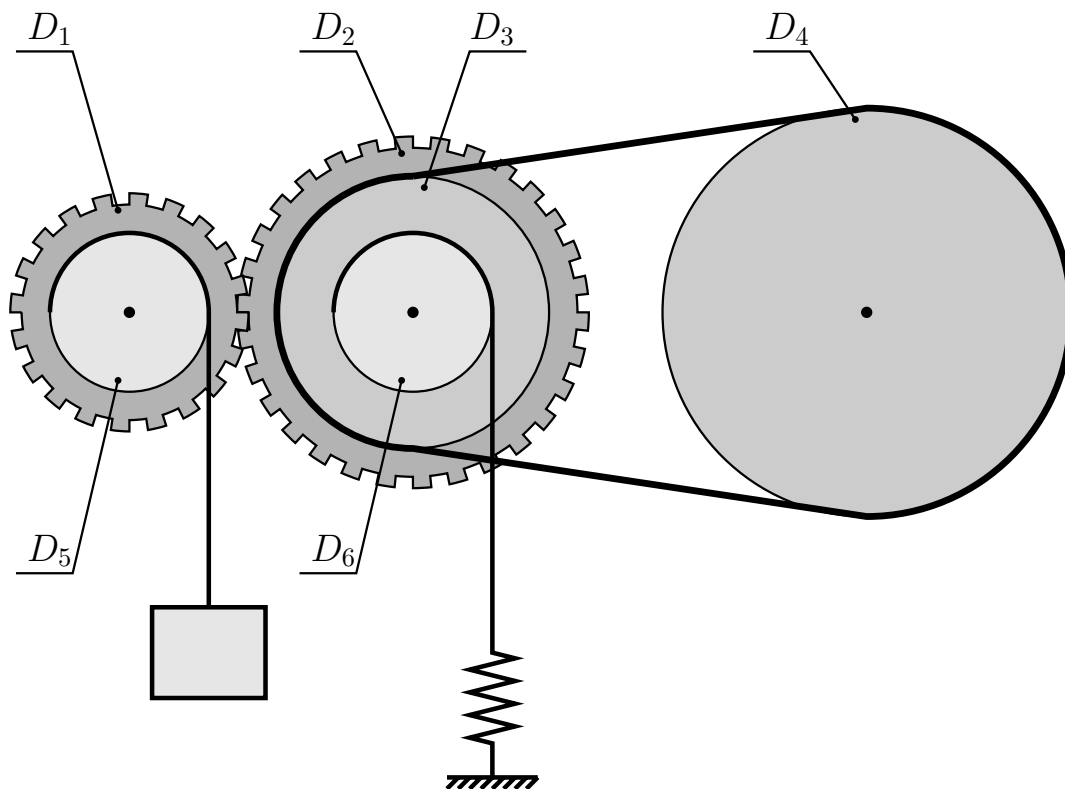
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 453x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.2\text{ нс/м}$.

Вариант №17



Диаметры дисков: $D_1 = 112\text{мм}$, $D_2 = 182\text{мм}$, $D_3 = 144\text{мм}$, $D_4 = 194\text{мм}$, $D_5 = 150\text{мм}$, $D_6 = 168\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 17\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 10\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 6\text{мм}$, $H_6 = 14\text{мм}$.

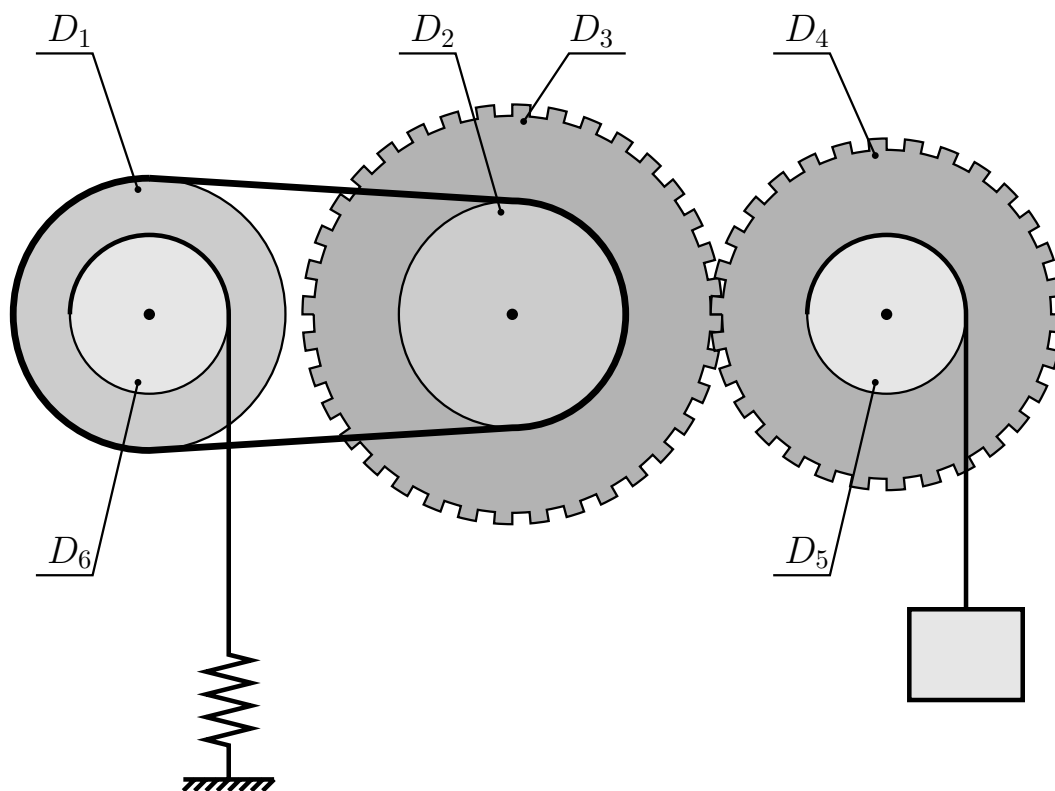
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 221x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1\text{ нс/м}$.

Вариант №18



Диаметры дисков: $D_1 = 132\text{мм}$, $D_2 = 108\text{мм}$, $D_3 = 178\text{мм}$, $D_4 = 166\text{мм}$, $D_5 = 118\text{мм}$, $D_6 = 186\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 11\text{мм}$, $H_3 = 20\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 14\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

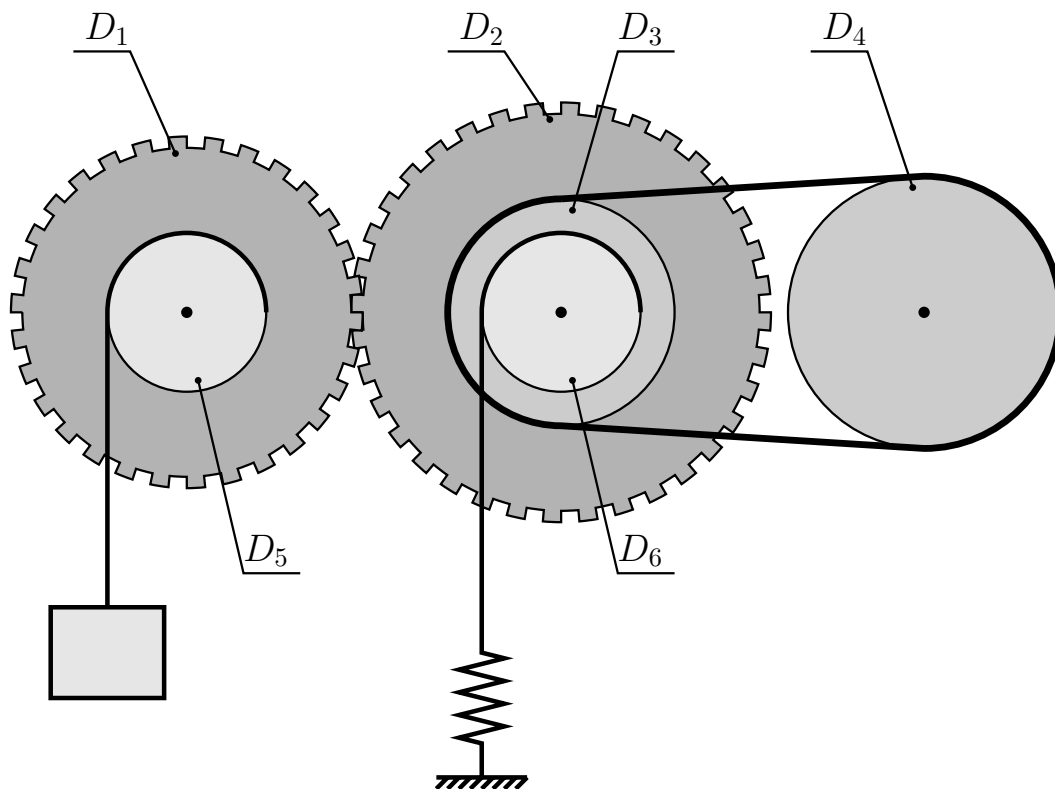
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 919x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6\text{ нс/м}$.

Вариант №19



Диаметры дисков: $D_1 = 160\text{мм}$, $D_2 = 184\text{мм}$, $D_3 = 110\text{мм}$, $D_4 = 112\text{мм}$, $D_5 = 174\text{мм}$, $D_6 = 196\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 6\text{мм}$, $H_2 = 17\text{мм}$, $H_3 = 8\text{мм}$, $H_4 = 10\text{мм}$, $H_5 = 14\text{мм}$, $H_6 = 15\text{мм}$.

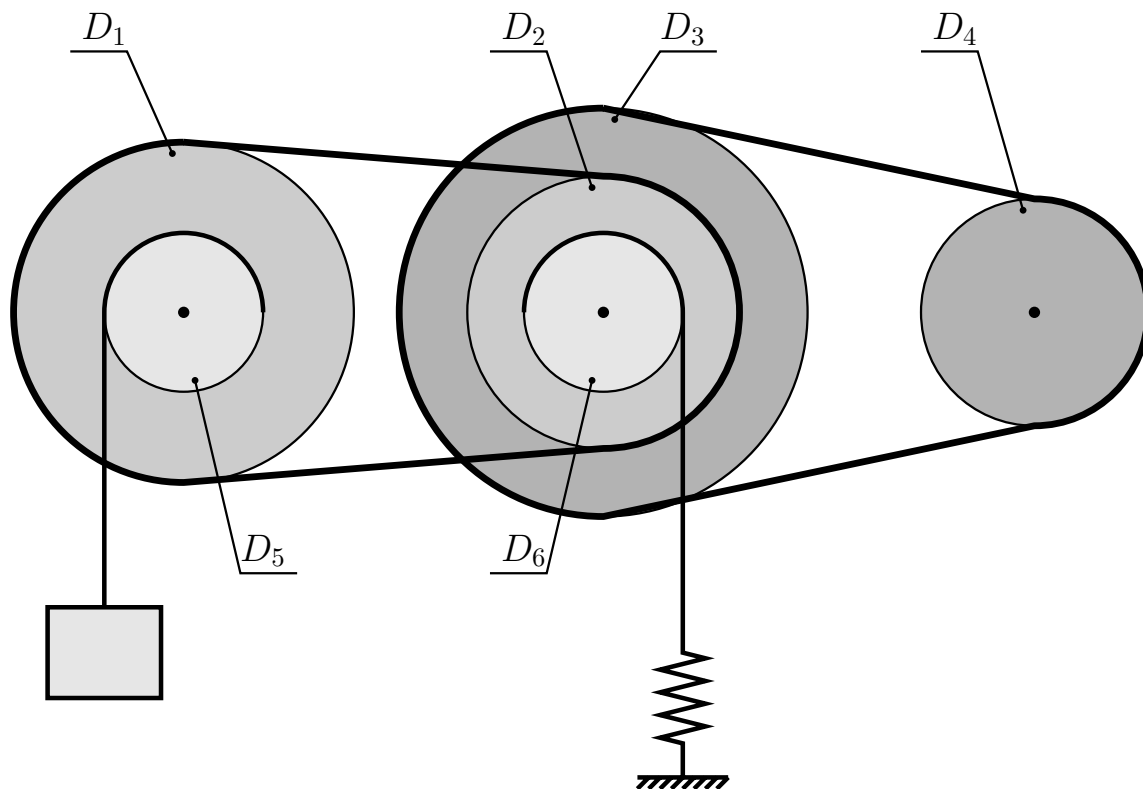
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 662x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №20



Диаметры дисков: $D_1 = 162\text{мм}$, $D_2 = 158\text{мм}$, $D_3 = 184\text{мм}$, $D_4 = 150\text{мм}$, $D_5 = 148\text{мм}$, $D_6 = 164\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 17\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 12\text{мм}$.

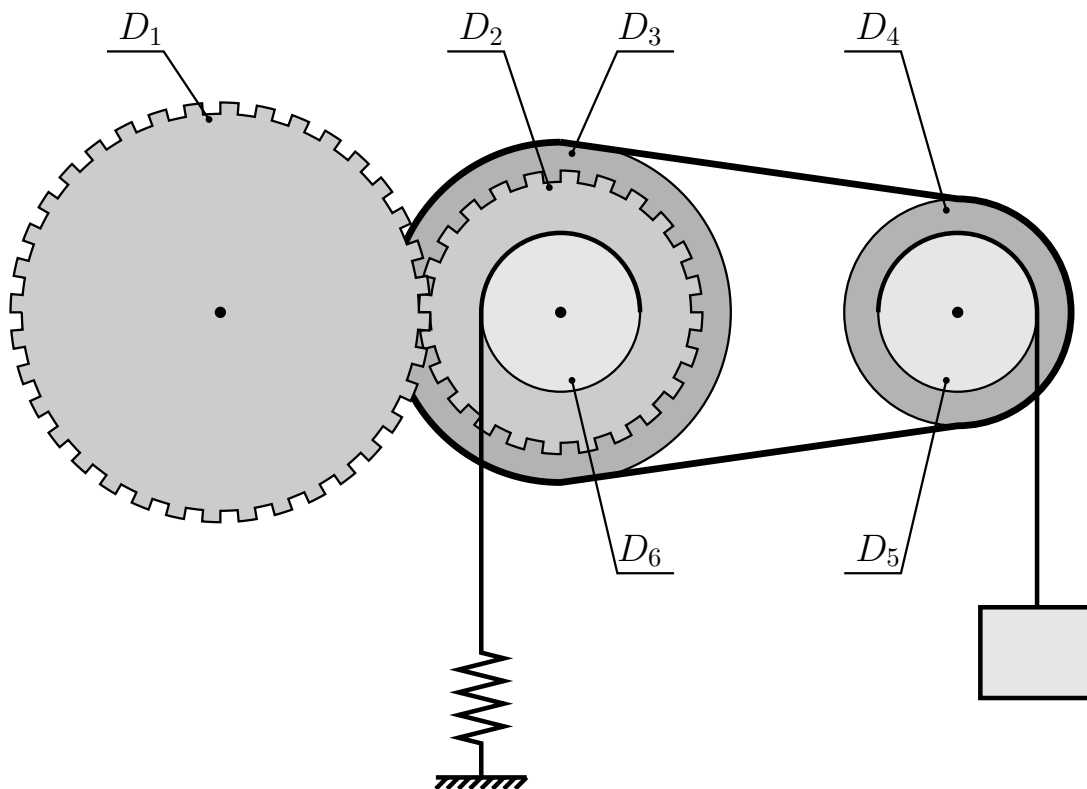
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 428x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.6\text{ нс/м}$.

Вариант №21



Диаметры дисков: $D_1 = 144\text{мм}$, $D_2 = 108\text{мм}$, $D_3 = 118\text{мм}$, $D_4 = 100\text{мм}$, $D_5 = 152\text{мм}$, $D_6 = 190\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 16\text{мм}$, $H_2 = 17\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

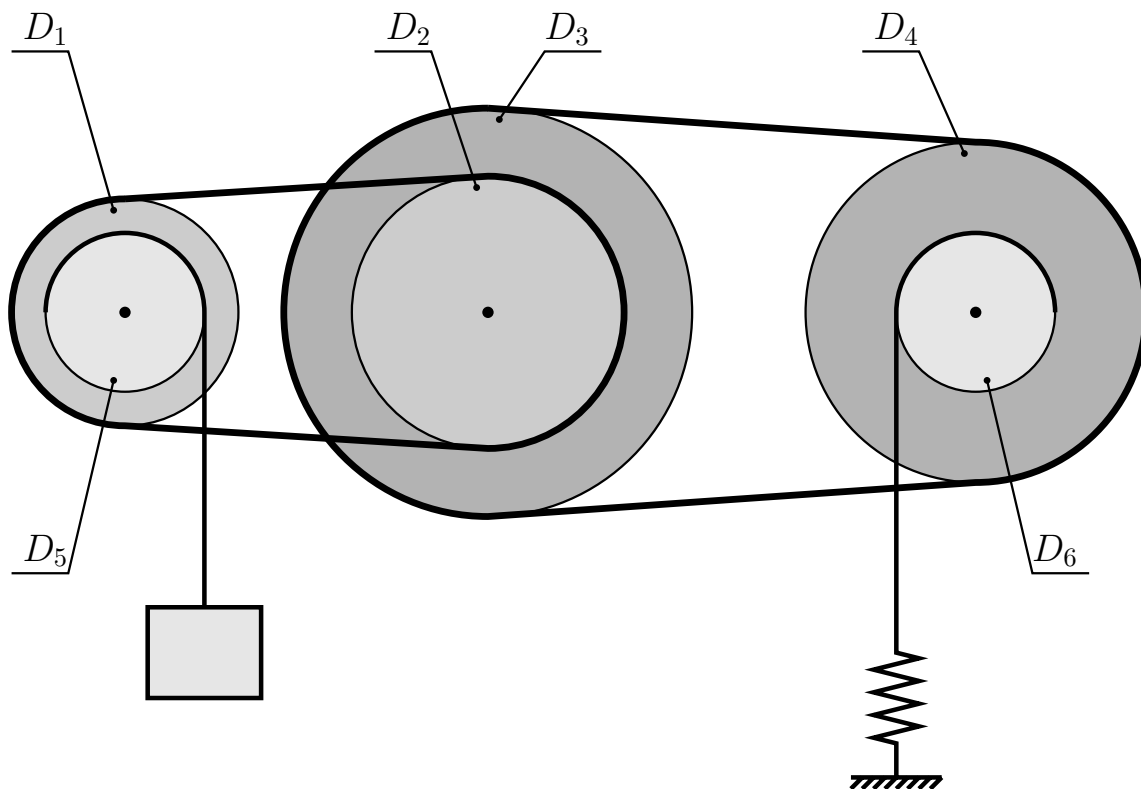
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 176x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.4\text{ нс/м}$.

Вариант №22



Диаметры дисков: $D_1 = 114\text{мм}$, $D_2 = 158\text{мм}$, $D_3 = 178\text{мм}$, $D_4 = 160\text{мм}$, $D_5 = 130\text{мм}$, $D_6 = 176\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 12\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 6\text{мм}$.

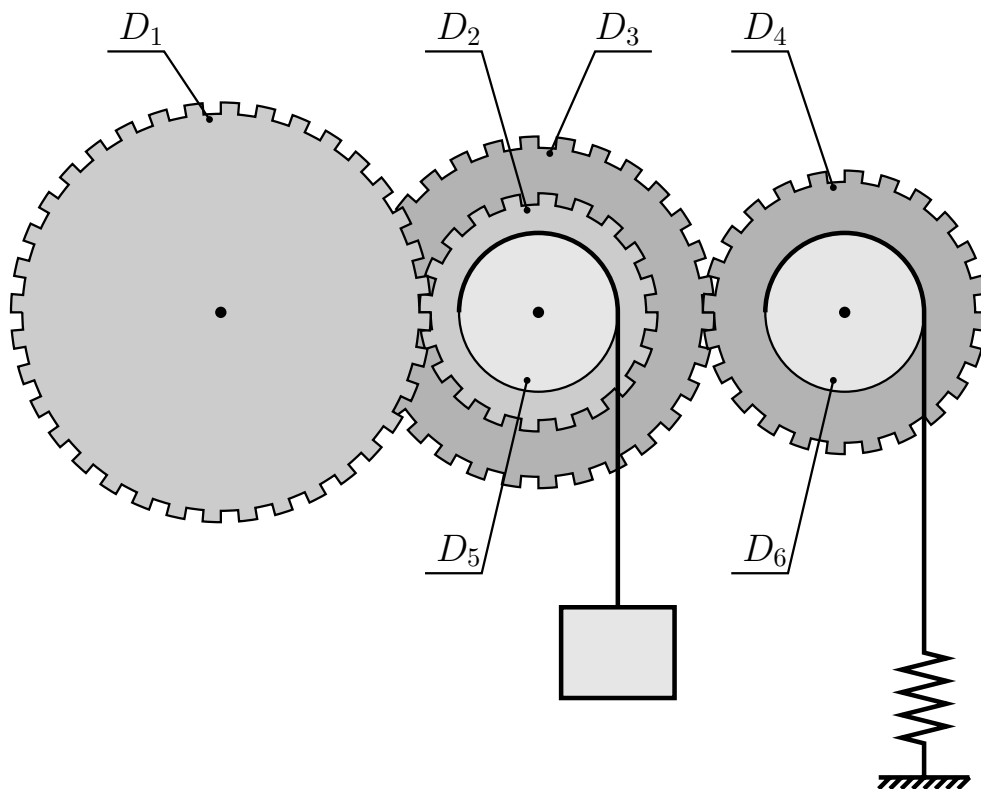
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 607x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №23



Диаметры дисков: $D_1 = 188\text{мм}$, $D_2 = 110\text{мм}$, $D_3 = 166\text{мм}$, $D_4 = 136\text{мм}$, $D_5 = 122\text{мм}$, $D_6 = 116\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 20\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 19\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 14\text{мм}$, $H_6 = 12\text{мм}$.

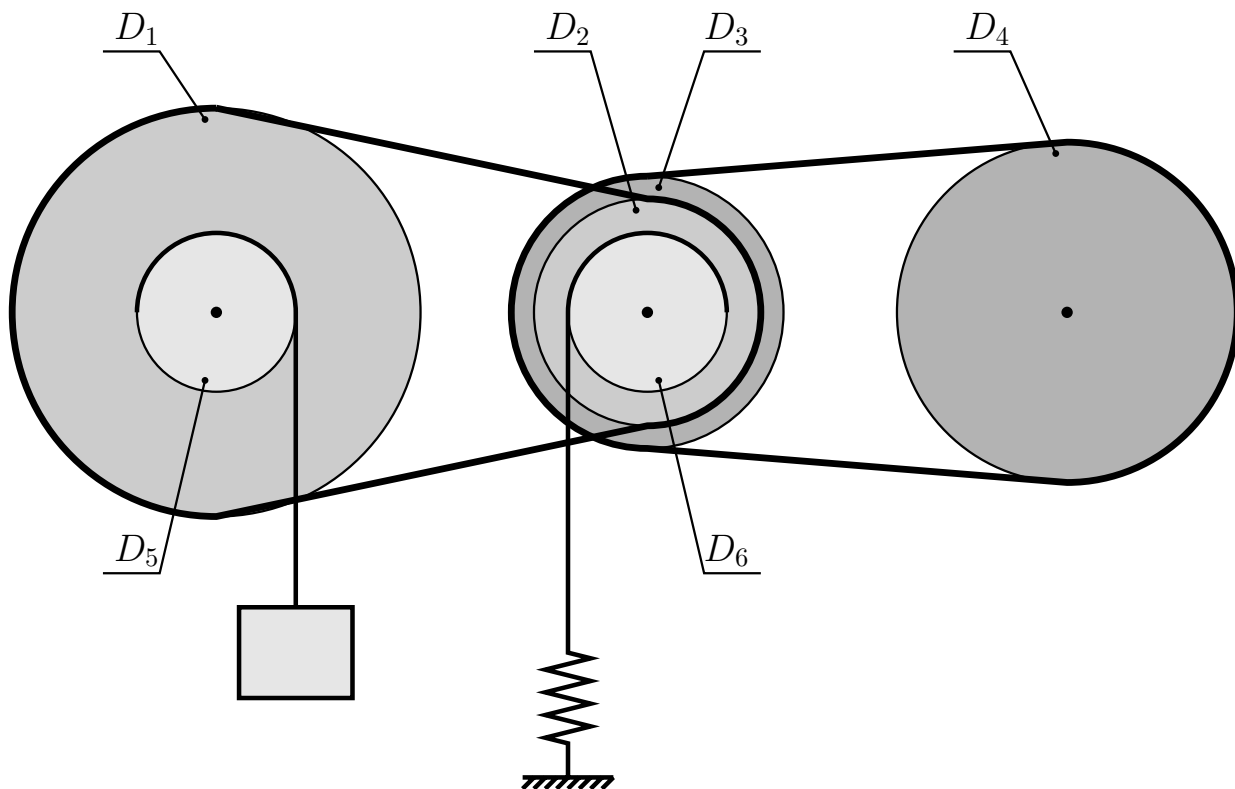
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 669x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.8\text{ нс/м}$.

Вариант №24



Диаметры дисков: $D_1 = 196\text{мм}$, $D_2 = 116\text{мм}$, $D_3 = 120\text{мм}$, $D_4 = 144\text{мм}$, $D_5 = 146\text{мм}$, $D_6 = 140\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 8\text{мм}$, $H_3 = 12\text{мм}$, $H_4 = 12\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

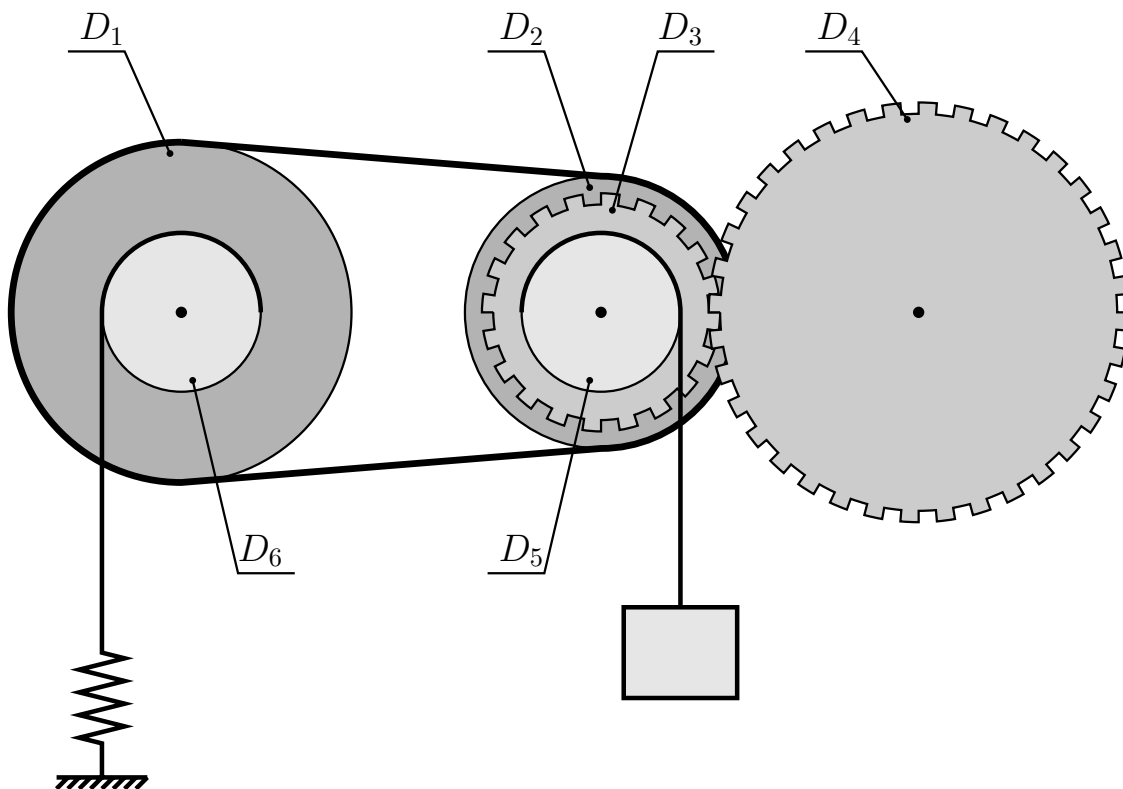
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 726x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6\text{ нс/м}$.

Вариант №25



Диаметры дисков: $D_1 = 190\text{мм}$, $D_2 = 166\text{мм}$, $D_3 = 160\text{мм}$, $D_4 = 192\text{мм}$, $D_5 = 178\text{мм}$, $D_6 = 156\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 15\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 20\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

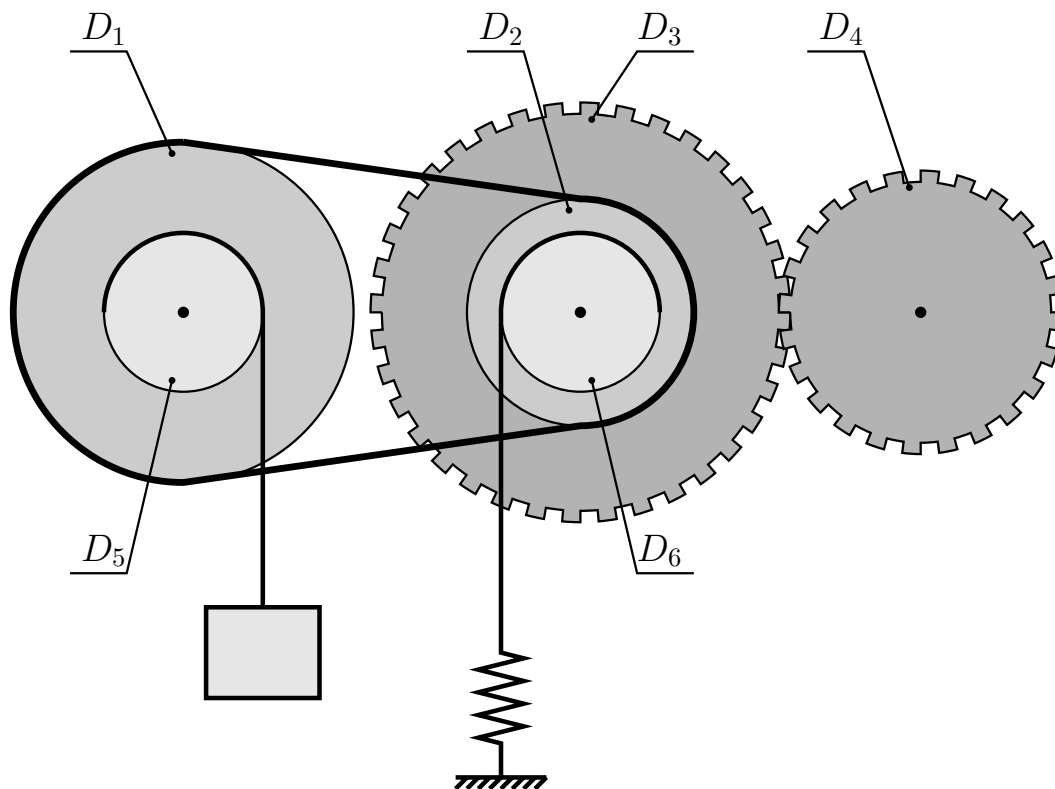
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 309x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2\text{нс/м}$.

Вариант №26



Диаметры дисков: $D_1 = 114\text{мм}$, $D_2 = 100\text{мм}$, $D_3 = 138\text{мм}$, $D_4 = 106\text{мм}$, $D_5 = 176\text{мм}$, $D_6 = 170\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 19\text{мм}$, $H_4 = 10\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 16\text{мм}$.

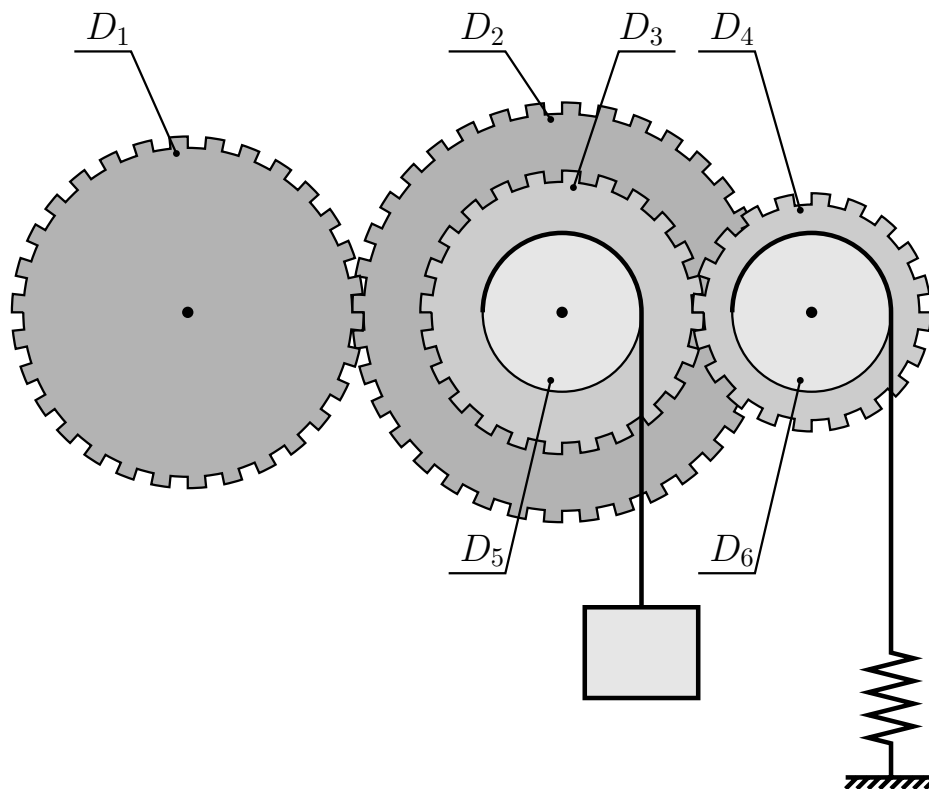
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 302x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.6\text{ нс/м}$.

Вариант №27



Диаметры дисков: $D_1 = 190\text{мм}$, $D_2 = 192\text{мм}$, $D_3 = 172\text{мм}$, $D_4 = 110\text{мм}$, $D_5 = 158\text{мм}$, $D_6 = 200\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 19\text{мм}$, $H_4 = 10\text{мм}$, $H_5 = 17\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

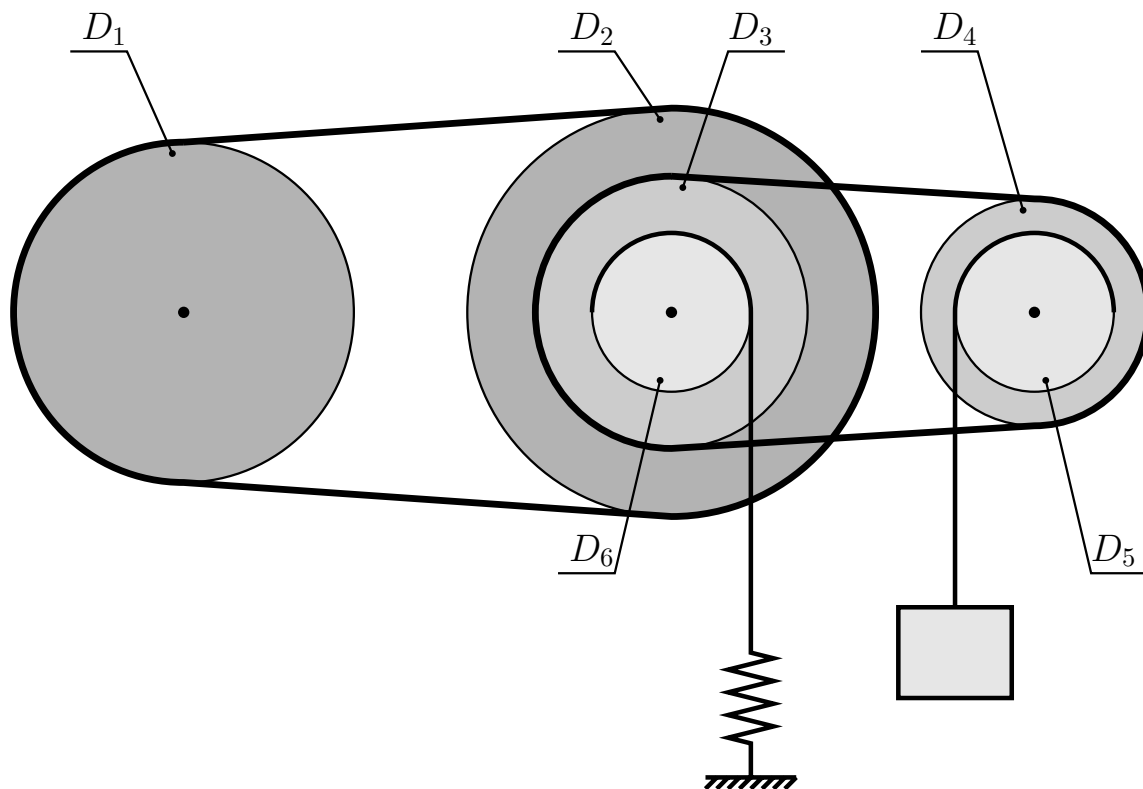
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 473x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №28



Диаметры дисков: $D_1 = 170\text{мм}$, $D_2 = 192\text{мм}$, $D_3 = 164\text{мм}$, $D_4 = 136\text{мм}$, $D_5 = 182\text{мм}$, $D_6 = 176\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 5\text{мм}$.

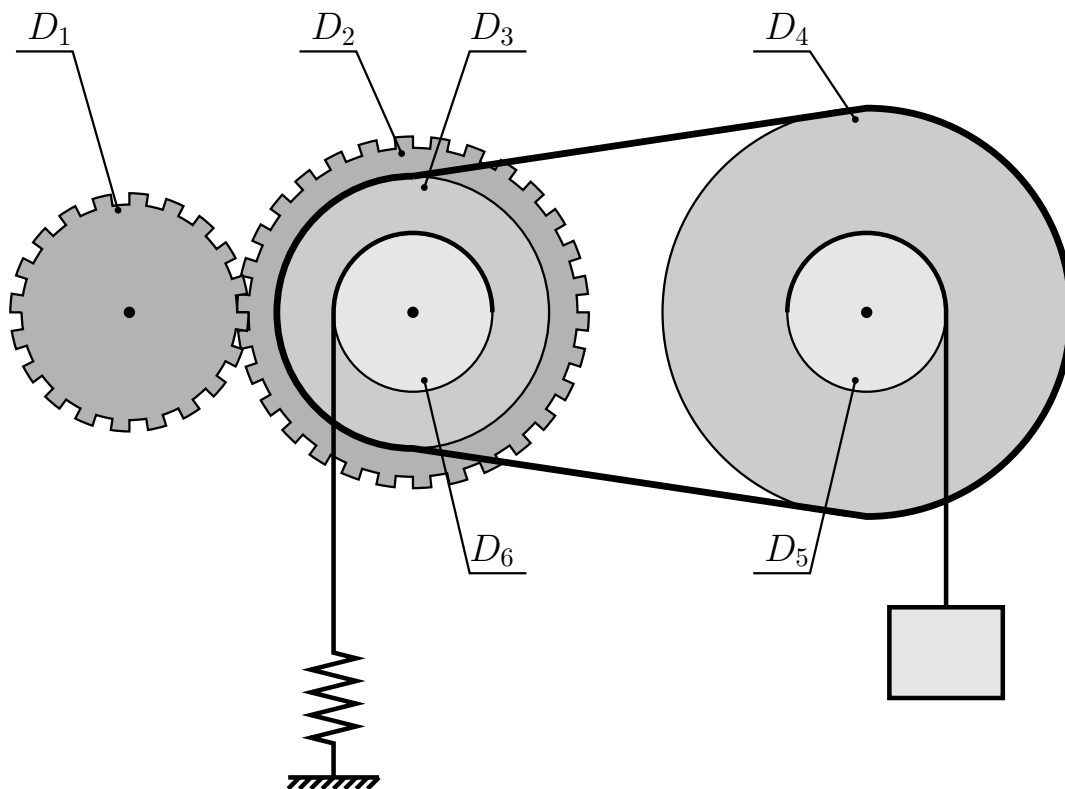
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 353x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.6\text{ нс/м}$.

Вариант №29



Диаметры дисков: $D_1 = 120\text{мм}$, $D_2 = 174\text{мм}$, $D_3 = 160\text{мм}$, $D_4 = 180\text{мм}$, $D_5 = 148\text{мм}$, $D_6 = 100\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 19\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

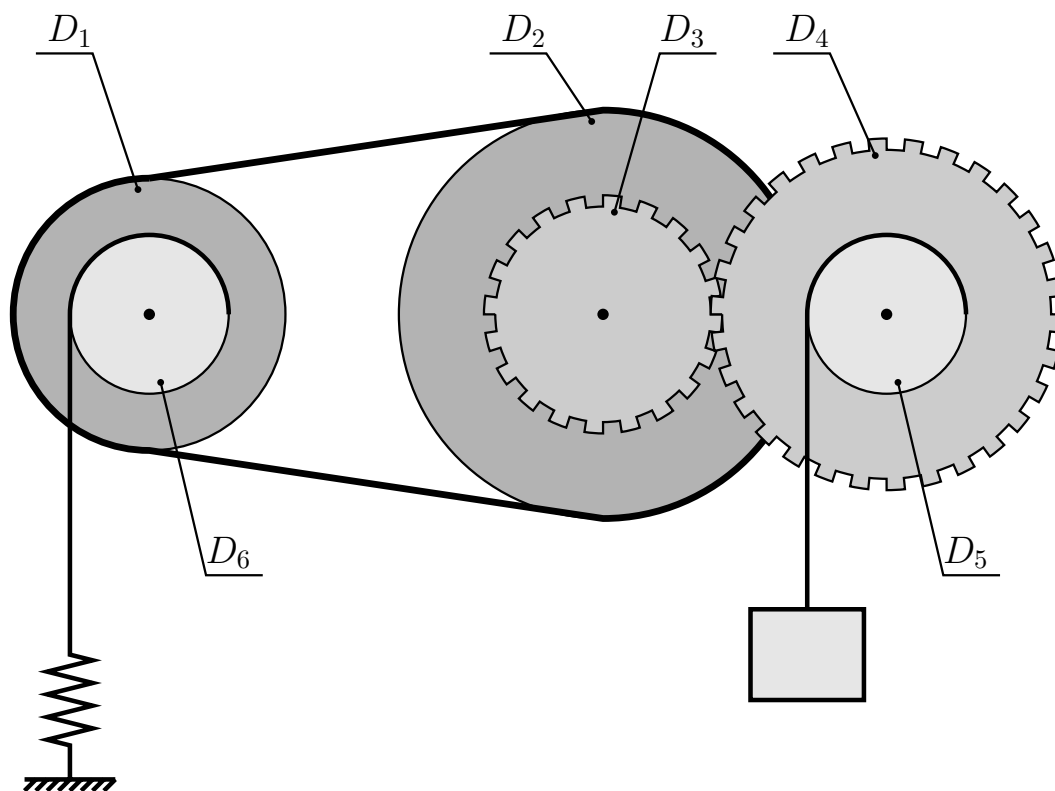
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 155x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.2 \text{ нс/м}$.

Вариант №30



Диаметры дисков: $D_1 = 102\text{мм}$, $D_2 = 152\text{мм}$, $D_3 = 100\text{мм}$, $D_4 = 124\text{мм}$, $D_5 = 188\text{мм}$, $D_6 = 128\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 13\text{мм}$, $H_2 = 14\text{мм}$, $H_3 = 18\text{мм}$, $H_4 = 16\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

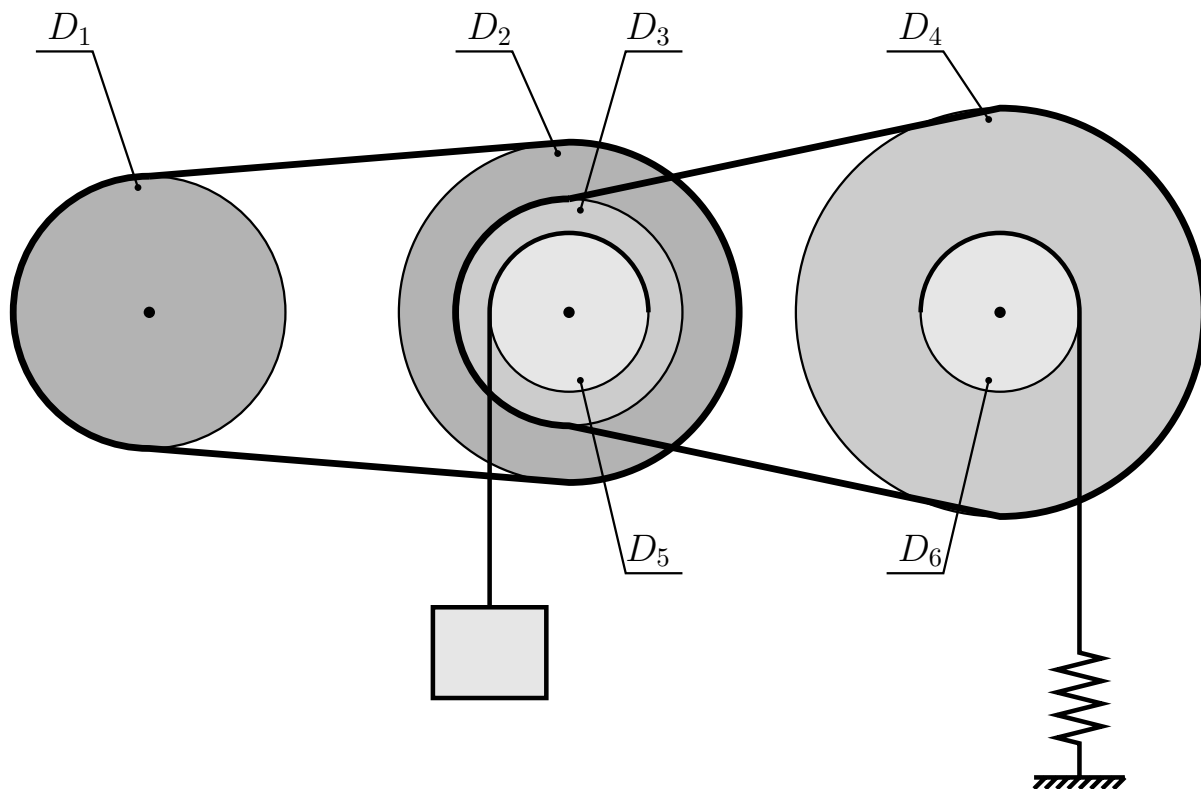
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 446x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.8\text{ нс/м}$.

Вариант №31



Диаметры дисков: $D_1 = 174\text{мм}$, $D_2 = 180\text{мм}$, $D_3 = 164\text{мм}$, $D_4 = 188\text{мм}$, $D_5 = 132\text{мм}$, $D_6 = 178\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 9\text{мм}$.

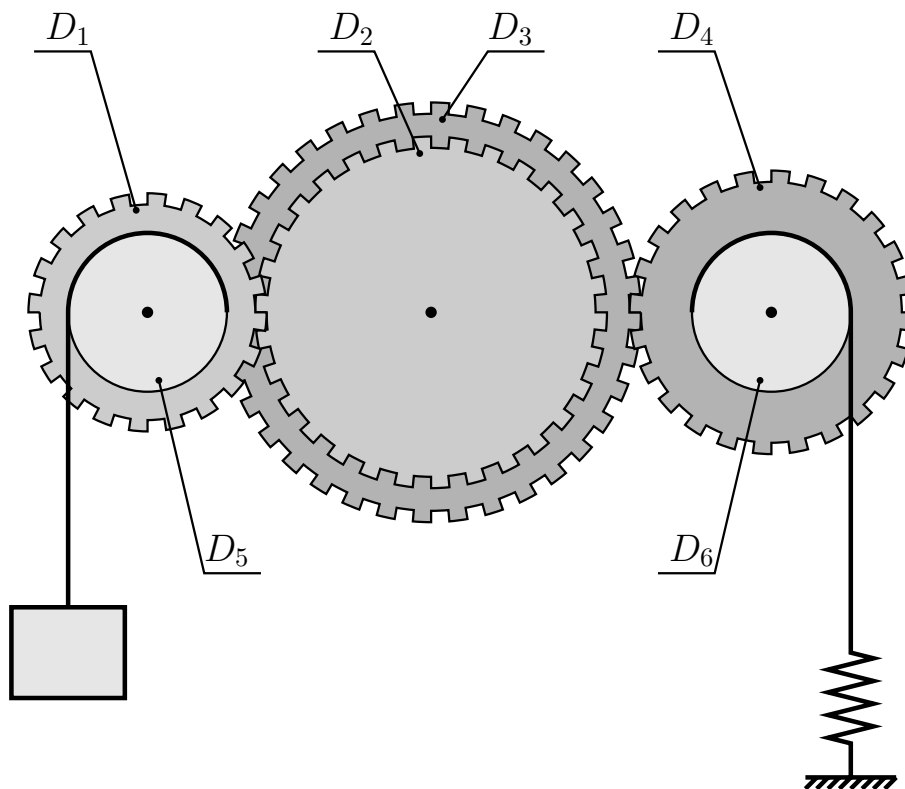
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 523x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.6\text{ нс/м}$.

Вариант №32



Диаметры дисков: $D_1 = 126\text{мм}$, $D_2 = 162\text{мм}$, $D_3 = 162\text{мм}$, $D_4 = 134\text{мм}$, $D_5 = 154\text{мм}$, $D_6 = 162\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 17\text{мм}$, $H_4 = 8\text{мм}$, $H_5 = 17\text{мм}$, $H_6 = 18\text{мм}$.

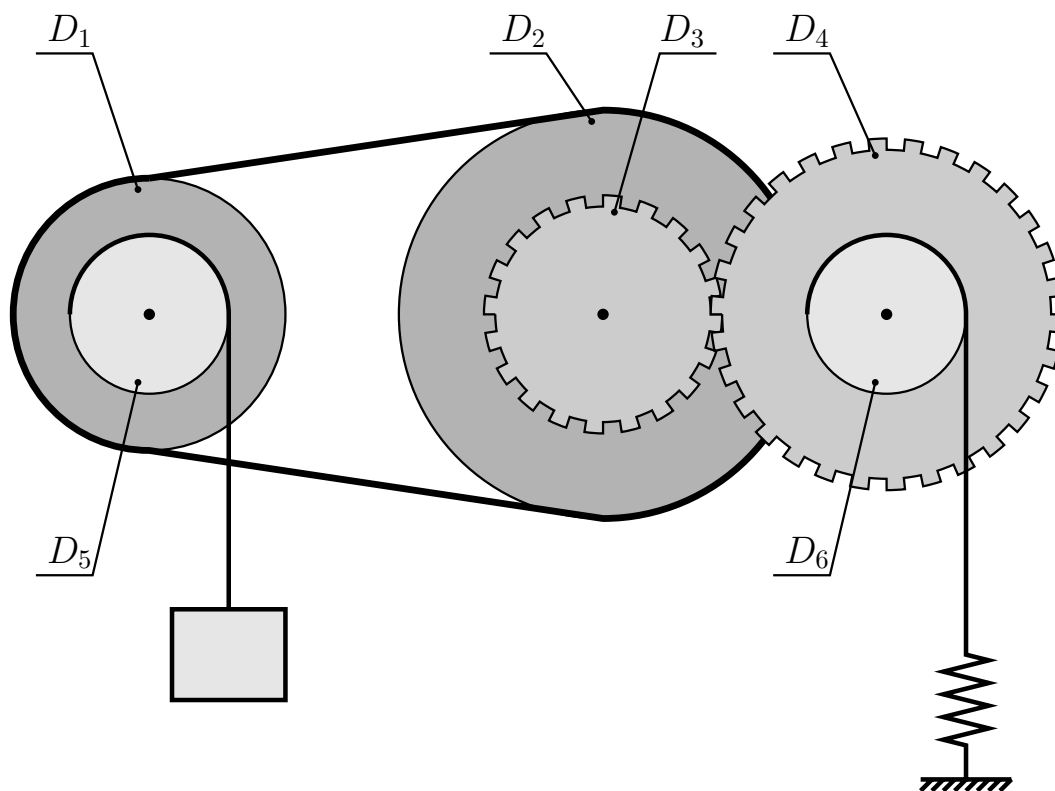
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 775x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.8\text{нс/м}$.

Вариант №33



Диаметры дисков: $D_1 = 122\text{мм}$, $D_2 = 146\text{мм}$, $D_3 = 112\text{мм}$, $D_4 = 130\text{мм}$, $D_5 = 174\text{мм}$, $D_6 = 130\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 10\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 10\text{мм}$, $H_5 = 19\text{мм}$, $H_6 = 18\text{мм}$.

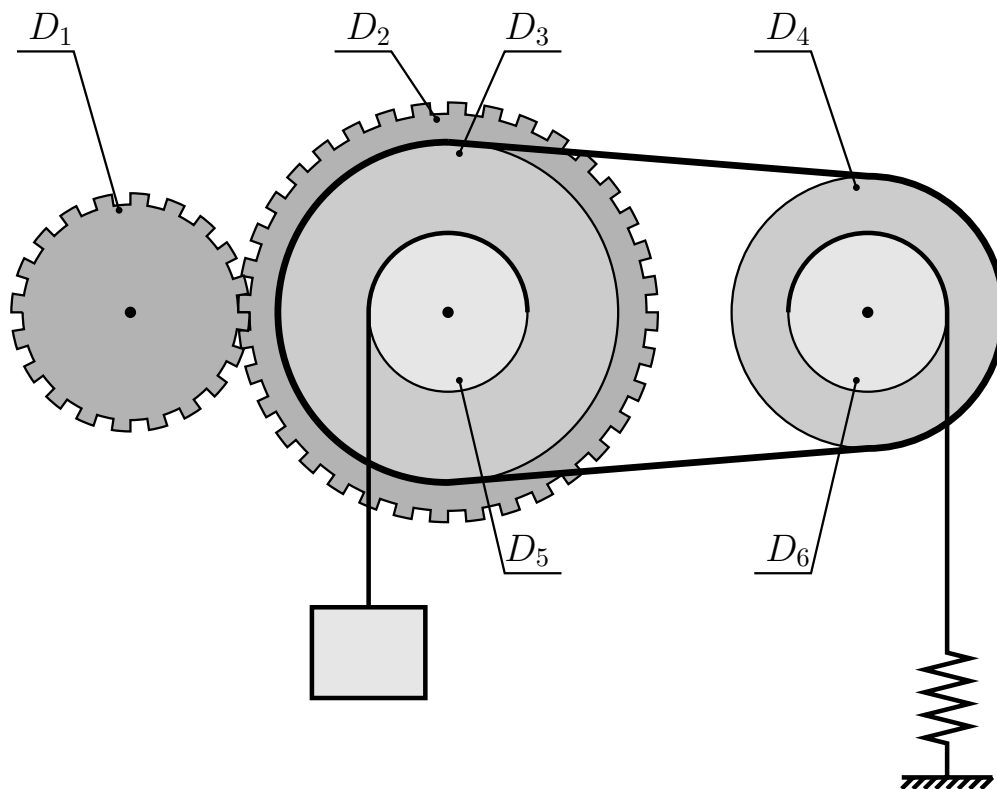
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 548x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.6\text{ нс/м}$.

Вариант №34



Диаметры дисков: $D_1 = 114\text{мм}$, $D_2 = 154\text{мм}$, $D_3 = 150\text{мм}$, $D_4 = 116\text{мм}$, $D_5 = 172\text{мм}$, $D_6 = 152\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 9\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 6\text{мм}$, $H_6 = 14\text{мм}$.

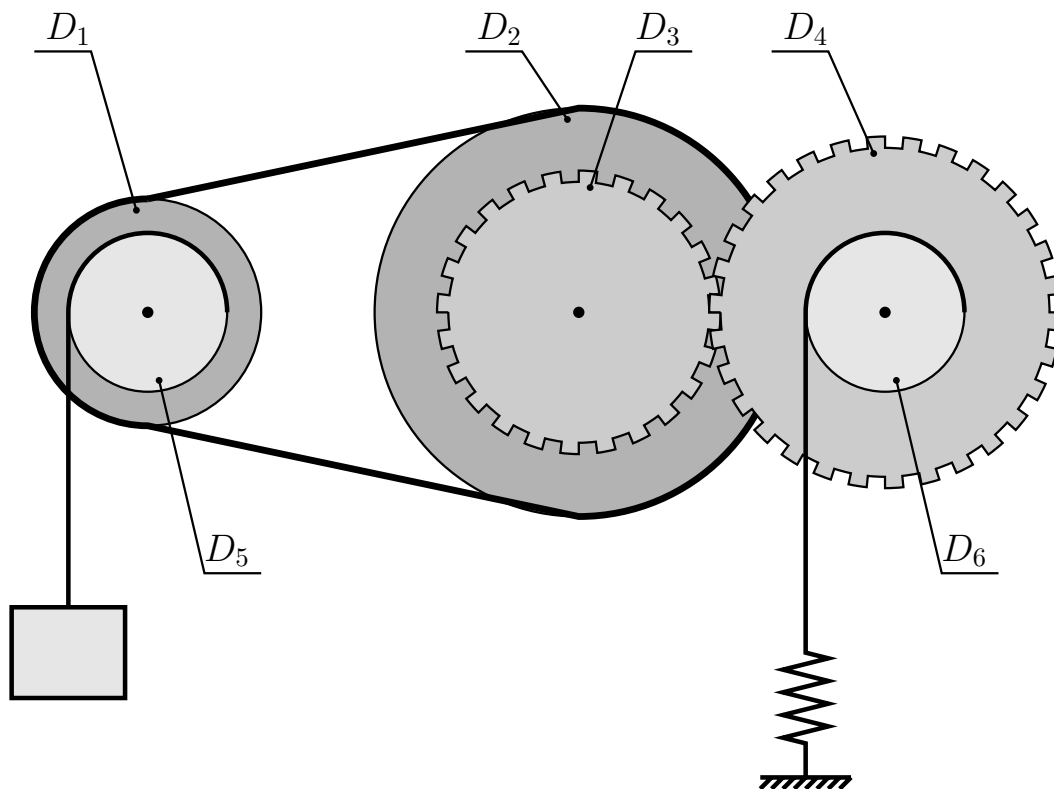
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 192x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.8\text{ нс/м}$.

Вариант №35



Диаметры дисков: $D_1 = 124\text{мм}$, $D_2 = 186\text{мм}$, $D_3 = 134\text{мм}$, $D_4 = 150\text{мм}$, $D_5 = 166\text{мм}$, $D_6 = 180\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 6\text{мм}$, $H_3 = 9\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 17\text{мм}$.

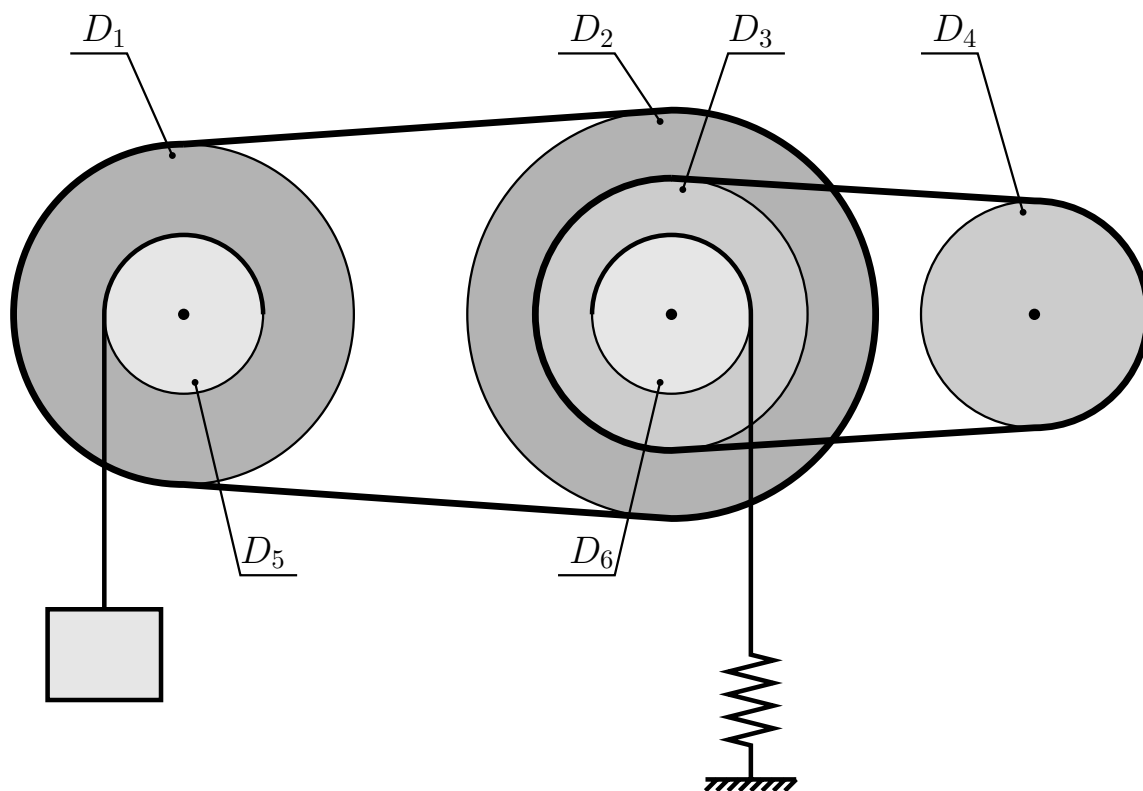
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 392x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.2\text{ нс/м}$.

Вариант №36



Диаметры дисков: $D_1 = 134\text{мм}$, $D_2 = 168\text{мм}$, $D_3 = 130\text{мм}$, $D_4 = 126\text{мм}$, $D_5 = 160\text{мм}$, $D_6 = 120\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 19\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 19\text{мм}$, $H_5 = 16\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

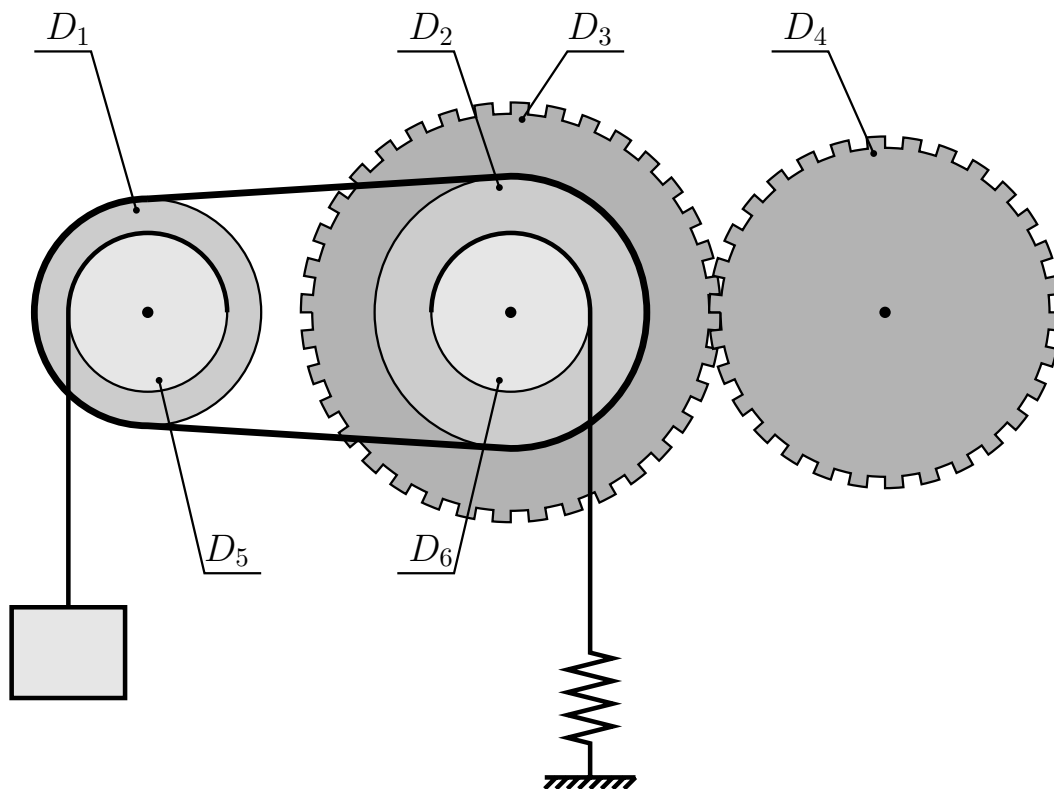
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 767x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.2\text{ нс/м}$.

Вариант №37



Диаметры дисков: $D_1 = 140\text{мм}$, $D_2 = 158\text{мм}$, $D_3 = 196\text{мм}$, $D_4 = 190\text{мм}$, $D_5 = 106\text{мм}$, $D_6 = 160\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 6\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 18\text{мм}$, $H_4 = 18\text{мм}$, $H_5 = 17\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

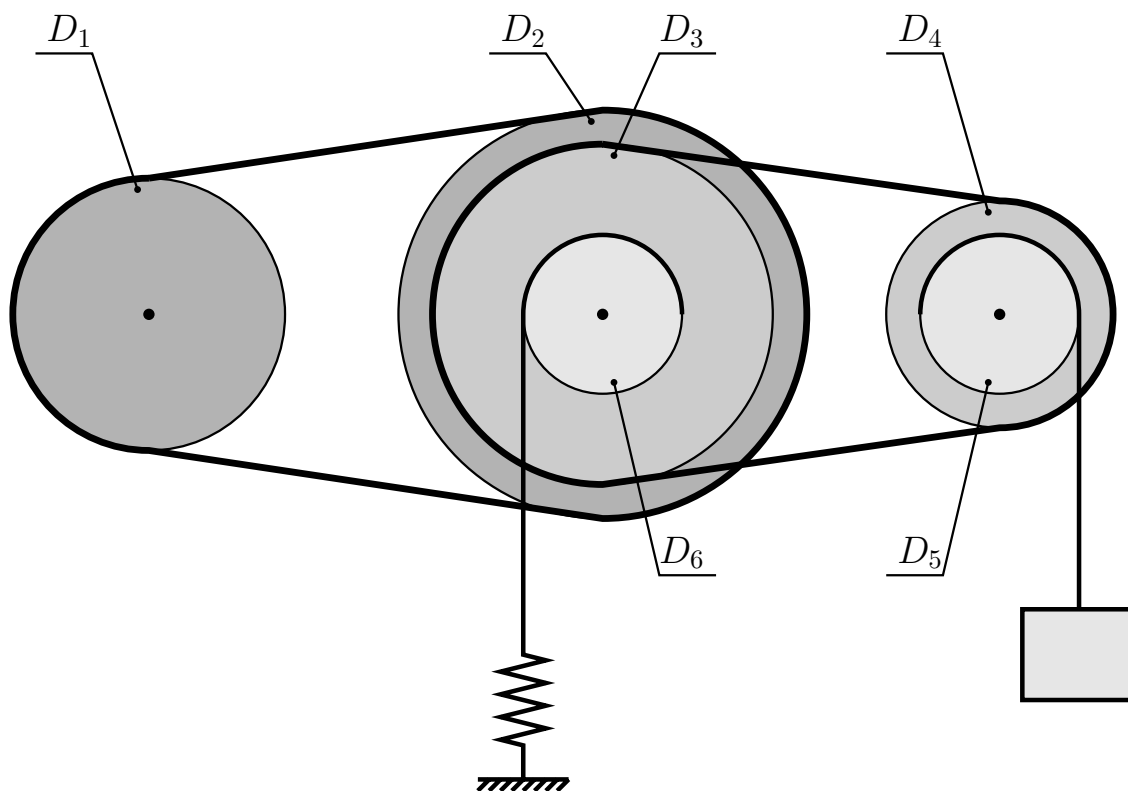
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 581x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.8\text{ нс/м}$.

Вариант №38



Диаметры дисков: $D_1 = 148\text{мм}$, $D_2 = 192\text{мм}$, $D_3 = 158\text{мм}$, $D_4 = 146\text{мм}$, $D_5 = 184\text{мм}$, $D_6 = 152\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 12\text{мм}$, $H_4 = 12\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 5\text{мм}$.

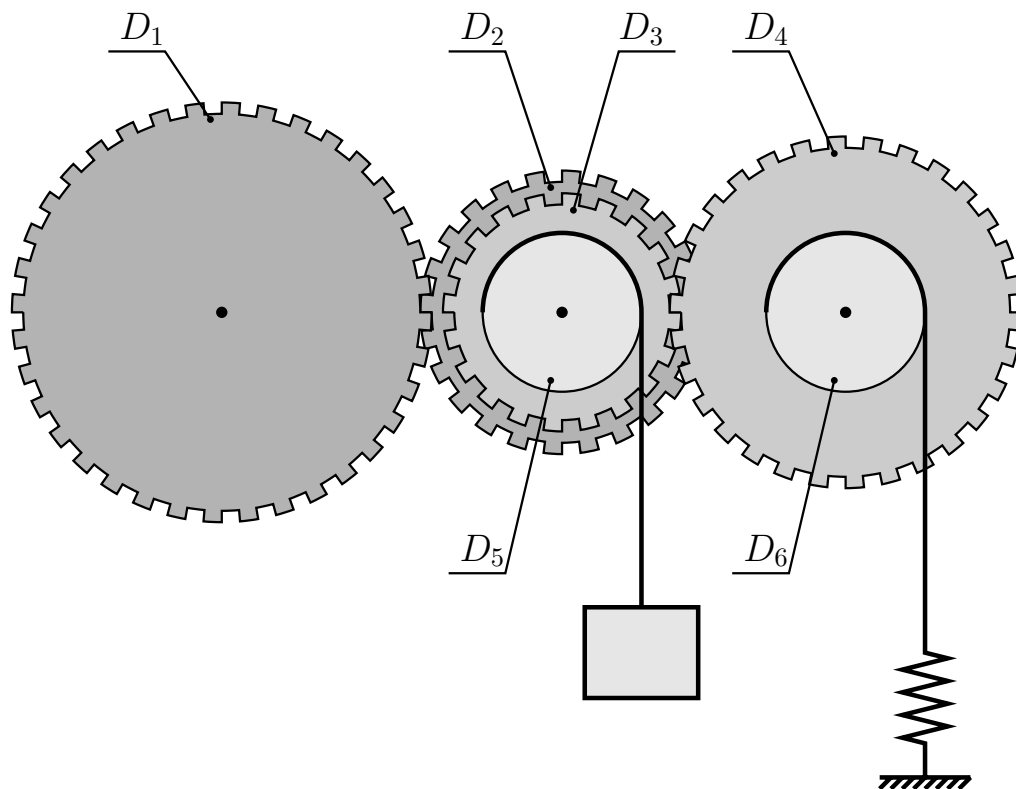
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 737x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.2\text{ нс/м}$.

Вариант №39



Диаметры дисков: $D_1 = 156\text{мм}$, $D_2 = 104\text{мм}$, $D_3 = 102\text{мм}$, $D_4 = 150\text{мм}$, $D_5 = 184\text{мм}$, $D_6 = 138\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 8\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

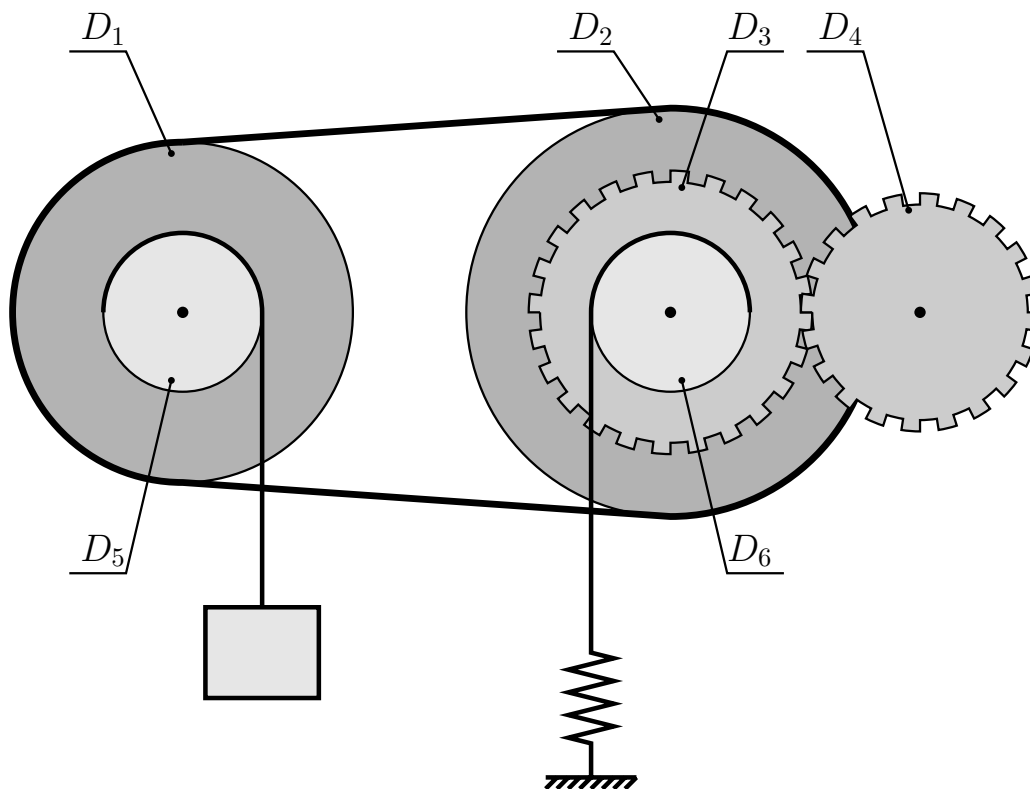
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 827x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.2\text{ нс/м}$.

Вариант №40



Диаметры дисков: $D_1 = 200\text{мм}$, $D_2 = 200\text{мм}$, $D_3 = 156\text{мм}$, $D_4 = 122\text{мм}$, $D_5 = 176\text{мм}$, $D_6 = 126\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 13\text{мм}$, $H_2 = 17\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 5\text{мм}$, $H_5 = 16\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

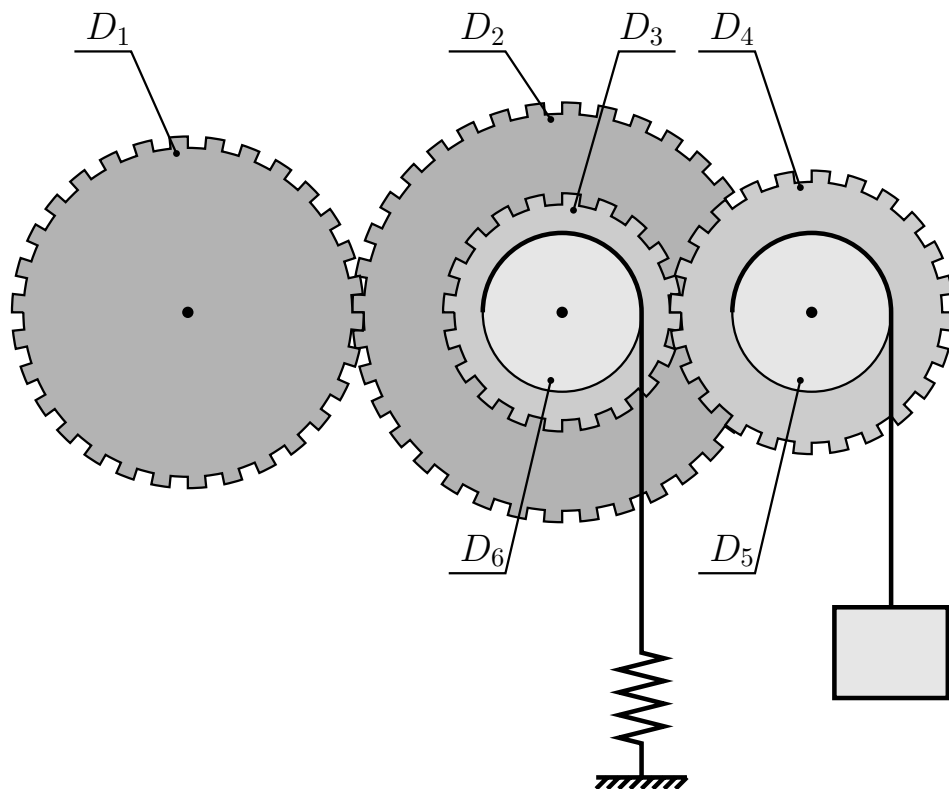
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 634x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{нс/м}$.

Вариант №41



Диаметры дисков: $D_1 = 130\text{мм}$, $D_2 = 184\text{мм}$, $D_3 = 114\text{мм}$, $D_4 = 118\text{мм}$, $D_5 = 188\text{мм}$, $D_6 = 182\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 6\text{мм}$, $H_2 = 6\text{мм}$, $H_3 = 5\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 15\text{мм}$.

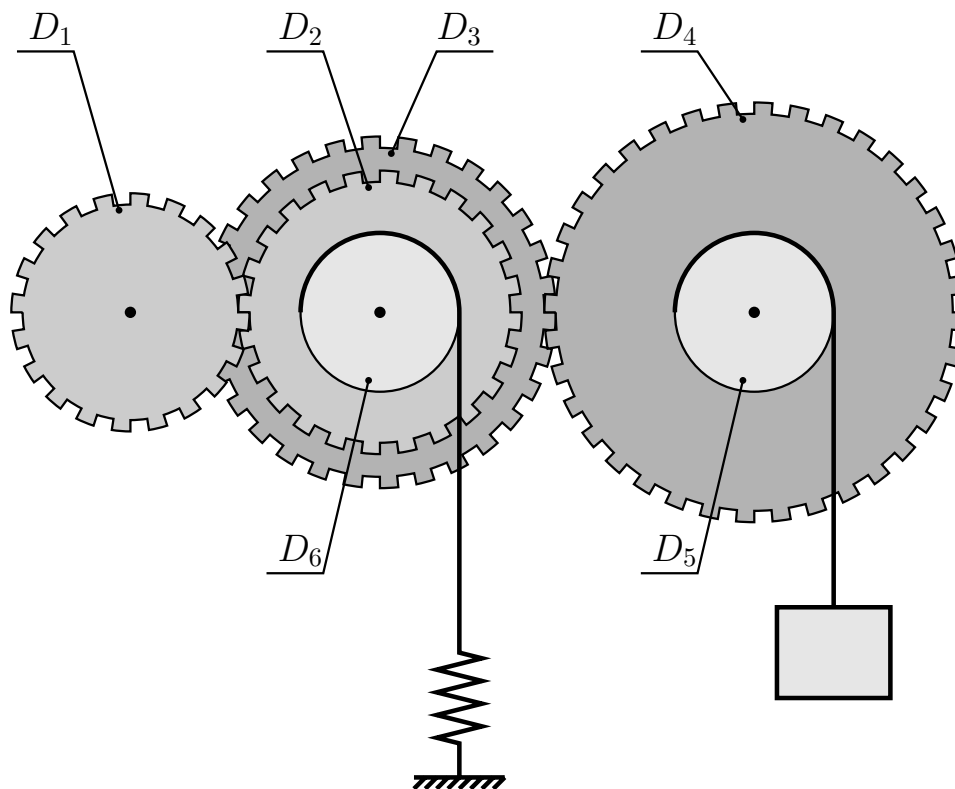
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 165x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.6\text{ нс/м}$.

Вариант №42



Диаметры дисков: $D_1 = 100\text{мм}$, $D_2 = 128\text{мм}$, $D_3 = 166\text{мм}$, $D_4 = 166\text{мм}$, $D_5 = 178\text{мм}$, $D_6 = 112\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 16\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

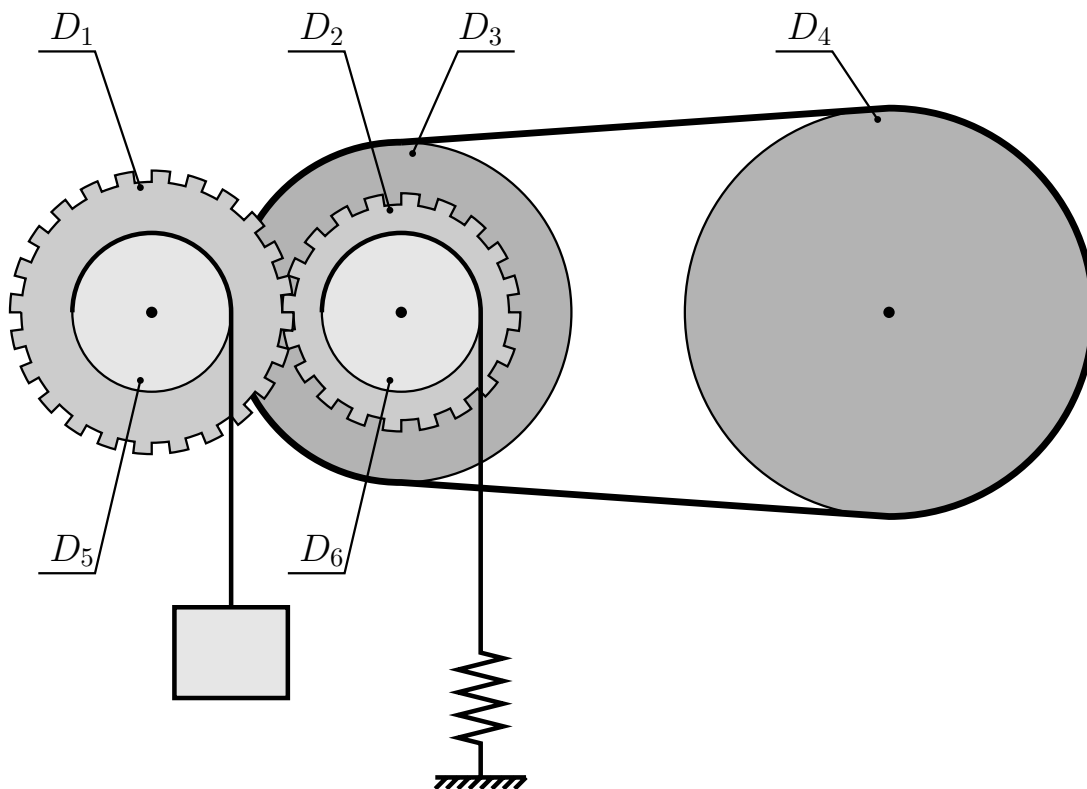
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 971x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №43



Диаметры дисков: $D_1 = 134\text{мм}$, $D_2 = 104\text{мм}$, $D_3 = 136\text{мм}$, $D_4 = 176\text{мм}$, $D_5 = 144\text{мм}$, $D_6 = 146\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 6\text{мм}$, $H_2 = 17\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 19\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

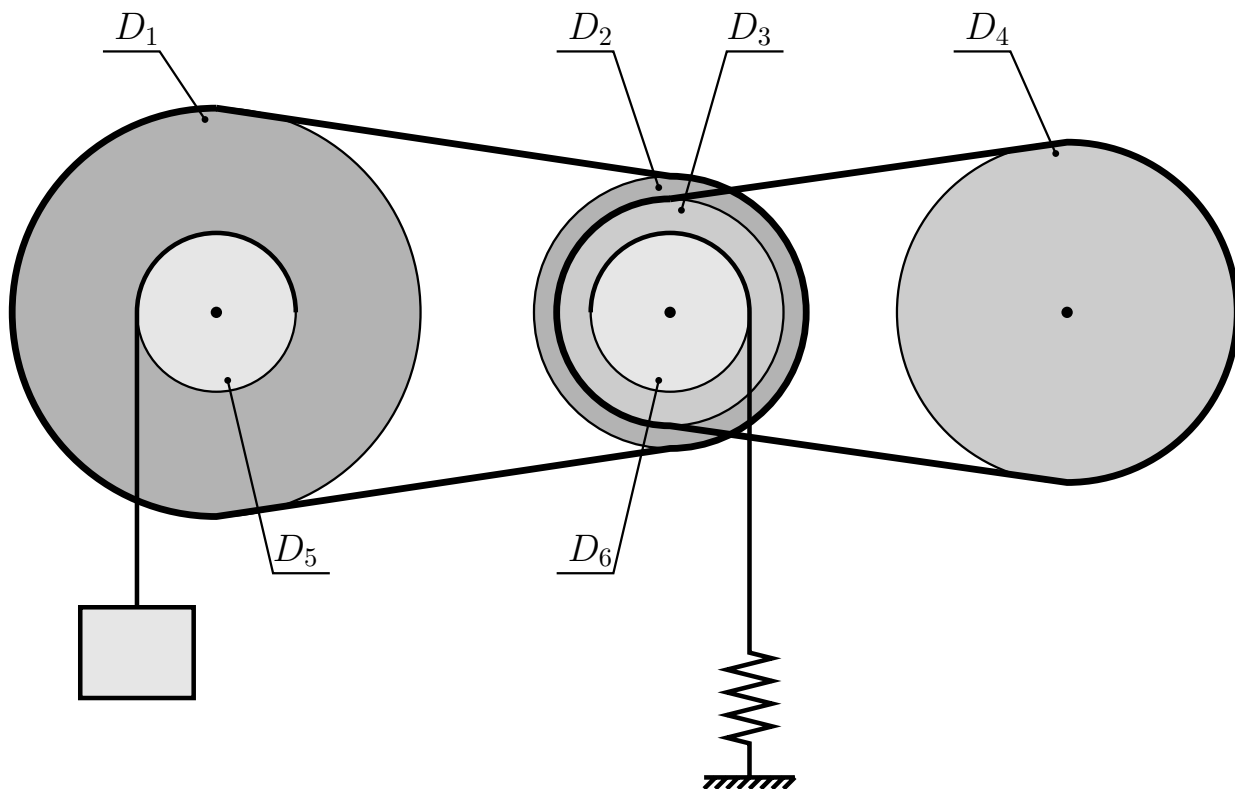
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 486x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.6\text{ нс/м}$.

Вариант №44



Диаметры дисков: $D_1 = 182\text{мм}$, $D_2 = 148\text{мм}$, $D_3 = 116\text{мм}$, $D_4 = 164\text{мм}$, $D_5 = 192\text{мм}$, $D_6 = 200\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 19\text{мм}$, $H_2 = 19\text{мм}$, $H_3 = 14\text{мм}$, $H_4 = 20\text{мм}$, $H_5 = 17\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

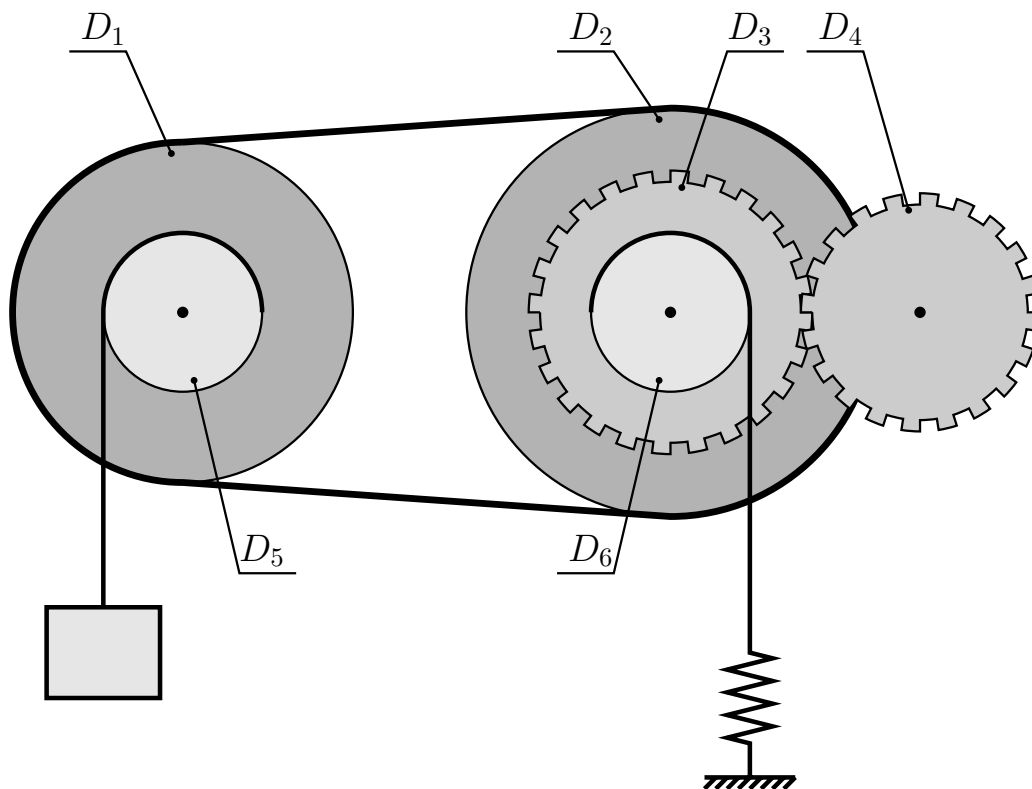
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 128x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6\text{ нс/м}$.

Вариант №45



Диаметры дисков: $D_1 = 168\text{мм}$, $D_2 = 174\text{мм}$, $D_3 = 136\text{мм}$, $D_4 = 102\text{мм}$, $D_5 = 112\text{мм}$, $D_6 = 166\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 17\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 9\text{мм}$.

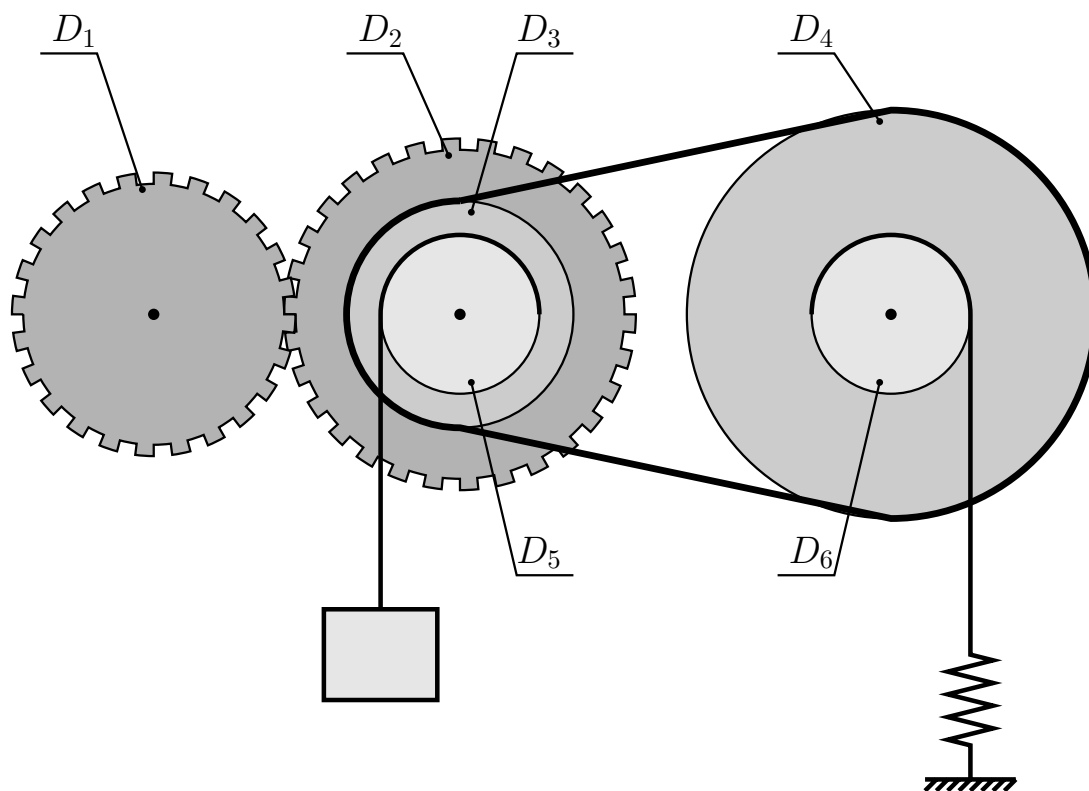
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 757x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.6\text{ нс/м}$.

Вариант №46



Диаметры дисков: $D_1 = 140\text{мм}$, $D_2 = 172\text{мм}$, $D_3 = 126\text{мм}$, $D_4 = 200\text{мм}$, $D_5 = 106\text{мм}$, $D_6 = 184\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 15\text{мм}$, $H_2 = 15\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 18\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 17\text{мм}$.

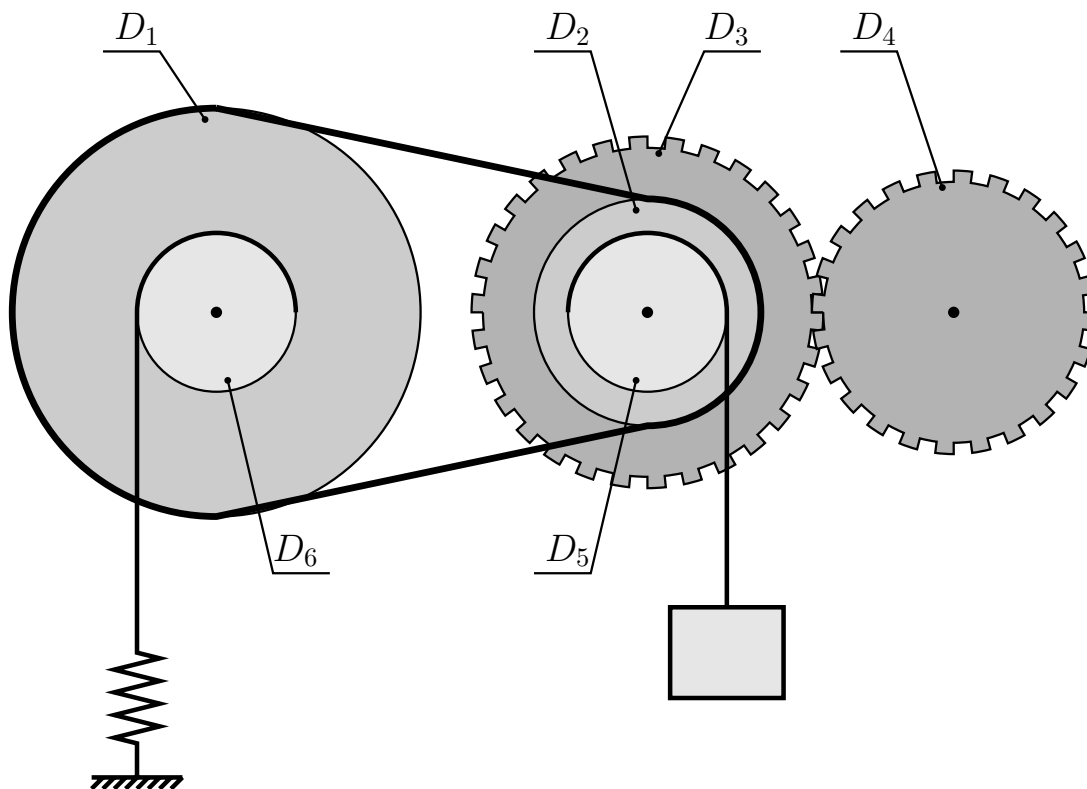
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 675x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.4\text{нс/м}$.

Вариант №47



Диаметры дисков: $D_1 = 192\text{мм}$, $D_2 = 132\text{мм}$, $D_3 = 154\text{мм}$, $D_4 = 148\text{мм}$, $D_5 = 182\text{мм}$, $D_6 = 132\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 6\text{мм}$.

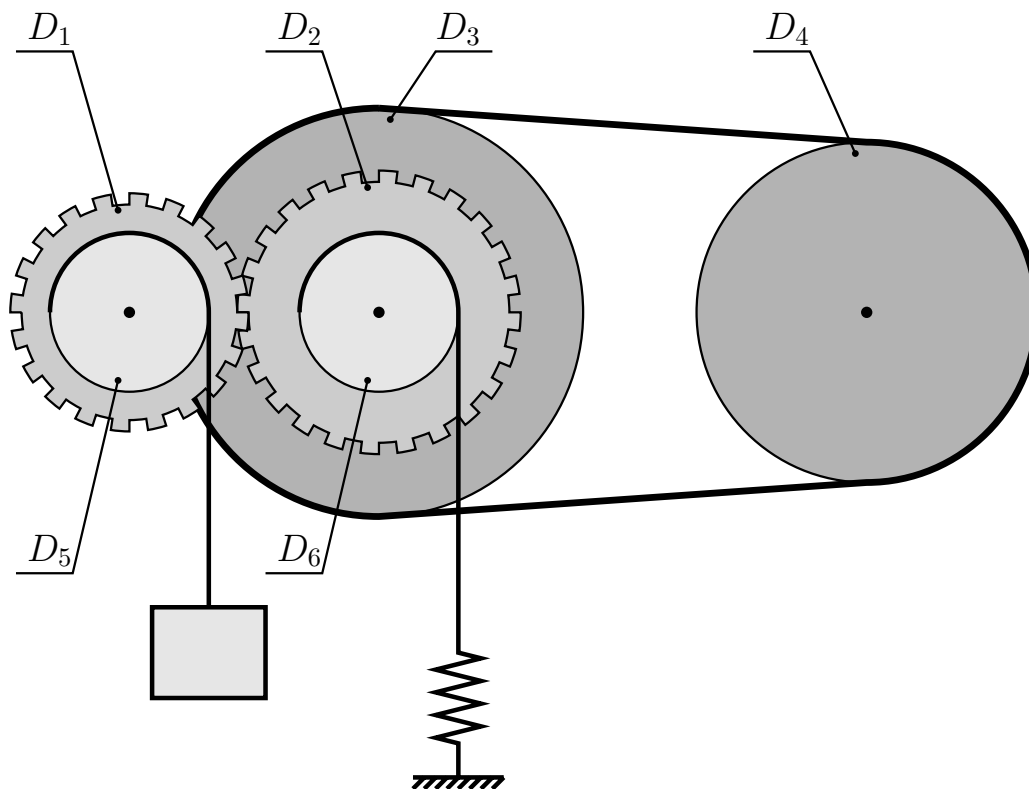
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 876x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.6\text{ нс/м}$.

Вариант №48



Диаметры дисков: $D_1 = 110\text{мм}$, $D_2 = 110\text{мм}$, $D_3 = 168\text{мм}$, $D_4 = 140\text{мм}$, $D_5 = 196\text{мм}$, $D_6 = 162\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 20\text{мм}$, $H_2 = 8\text{мм}$, $H_3 = 5\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

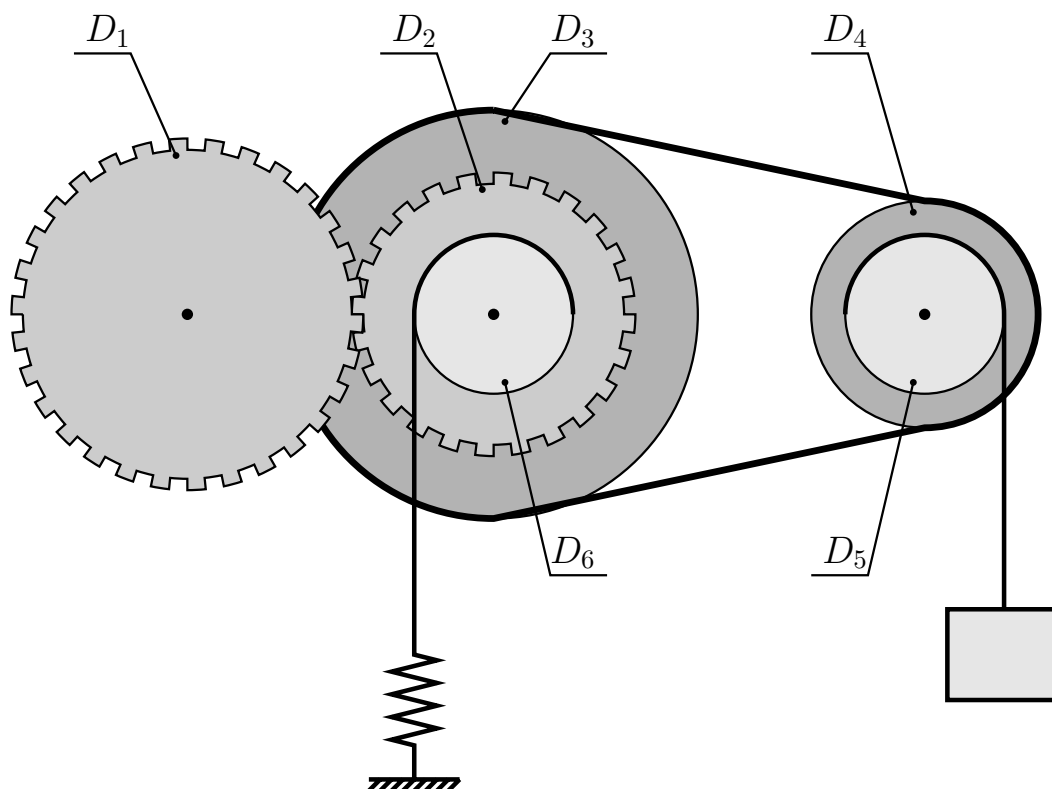
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 569x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.4\text{ нс/м}$.

Вариант №49



Диаметры дисков: $D_1 = 180\text{мм}$, $D_2 = 150\text{мм}$, $D_3 = 188\text{мм}$, $D_4 = 142\text{мм}$, $D_5 = 132\text{мм}$, $D_6 = 128\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 14\text{мм}$, $H_4 = 5\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 10\text{мм}$.

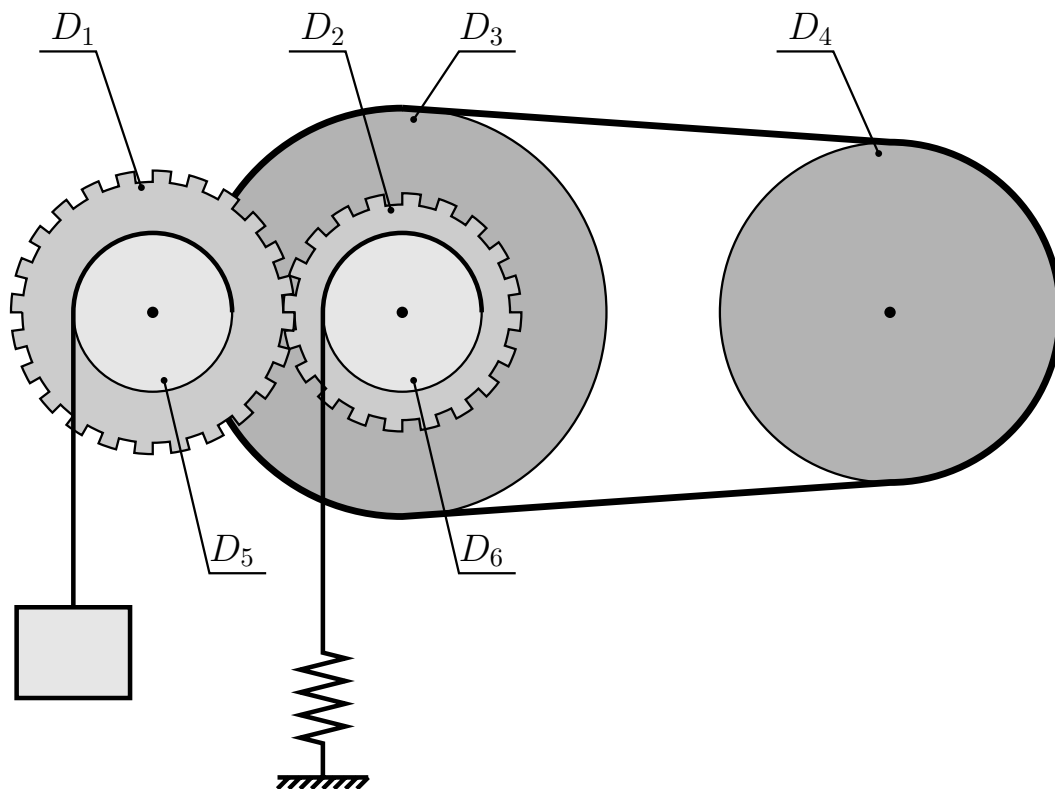
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 417x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2\text{нс/м}$.

Вариант №50



Диаметры дисков: $D_1 = 122\text{мм}$, $D_2 = 102\text{мм}$, $D_3 = 172\text{мм}$, $D_4 = 128\text{мм}$, $D_5 = 200\text{мм}$, $D_6 = 114\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 20\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 14\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

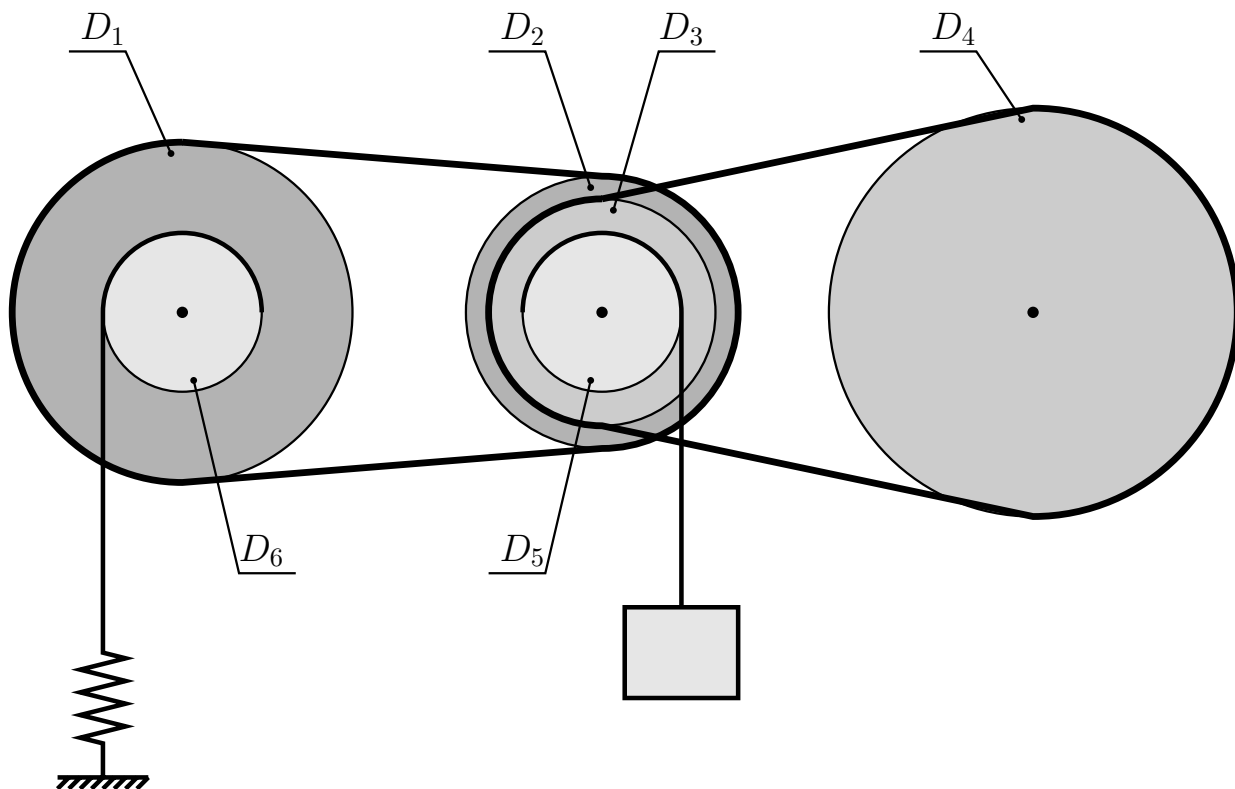
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 297x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.6\text{ нс/м}$.

Вариант №51



Диаметры дисков: $D_1 = 158\text{мм}$, $D_2 = 140\text{мм}$, $D_3 = 136\text{мм}$, $D_4 = 178\text{мм}$, $D_5 = 118\text{мм}$, $D_6 = 194\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 20\text{мм}$, $H_2 = 14\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 10\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

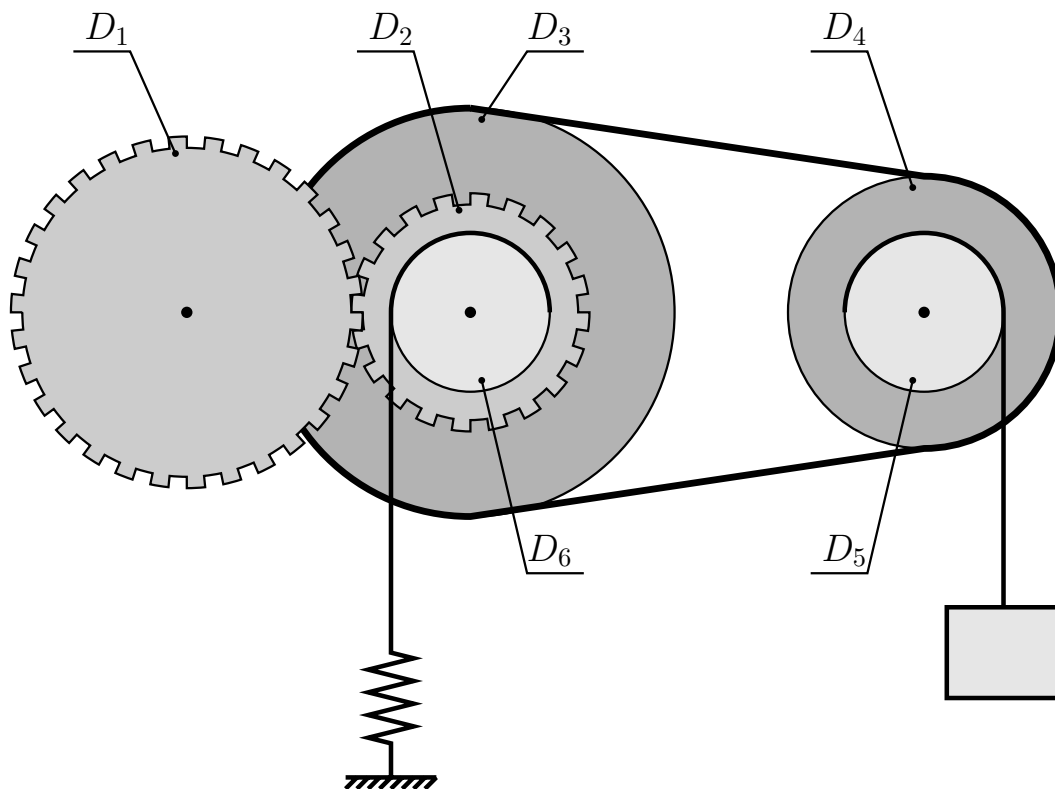
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 123x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.4\text{ нс/м}$.

Вариант №52



Диаметры дисков: $D_1 = 180\text{мм}$, $D_2 = 116\text{мм}$, $D_3 = 200\text{мм}$, $D_4 = 144\text{мм}$, $D_5 = 190\text{мм}$, $D_6 = 126\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 17\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 17\text{мм}$, $H_6 = 7\text{мм}$.

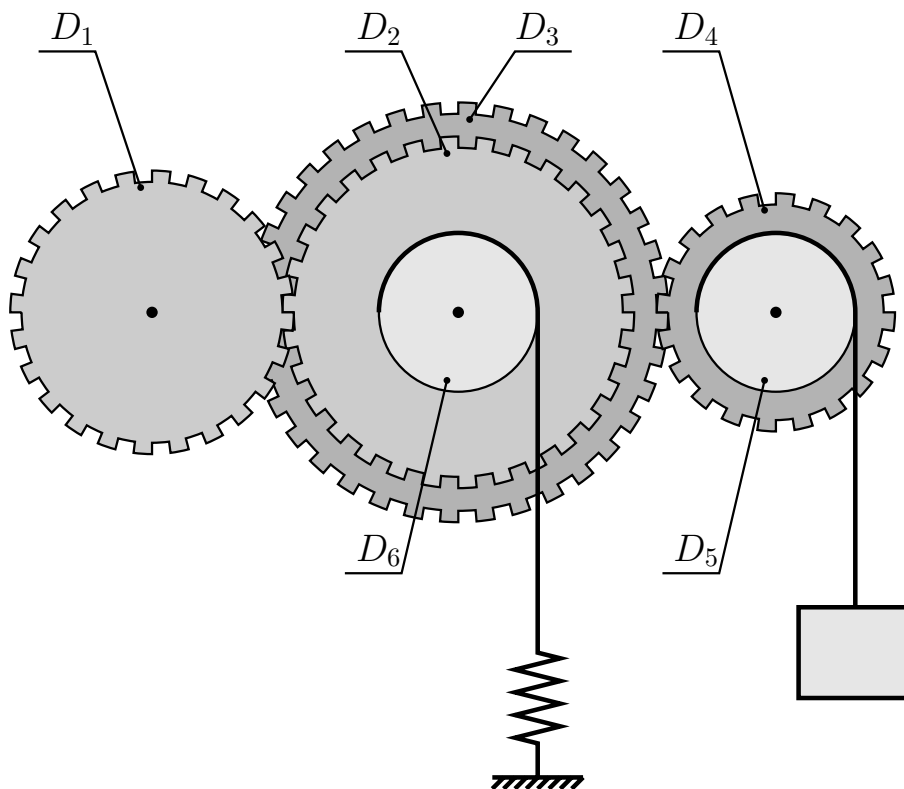
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 798x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.8\text{ нс/м}$.

Вариант №53



Диаметры дисков: $D_1 = 114\text{мм}$, $D_2 = 144\text{мм}$, $D_3 = 200\text{мм}$, $D_4 = 110\text{мм}$, $D_5 = 150\text{мм}$, $D_6 = 156\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 17\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 16\text{мм}$.

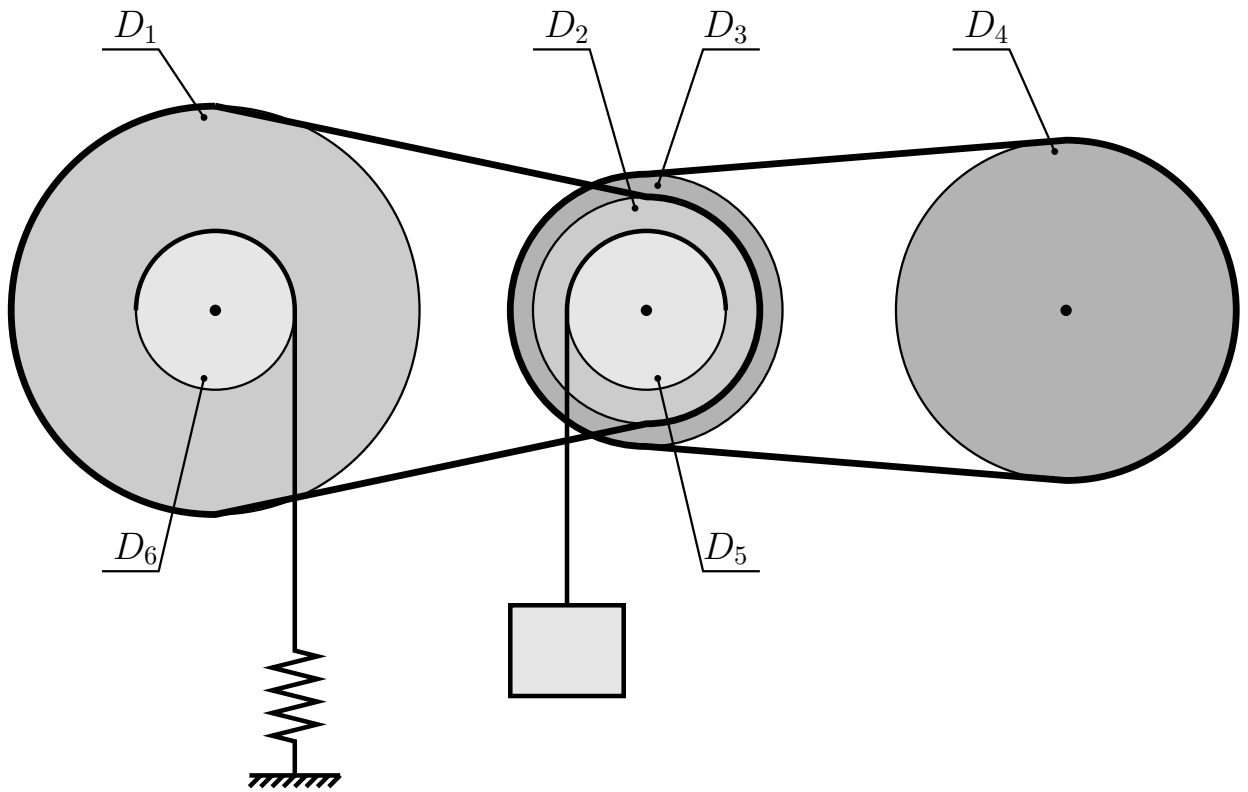
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 836x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.8\text{ нс/м}$.

Вариант №54



Диаметры дисков: $D_1 = 188\text{мм}$, $D_2 = 120\text{мм}$, $D_3 = 152\text{мм}$, $D_4 = 168\text{мм}$, $D_5 = 162\text{мм}$, $D_6 = 128\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 10\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 19\text{мм}$, $H_5 = 17\text{мм}$, $H_6 = 7\text{мм}$.

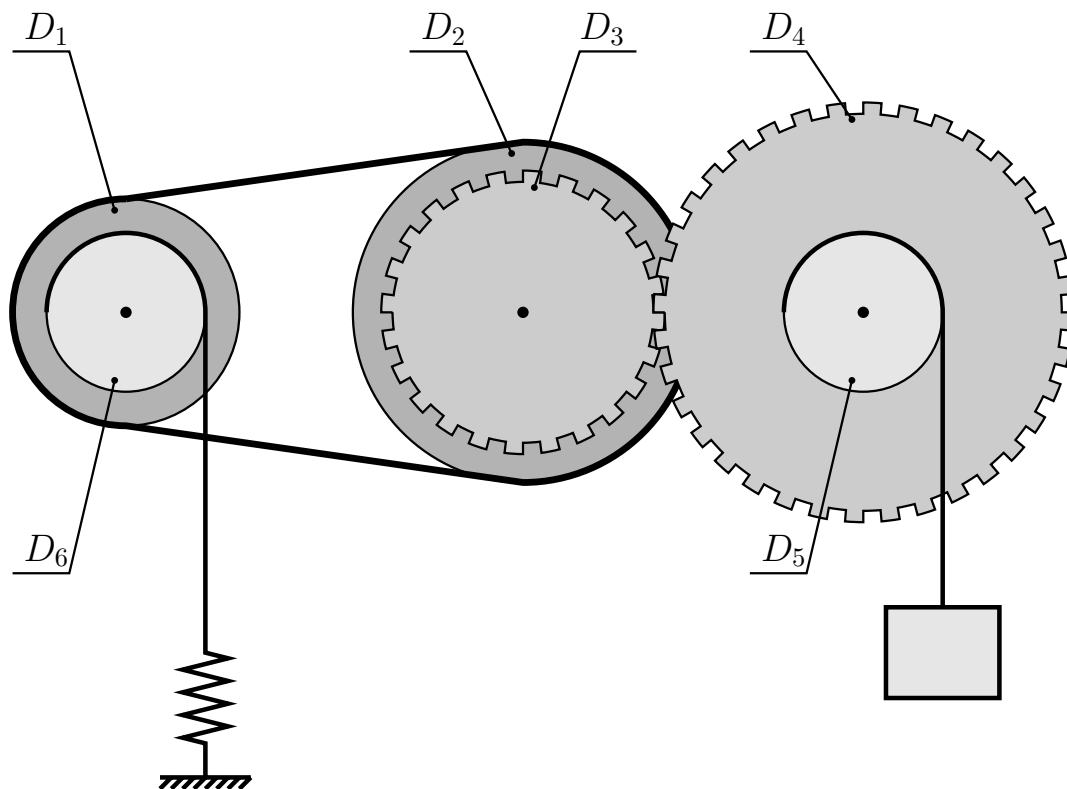
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 422x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.6\text{ нс/м}$.

Вариант №55



Диаметры дисков: $D_1 = 124\text{мм}$, $D_2 = 182\text{мм}$, $D_3 = 154\text{мм}$, $D_4 = 184\text{мм}$, $D_5 = 192\text{мм}$, $D_6 = 194\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 16\text{мм}$, $H_2 = 16\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 5\text{мм}$, $H_5 = 16\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

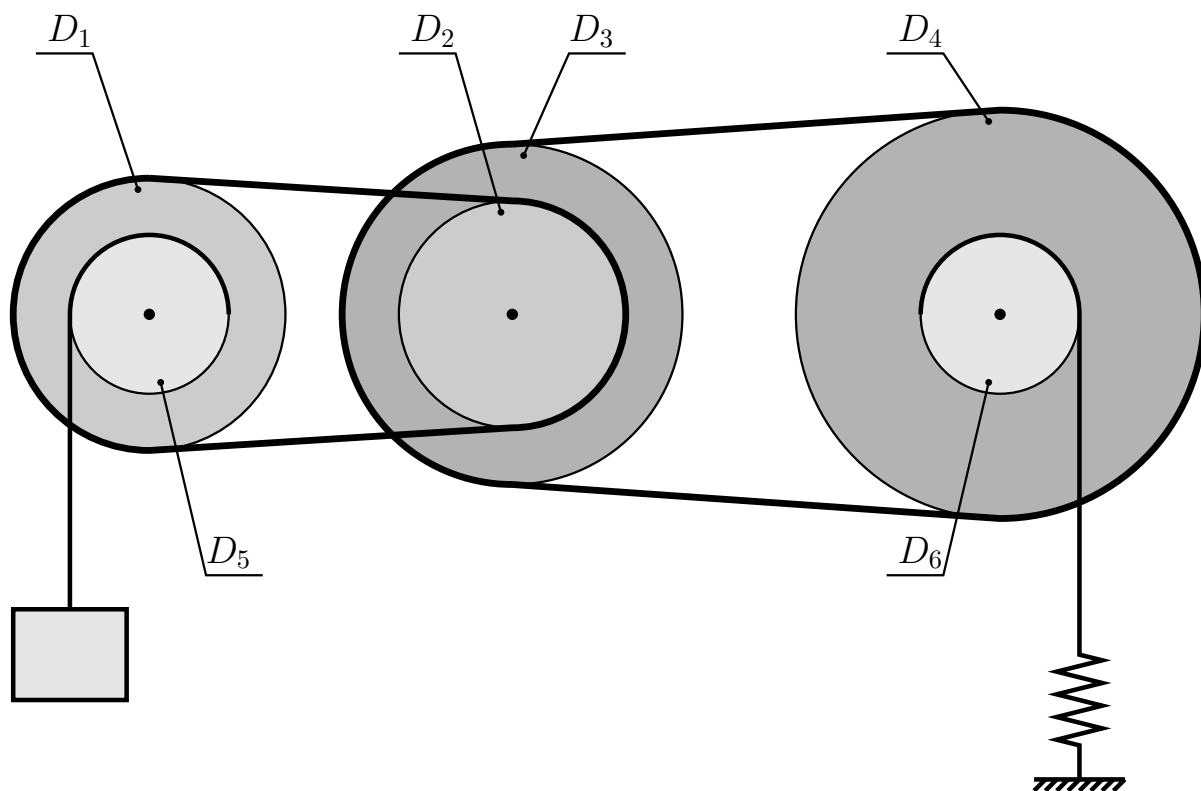
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 925x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.8\text{ нс/м}$.

Вариант №56



Диаметры дисков: $D_1 = 146\text{мм}$, $D_2 = 112\text{мм}$, $D_3 = 148\text{мм}$, $D_4 = 174\text{мм}$, $D_5 = 194\text{мм}$, $D_6 = 100\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 5\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

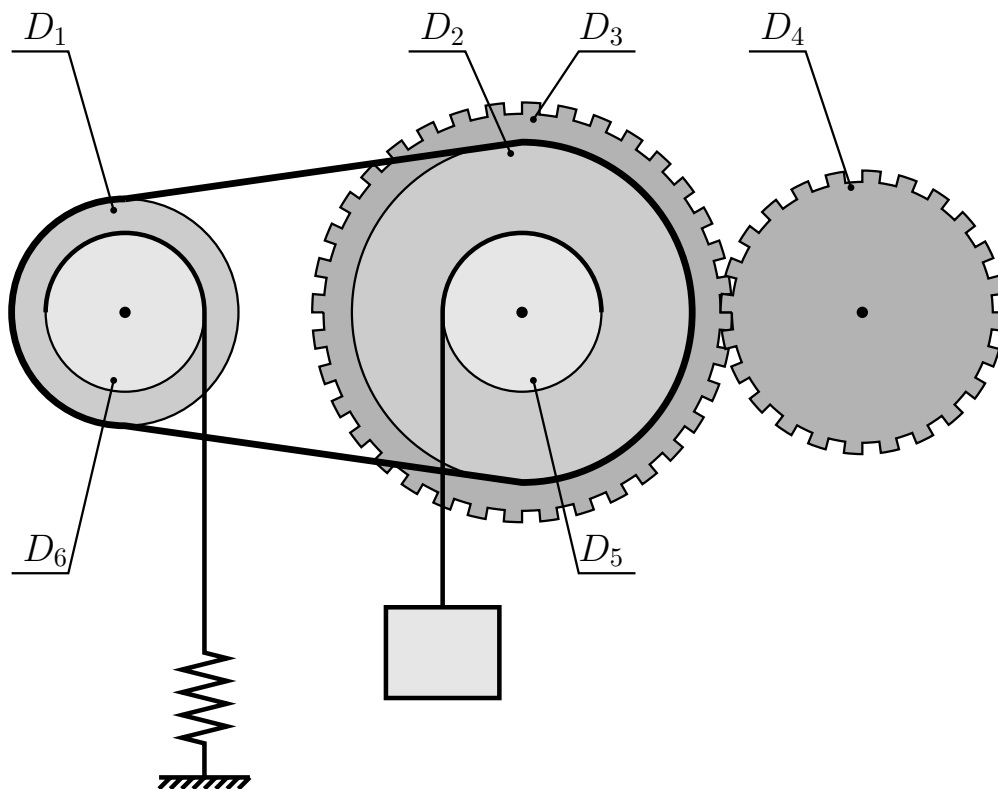
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 231x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.8\text{нс/м}$.

Вариант №57



Диаметры дисков: $D_1 = 162\text{мм}$, $D_2 = 194\text{мм}$, $D_3 = 200\text{мм}$, $D_4 = 166\text{мм}$, $D_5 = 186\text{мм}$, $D_6 = 166\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 11\text{мм}$, $H_3 = 9\text{мм}$, $H_4 = 12\text{мм}$, $H_5 = 12\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

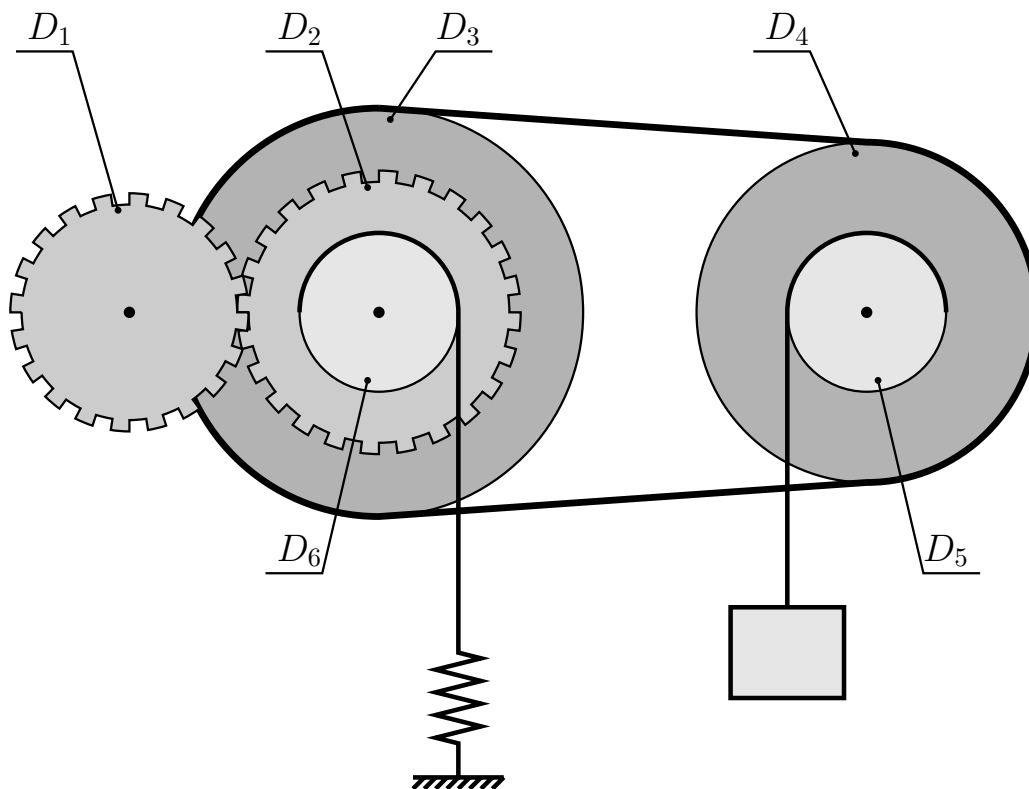
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 661x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.2\text{ нс/м}$.

Вариант №58



Диаметры дисков: $D_1 = 126\text{мм}$, $D_2 = 168\text{мм}$, $D_3 = 192\text{мм}$, $D_4 = 190\text{мм}$, $D_5 = 130\text{мм}$, $D_6 = 186\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 15\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 17\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 14\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

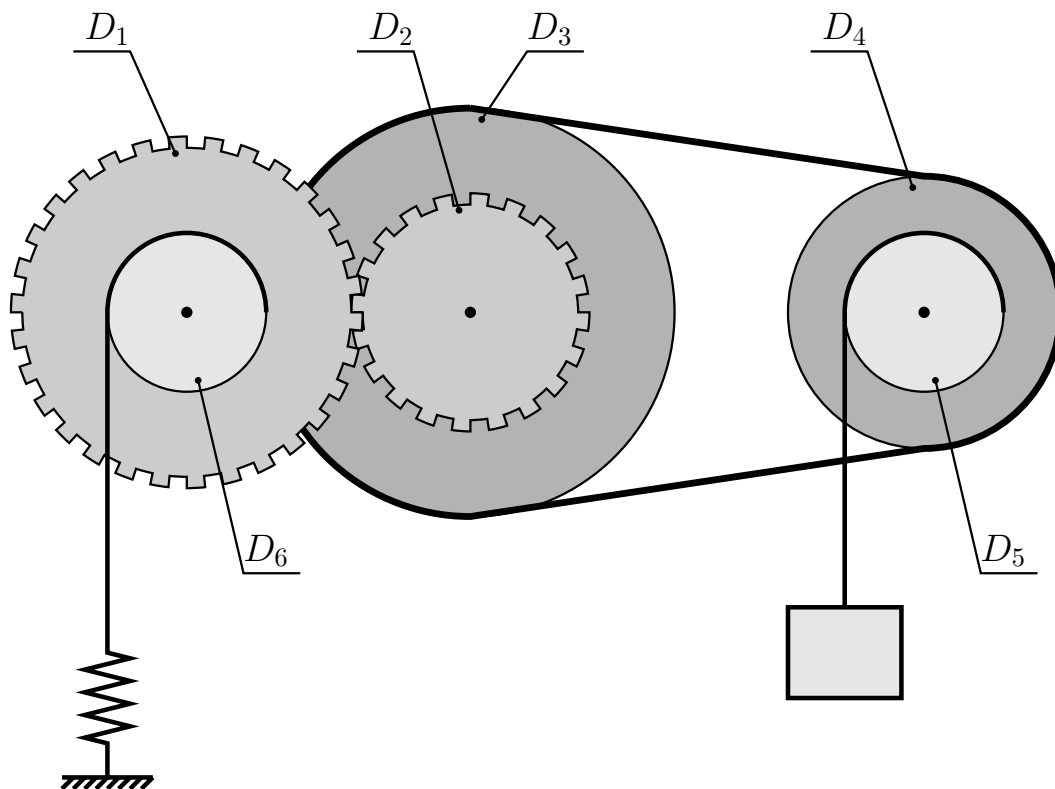
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 760x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.2\text{ нс/м}$.

Вариант №59



Диаметры дисков: $D_1 = 198\text{мм}$, $D_2 = 128\text{мм}$, $D_3 = 198\text{мм}$, $D_4 = 156\text{мм}$, $D_5 = 182\text{мм}$, $D_6 = 172\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 15\text{мм}$, $H_2 = 8\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 19\text{мм}$, $H_5 = 10\text{мм}$, $H_6 = 18\text{мм}$.

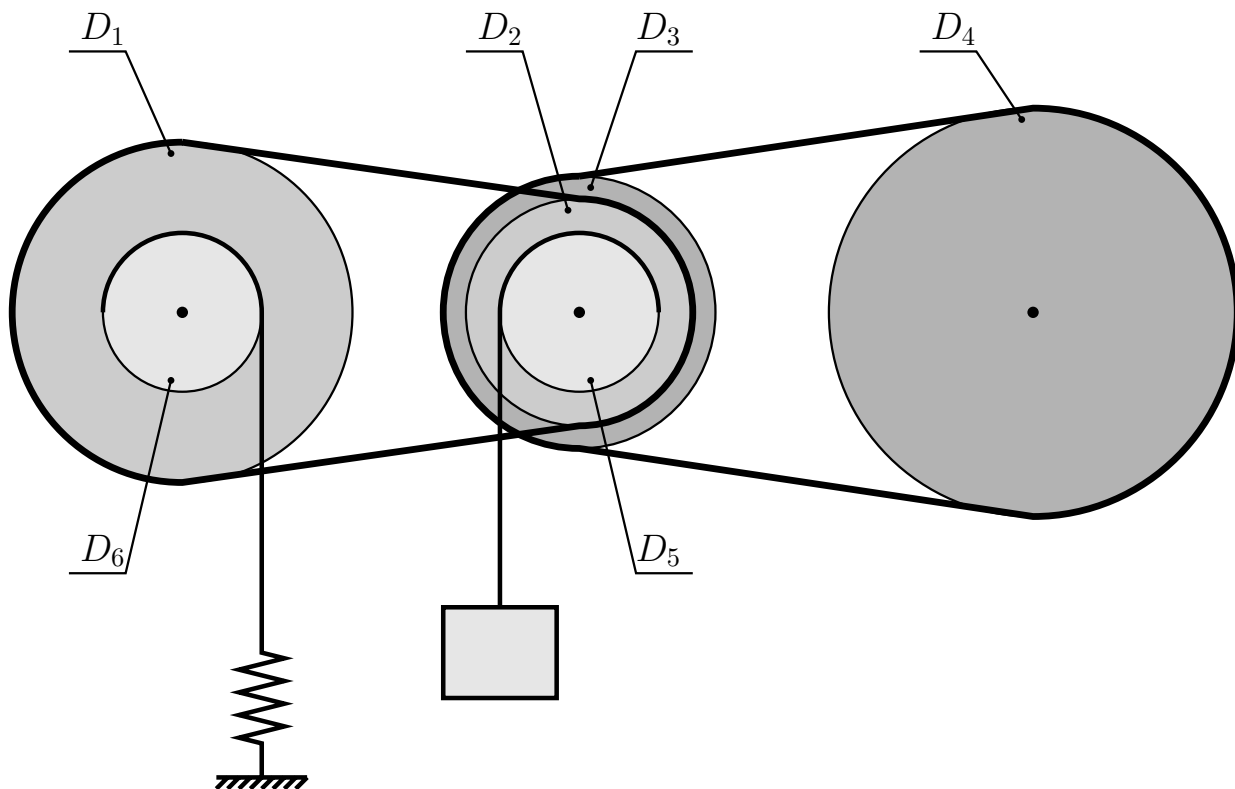
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 789x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.8\text{ нс/м}$.

Вариант №60



Диаметры дисков: $D_1 = 170\text{мм}$, $D_2 = 124\text{мм}$, $D_3 = 164\text{мм}$, $D_4 = 170\text{мм}$, $D_5 = 192\text{мм}$, $D_6 = 140\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 12\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

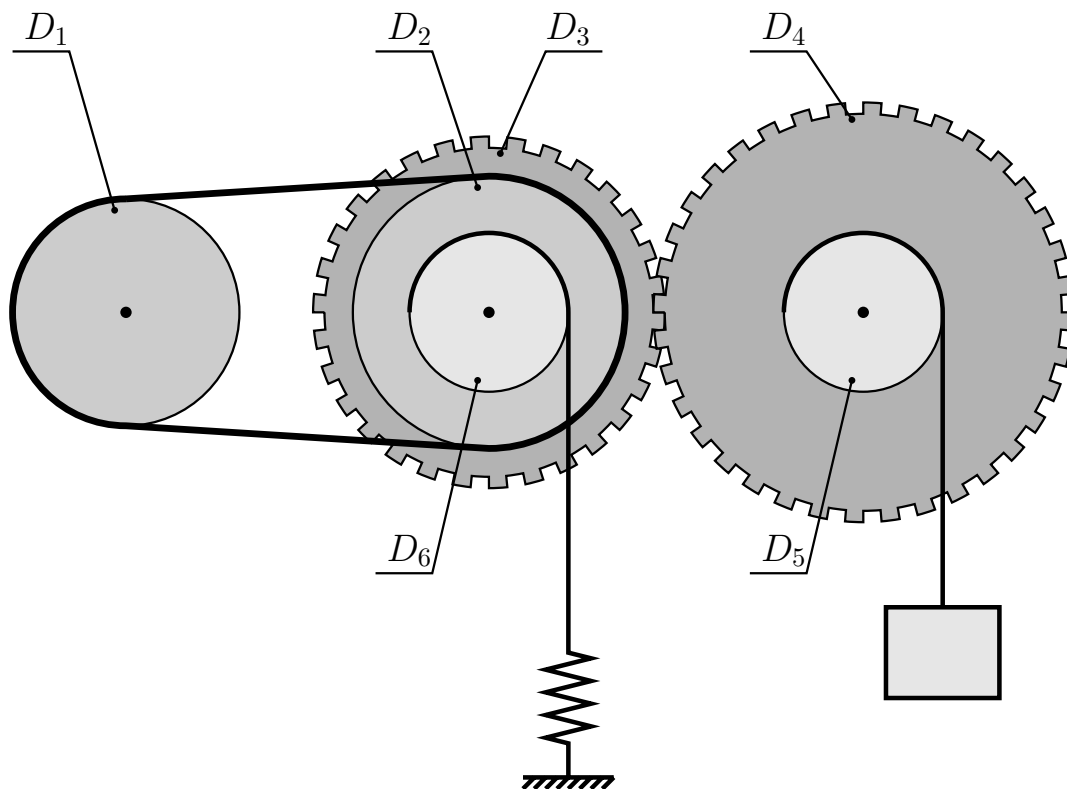
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 249x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №61



Диаметры дисков: $D_1 = 100\text{мм}$, $D_2 = 136\text{мм}$, $D_3 = 150\text{мм}$, $D_4 = 158\text{мм}$, $D_5 = 134\text{мм}$, $D_6 = 158\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 20\text{мм}$, $H_5 = 19\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

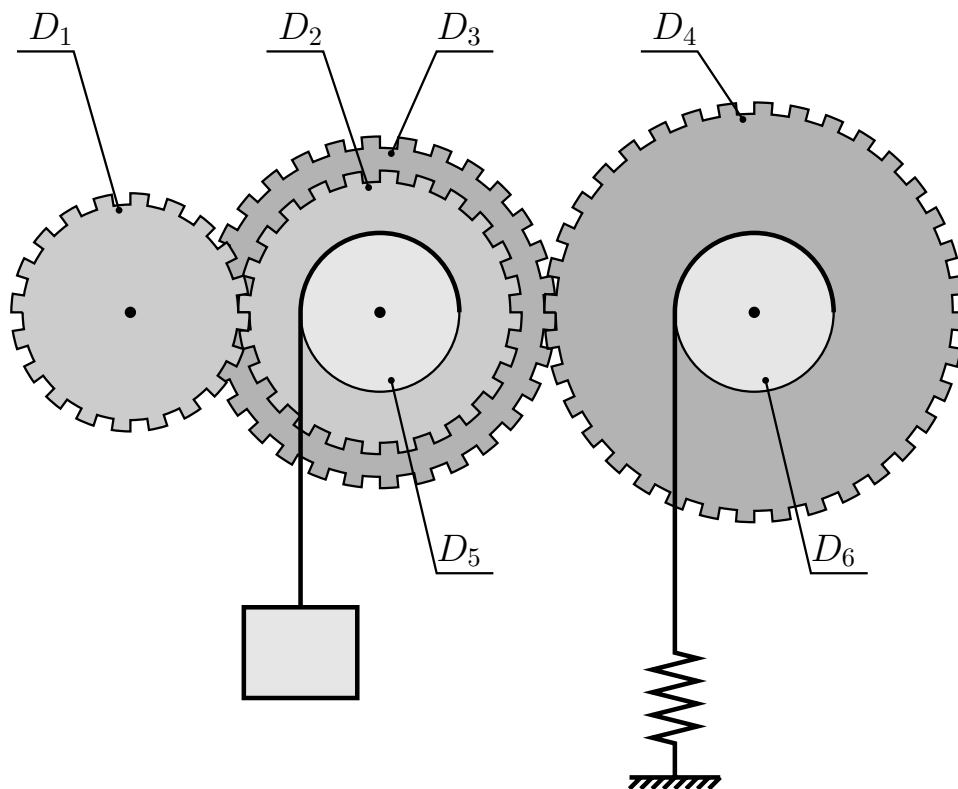
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 766x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{ нс/м}$.

Вариант №62



Диаметры дисков: $D_1 = 120\text{мм}$, $D_2 = 120\text{мм}$, $D_3 = 134\text{мм}$, $D_4 = 148\text{мм}$, $D_5 = 122\text{мм}$, $D_6 = 178\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 15\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 10\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

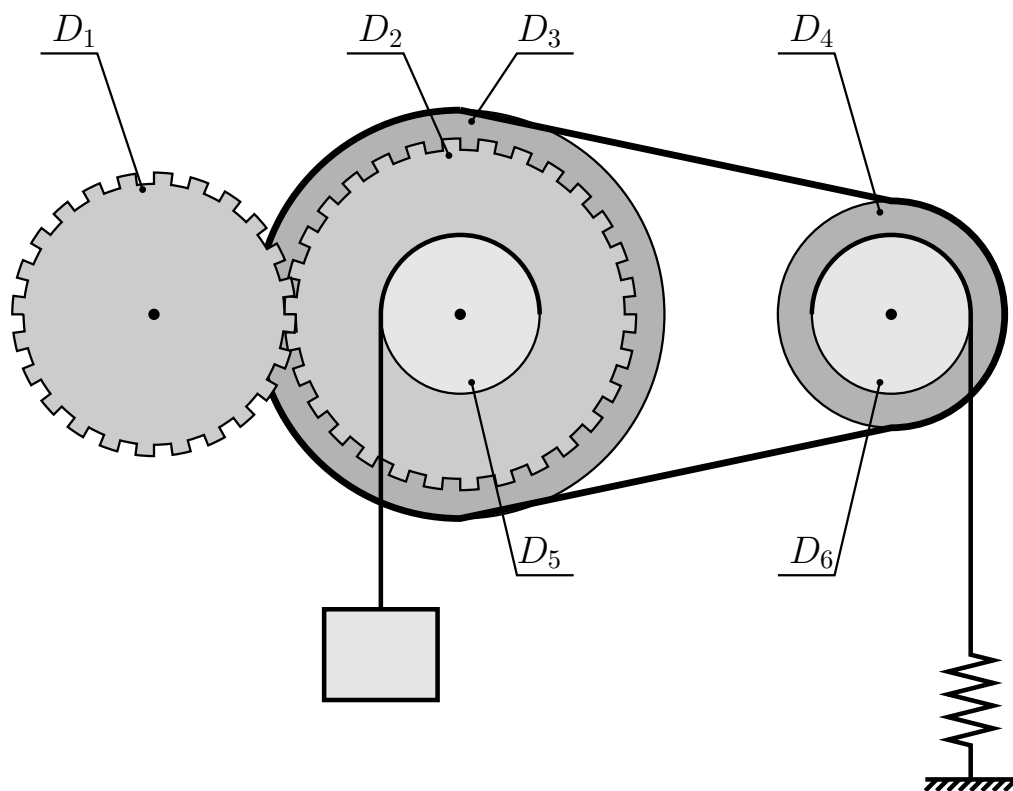
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 220x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №63



Диаметры дисков: $D_1 = 156\text{мм}$, $D_2 = 164\text{мм}$, $D_3 = 174\text{мм}$, $D_4 = 120\text{мм}$, $D_5 = 136\text{мм}$, $D_6 = 138\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 16\text{мм}$, $H_3 = 8\text{мм}$, $H_4 = 14\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

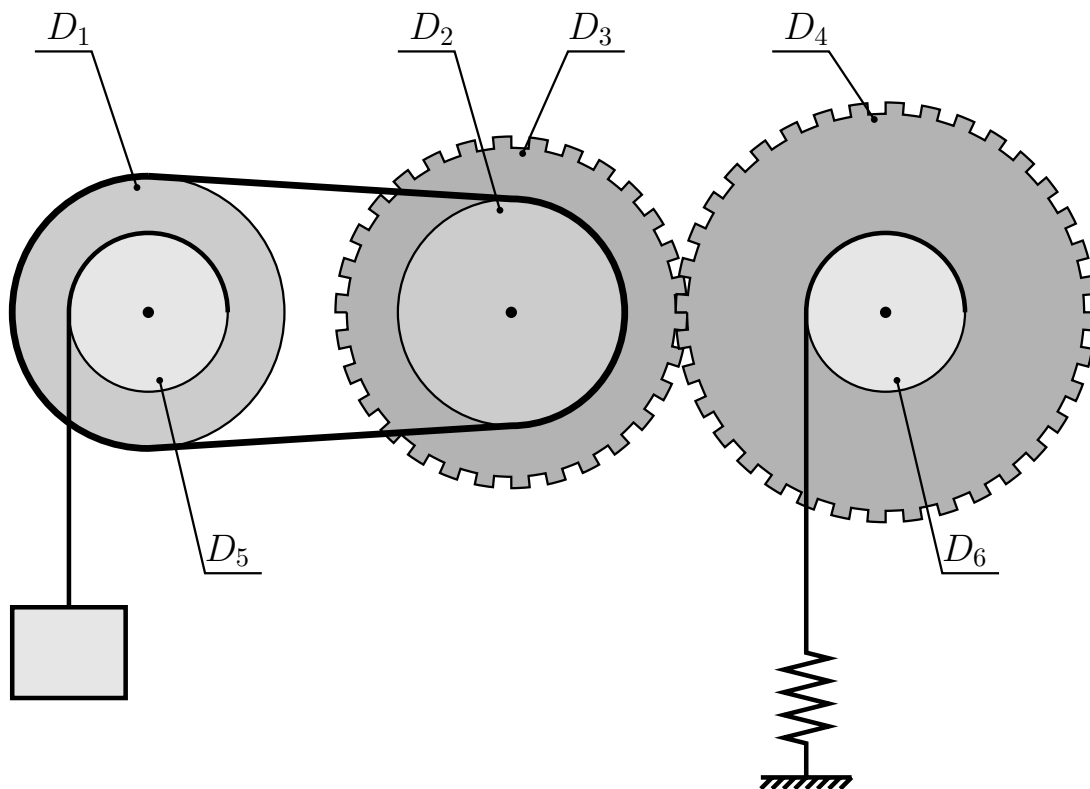
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 380x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.2\text{ нс/м}$.

Вариант №64



Диаметры дисков: $D_1 = 158\text{мм}$, $D_2 = 104\text{мм}$, $D_3 = 192\text{мм}$, $D_4 = 196\text{мм}$, $D_5 = 102\text{мм}$, $D_6 = 128\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 17\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 18\text{мм}$, $H_4 = 16\text{мм}$, $H_5 = 6\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

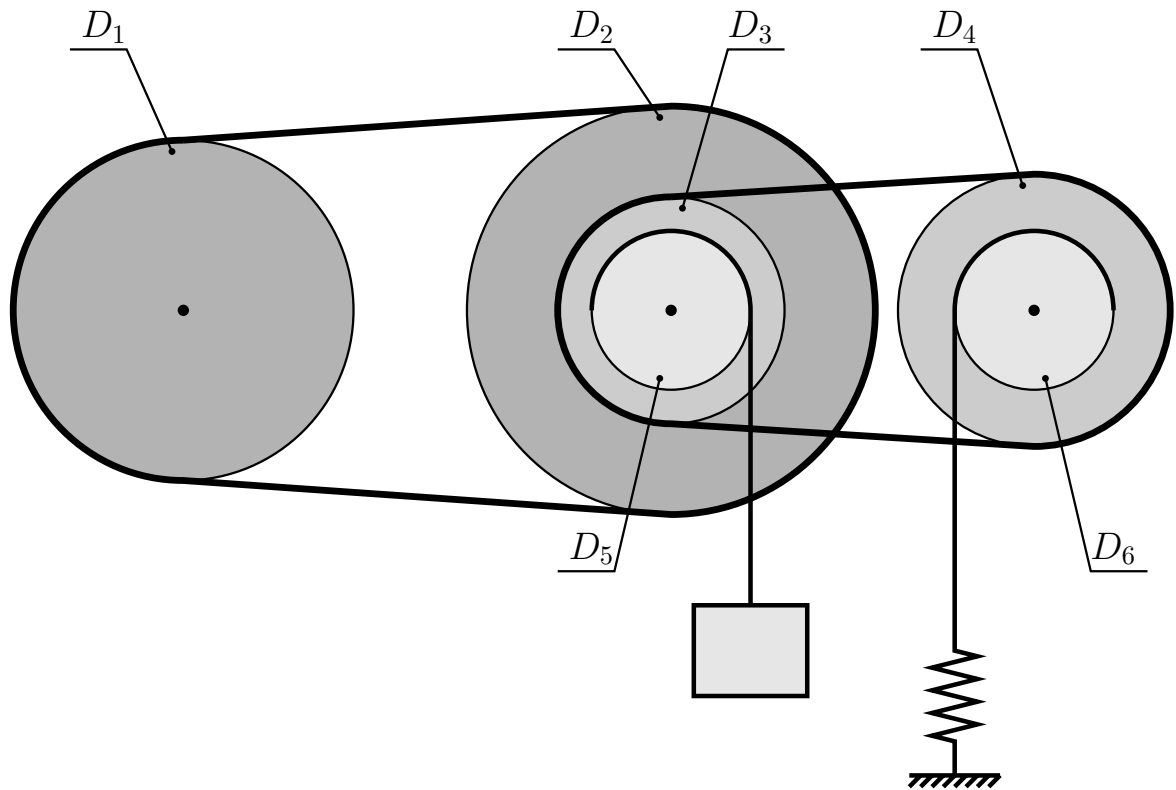
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 658x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6\text{ нс/м}$.

Вариант №65



Диаметры дисков: $D_1 = 150\text{мм}$, $D_2 = 174\text{мм}$, $D_3 = 100\text{мм}$, $D_4 = 136\text{мм}$, $D_5 = 198\text{мм}$, $D_6 = 126\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 17\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 16\text{мм}$, $H_5 = 19\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

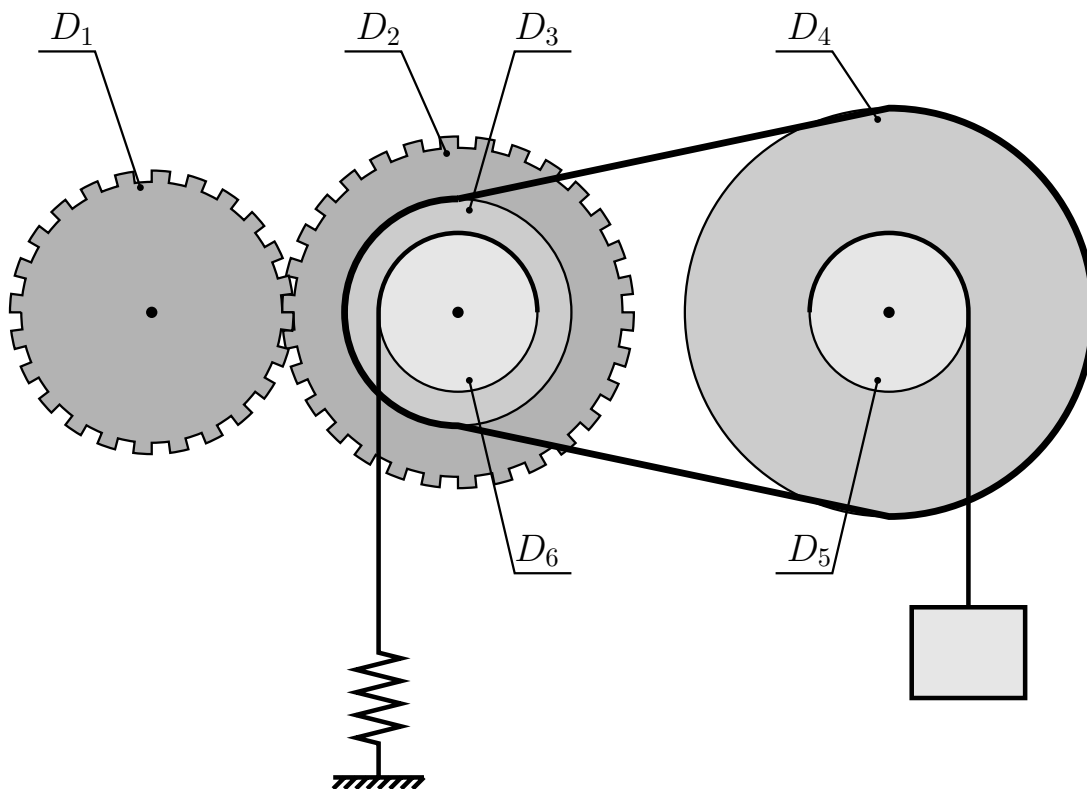
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 313x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.2\text{ нс/м}$.

Вариант №66



Диаметры дисков: $D_1 = 126\text{мм}$, $D_2 = 162\text{мм}$, $D_3 = 124\text{мм}$, $D_4 = 186\text{мм}$, $D_5 = 176\text{мм}$, $D_6 = 166\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 13\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 9\text{мм}$, $H_4 = 18\text{мм}$, $H_5 = 6\text{мм}$, $H_6 = 6\text{мм}$.

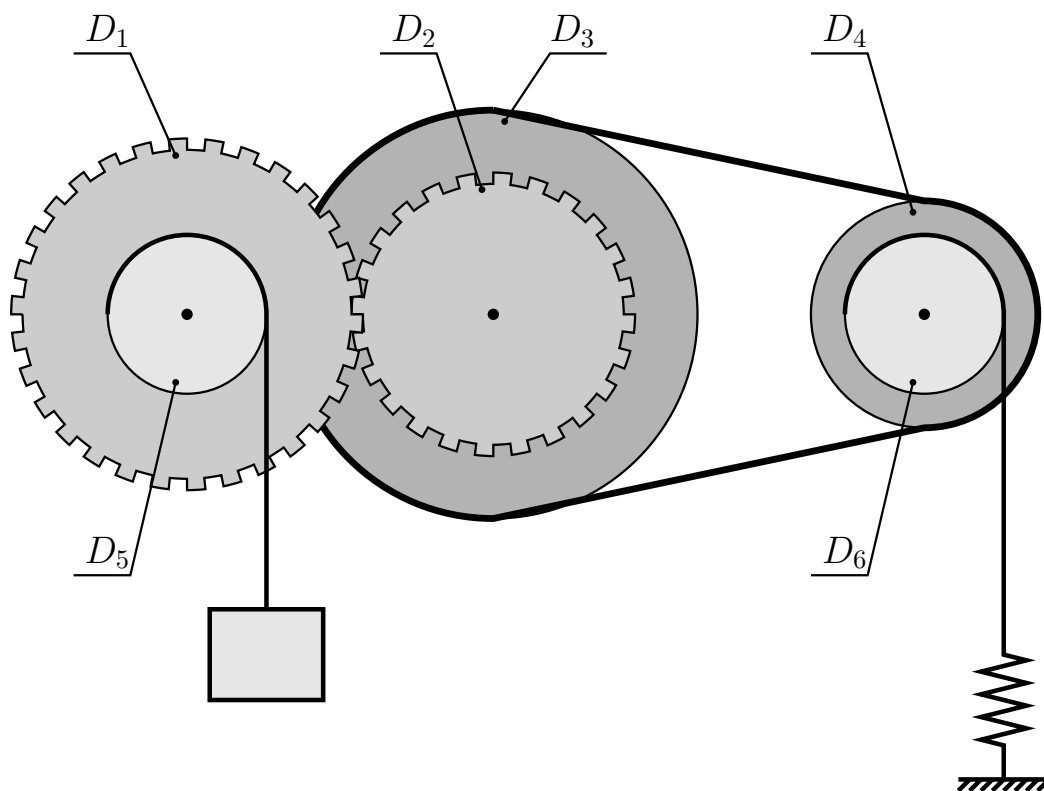
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 627x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.6\text{ нс/м}$.

Вариант №67



Диаметры дисков: $D_1 = 164\text{мм}$, $D_2 = 162\text{мм}$, $D_3 = 186\text{мм}$, $D_4 = 134\text{мм}$, $D_5 = 150\text{мм}$, $D_6 = 156\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 13\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 8\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 8\text{мм}$.

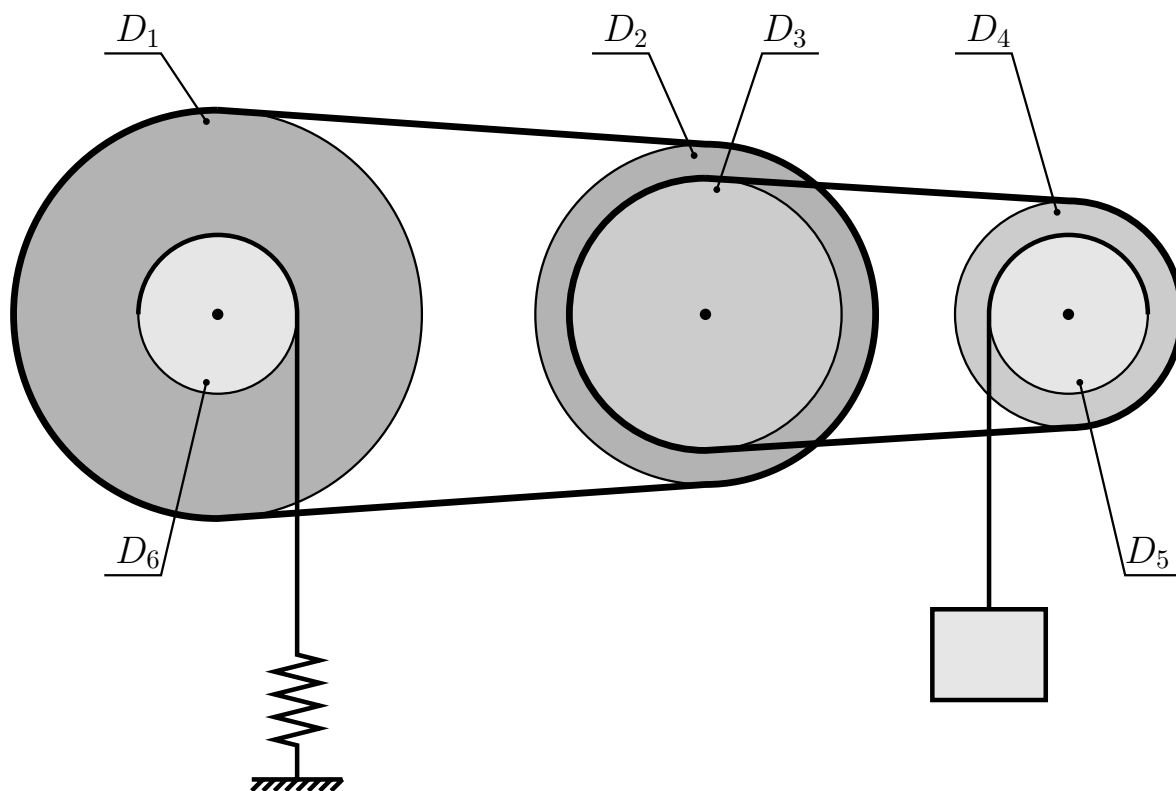
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 858x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.8\text{нс/м}$.

Вариант №68



Диаметры дисков: $D_1 = 146\text{мм}$, $D_2 = 144\text{мм}$, $D_3 = 128\text{мм}$, $D_4 = 124\text{мм}$, $D_5 = 124\text{мм}$, $D_6 = 142\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 10\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 14\text{мм}$, $H_5 = 10\text{мм}$, $H_6 = 10\text{мм}$.

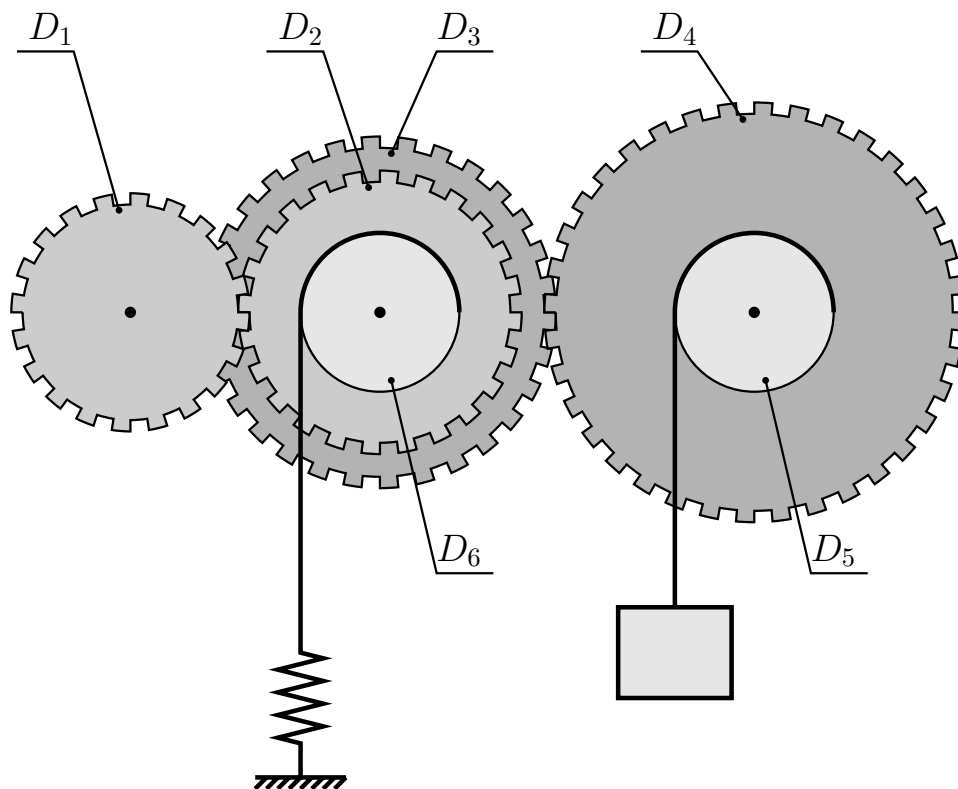
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 124x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.4\text{ нс/м}$.

Вариант №69



Диаметры дисков: $D_1 = 114\text{мм}$, $D_2 = 126\text{мм}$, $D_3 = 128\text{мм}$, $D_4 = 176\text{мм}$, $D_5 = 110\text{мм}$, $D_6 = 128\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 20\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 7\text{мм}$, $H_6 = 17\text{мм}$.

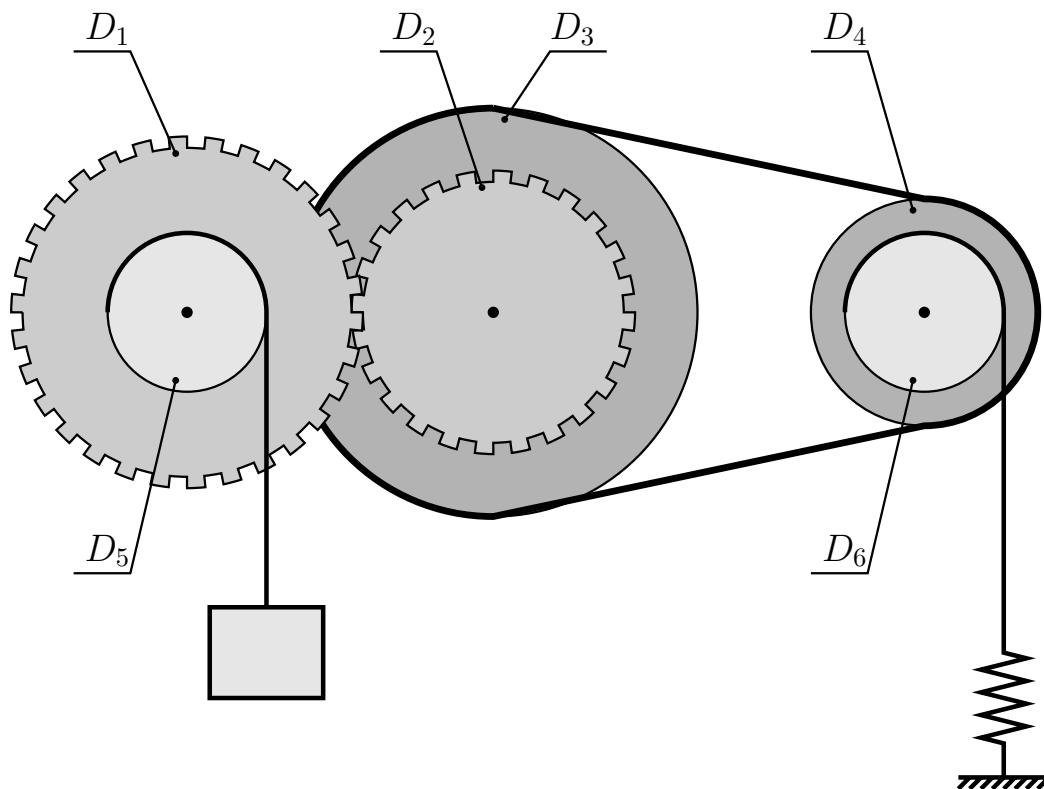
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 244x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.2\text{ нс/м}$.

Вариант №70



Диаметры дисков: $D_1 = 178\text{мм}$, $D_2 = 174\text{мм}$, $D_3 = 200\text{мм}$, $D_4 = 168\text{мм}$, $D_5 = 112\text{мм}$, $D_6 = 142\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 16\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 14\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

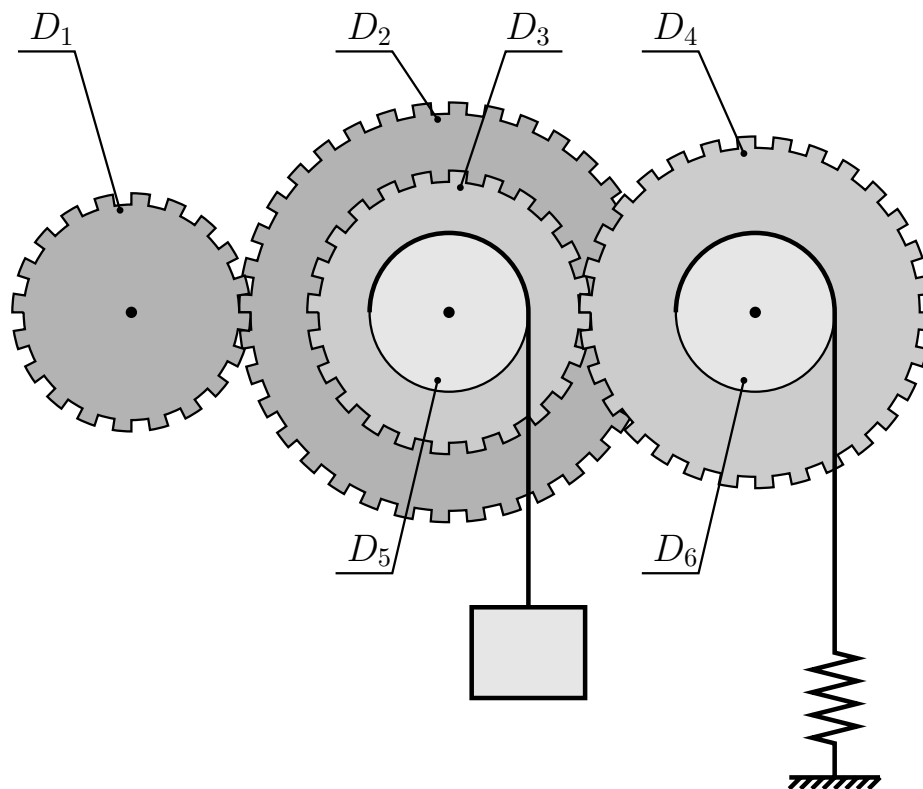
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 549x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.2\text{ нс/м}$.

Вариант №71



Диаметры дисков: $D_1 = 132\text{мм}$, $D_2 = 192\text{мм}$, $D_3 = 136\text{мм}$, $D_4 = 180\text{мм}$, $D_5 = 184\text{мм}$, $D_6 = 124\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 19\text{мм}$, $H_2 = 19\text{мм}$, $H_3 = 9\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 14\text{мм}$, $H_6 = 20\text{мм}$.

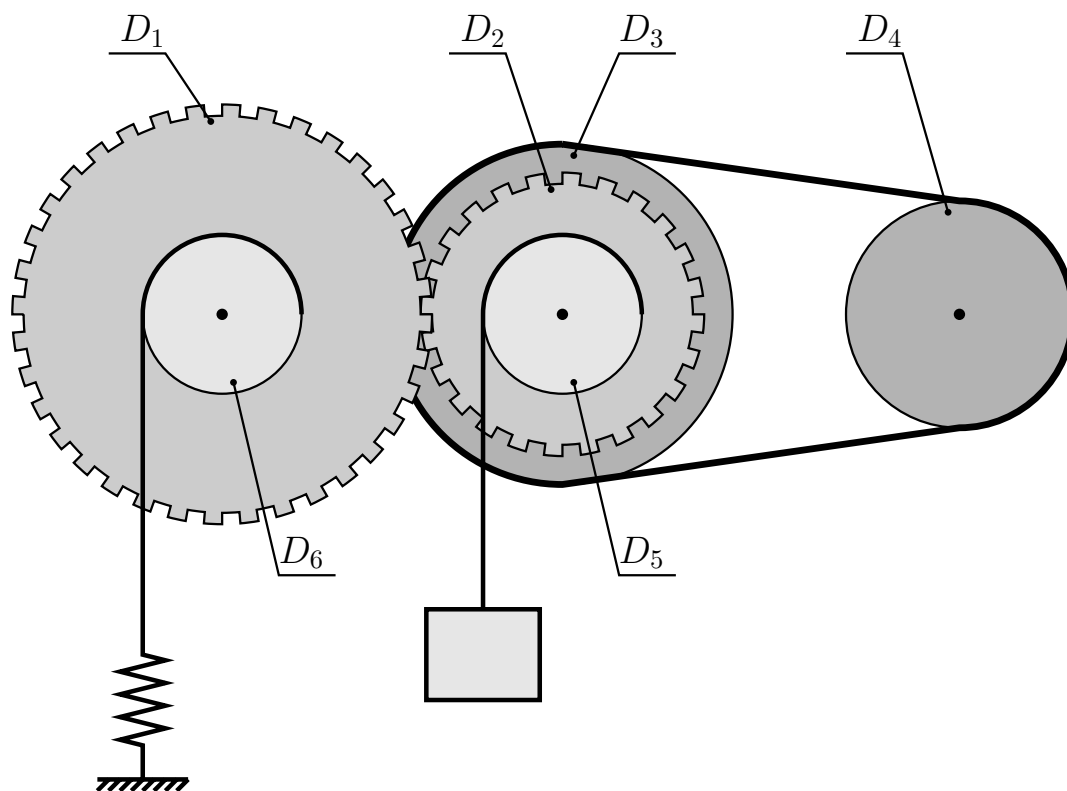
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 115x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.6\text{ нс/м}$.

Вариант №72



Диаметры дисков: $D_1 = 174\text{мм}$, $D_2 = 128\text{мм}$, $D_3 = 142\text{мм}$, $D_4 = 112\text{мм}$, $D_5 = 186\text{мм}$, $D_6 = 182\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 17\text{мм}$, $H_2 = 11\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 12\text{мм}$.

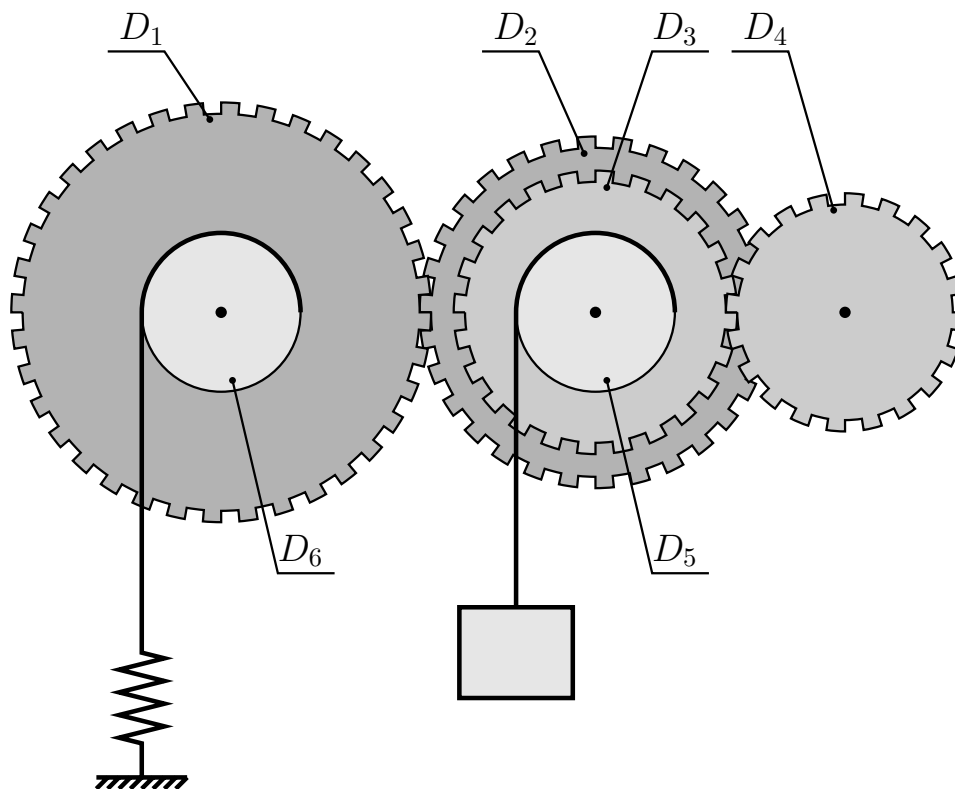
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 890x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.8\text{нс/м}$.

Вариант №73



Диаметры дисков: $D_1 = 188\text{мм}$, $D_2 = 152\text{мм}$, $D_3 = 140\text{мм}$, $D_4 = 102\text{мм}$, $D_5 = 134\text{мм}$, $D_6 = 130\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 19\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 20\text{мм}$, $H_4 = 10\text{мм}$, $H_5 = 12\text{мм}$, $H_6 = 10\text{мм}$.

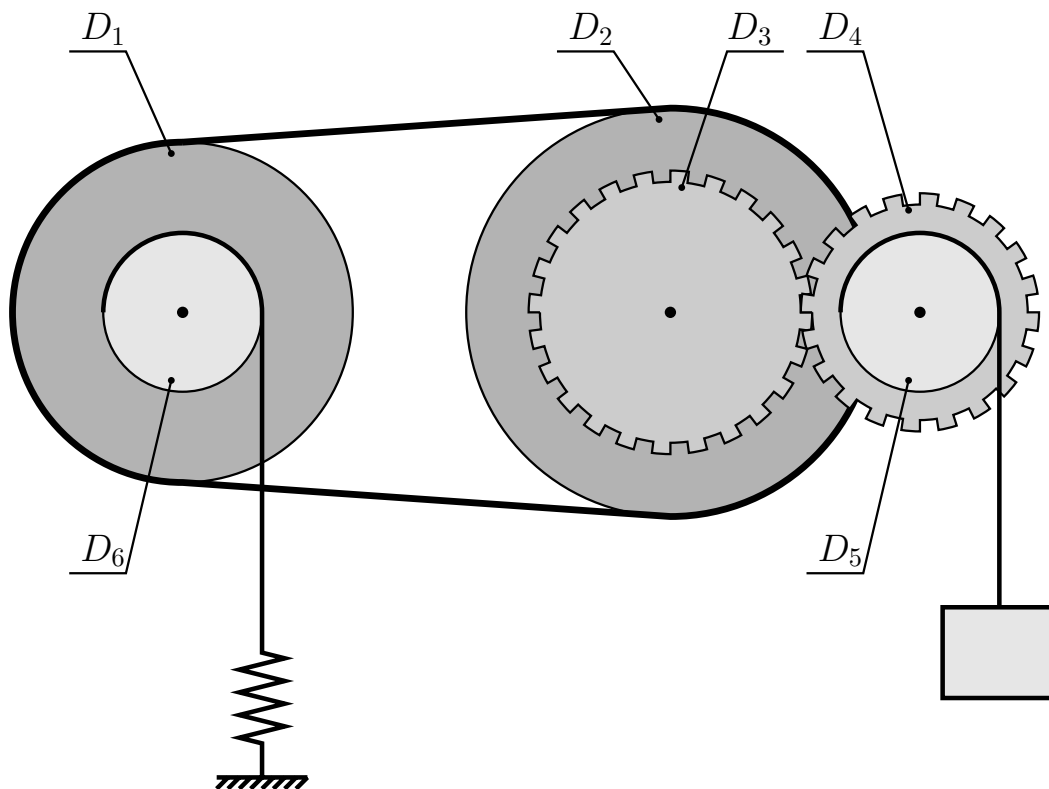
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 103x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.2\text{ нс/м}$.

Вариант №74



Диаметры дисков: $D_1 = 172\text{мм}$, $D_2 = 196\text{мм}$, $D_3 = 166\text{мм}$, $D_4 = 158\text{мм}$, $D_5 = 148\text{мм}$, $D_6 = 178\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 18\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 20\text{мм}$, $H_4 = 16\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 18\text{мм}$.

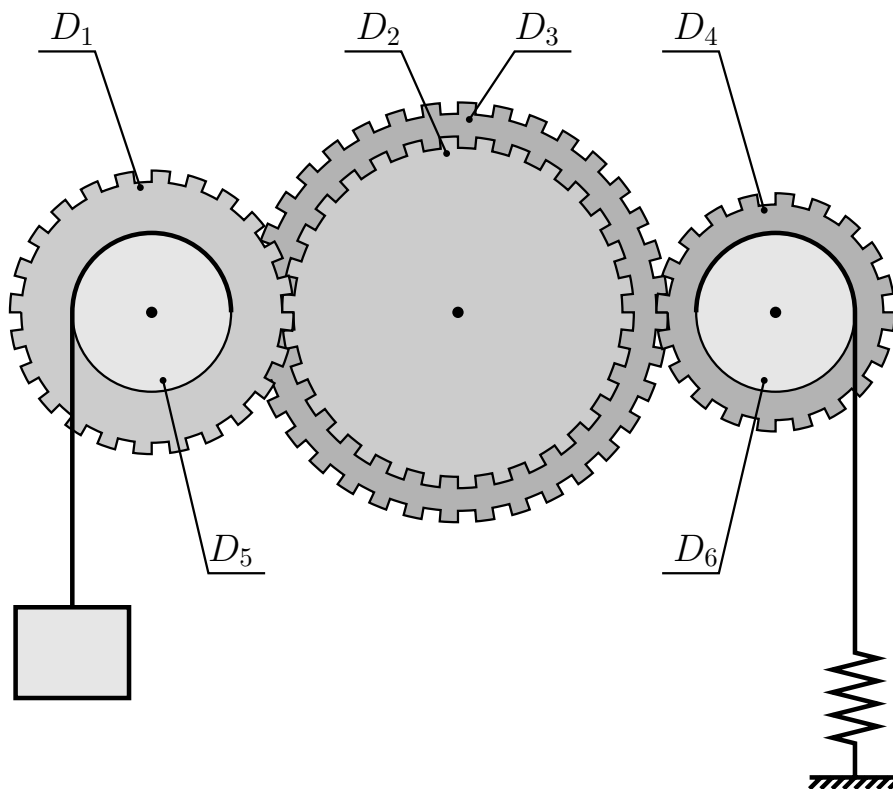
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 916x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{ нс/м}$.

Вариант №75



Диаметры дисков: $D_1 = 140\text{мм}$, $D_2 = 148\text{мм}$, $D_3 = 154\text{мм}$, $D_4 = 102\text{мм}$, $D_5 = 122\text{мм}$, $D_6 = 126\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 20\text{мм}$, $H_2 = 17\text{мм}$, $H_3 = 10\text{мм}$, $H_4 = 12\text{мм}$, $H_5 = 11\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

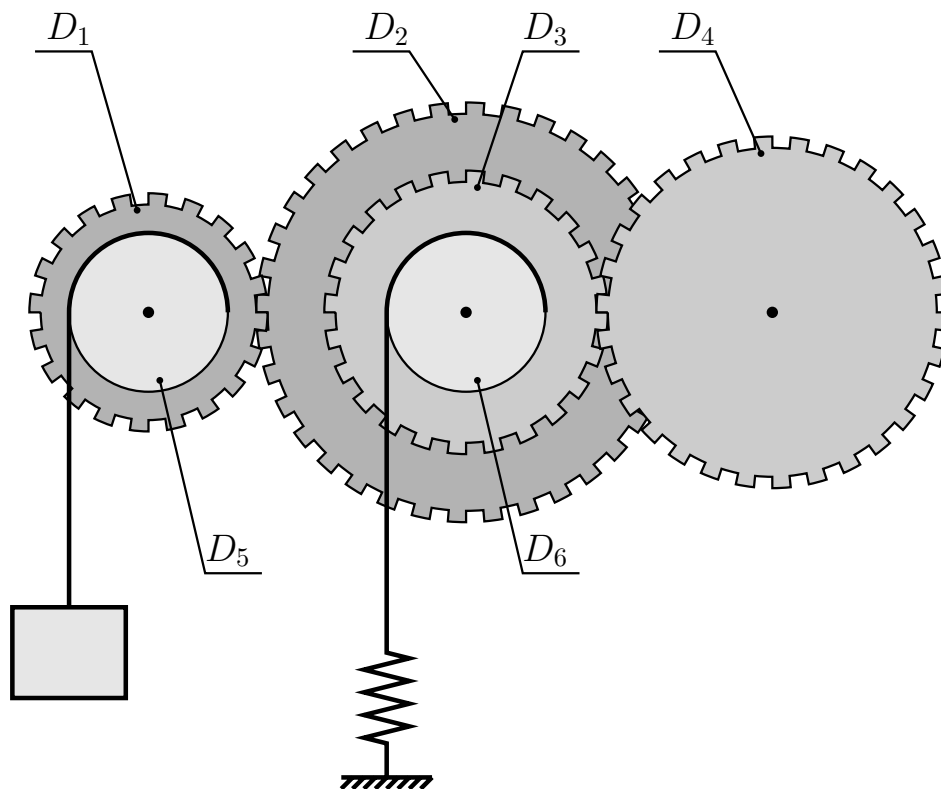
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 193x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6$ нс/м.

Вариант №76



Диаметры дисков: $D_1 = 112\text{мм}$, $D_2 = 178\text{мм}$, $D_3 = 128\text{мм}$, $D_4 = 168\text{мм}$, $D_5 = 106\text{мм}$, $D_6 = 112\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 11\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 14\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

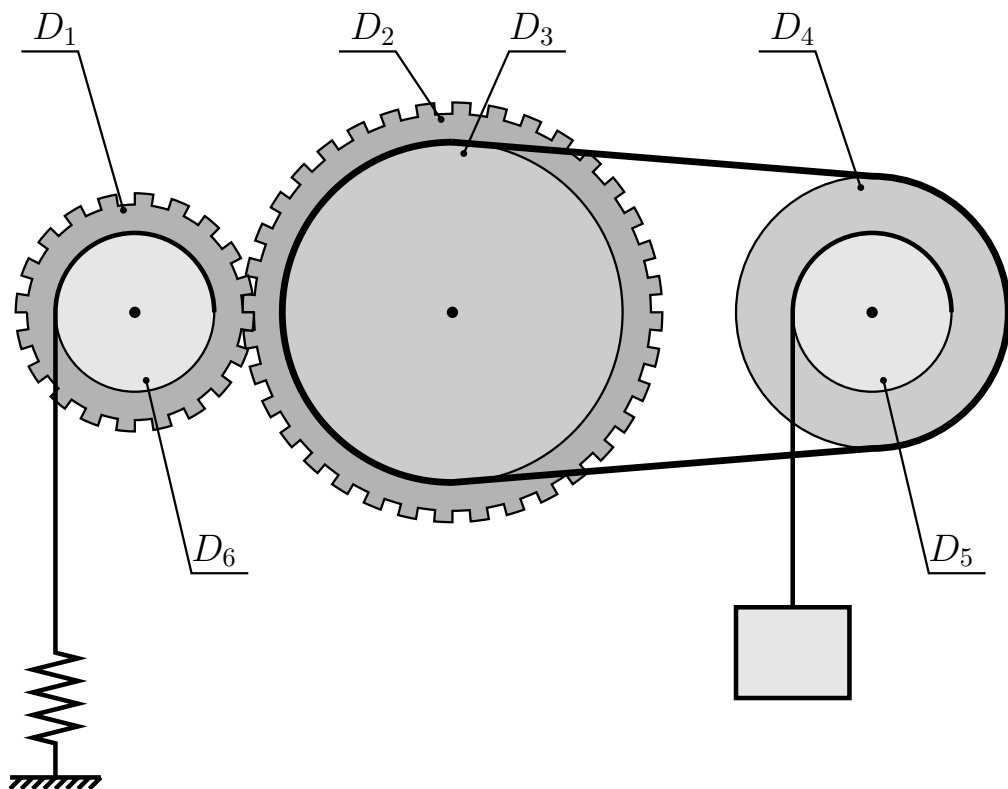
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 505x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.8\text{нс/м}$.

Вариант №77



Диаметры дисков: $D_1 = 104\text{мм}$, $D_2 = 180\text{мм}$, $D_3 = 162\text{мм}$, $D_4 = 154\text{мм}$, $D_5 = 166\text{мм}$, $D_6 = 200\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 8\text{мм}$, $H_3 = 19\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 8\text{мм}$.

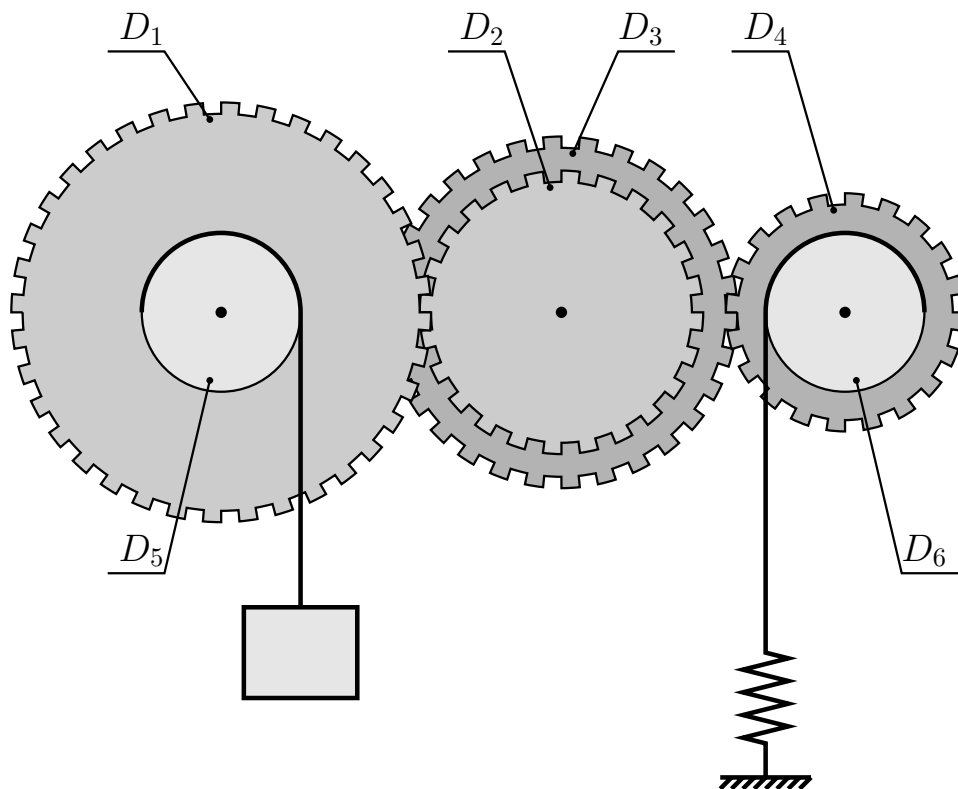
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 957x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.6\text{ нс/м}$.

Вариант №78



Диаметры дисков: $D_1 = 174\text{мм}$, $D_2 = 112\text{мм}$, $D_3 = 140\text{мм}$, $D_4 = 106\text{мм}$, $D_5 = 130\text{мм}$, $D_6 = 110\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 20\text{мм}$, $H_3 = 15\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 5\text{мм}$, $H_6 = 6\text{мм}$.

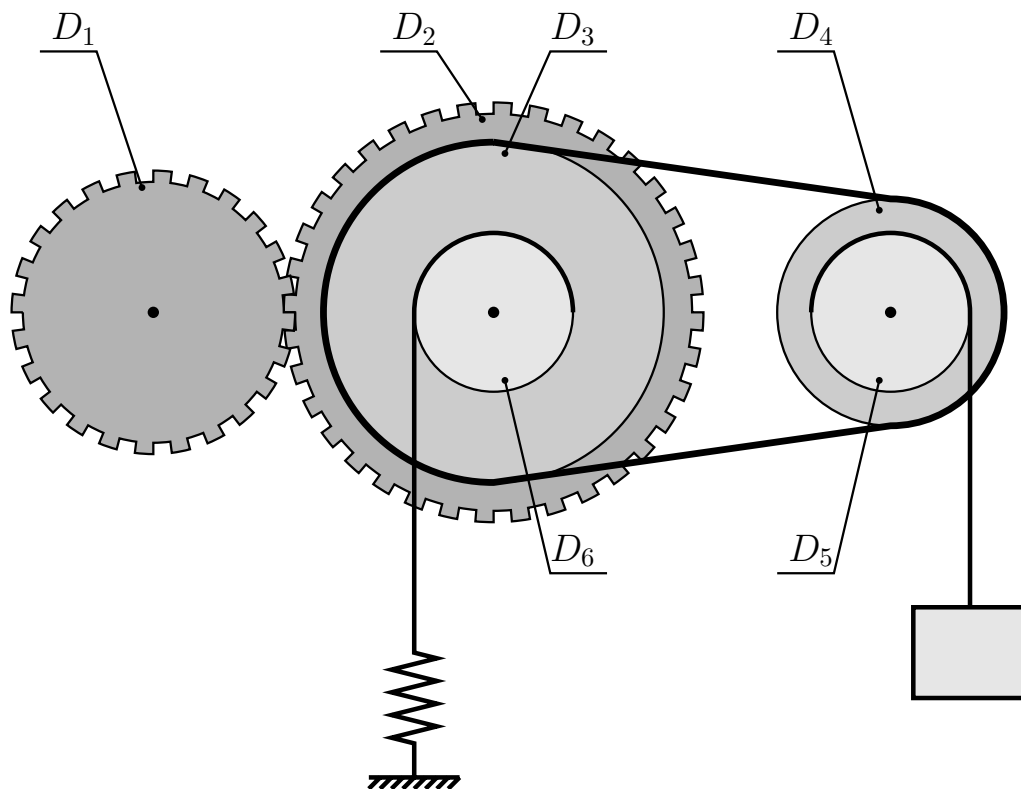
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 285x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.6\text{ нс/м}$.

Вариант №79



Диаметры дисков: $D_1 = 128\text{мм}$, $D_2 = 188\text{мм}$, $D_3 = 168\text{мм}$, $D_4 = 116\text{мм}$, $D_5 = 132\text{мм}$, $D_6 = 142\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 8\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 16\text{мм}$, $H_6 = 12\text{мм}$.

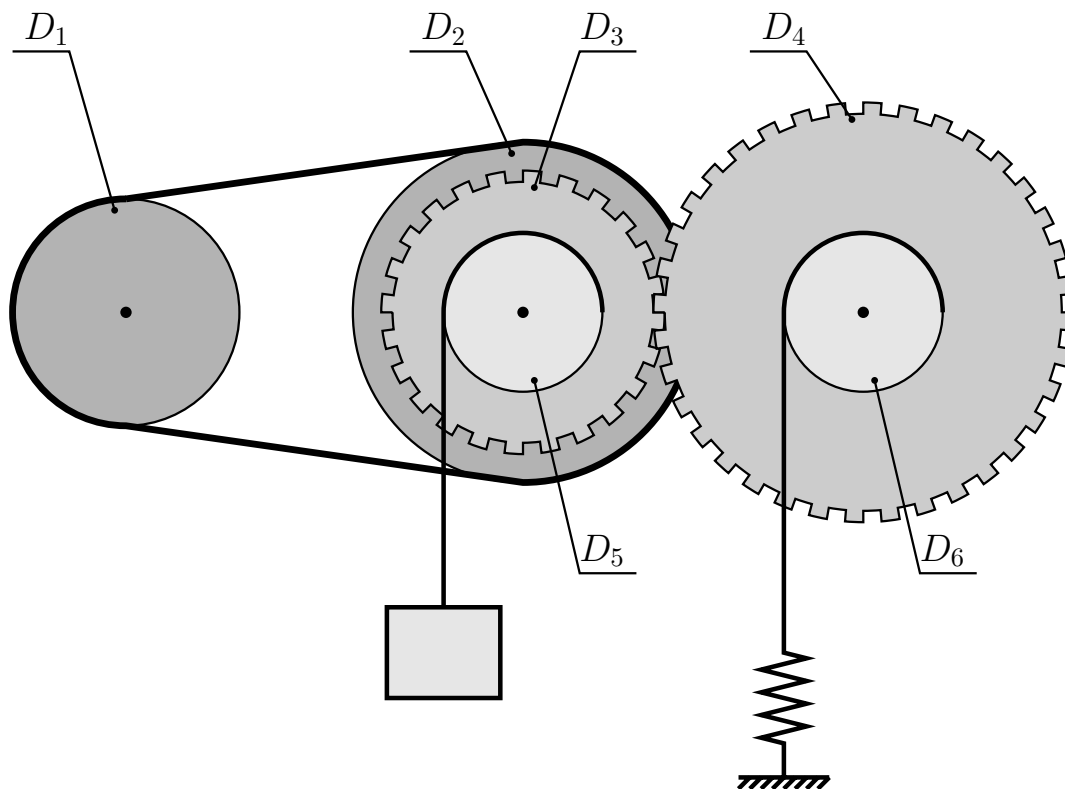
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 827x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.8\text{нс/м}$.

Вариант №80



Диаметры дисков: $D_1 = 130\text{мм}$, $D_2 = 174\text{мм}$, $D_3 = 152\text{мм}$, $D_4 = 186\text{мм}$, $D_5 = 122\text{мм}$, $D_6 = 146\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 12\text{мм}$, $H_2 = 5\text{мм}$, $H_3 = 10\text{мм}$, $H_4 = 14\text{мм}$, $H_5 = 17\text{мм}$, $H_6 = 18\text{мм}$.

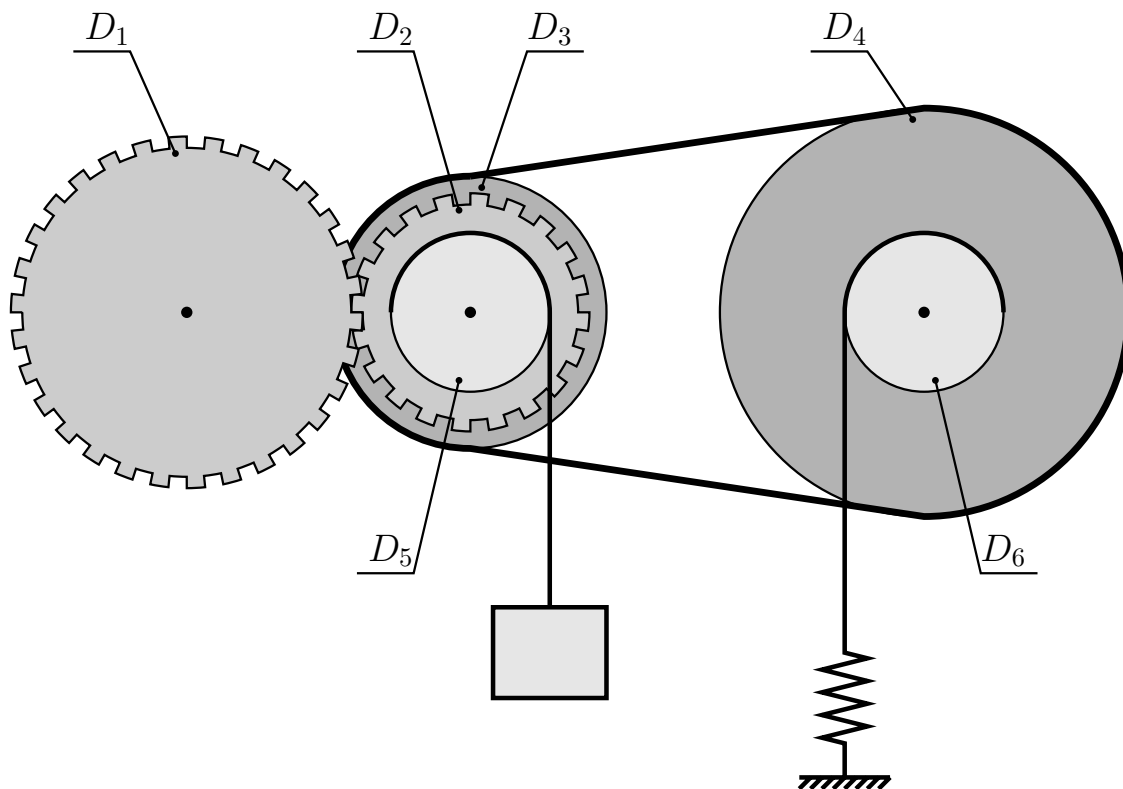
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 602x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6\text{ нс/м}$.

Вариант №81



Диаметры дисков: $D_1 = 148\text{мм}$, $D_2 = 136\text{мм}$, $D_3 = 140\text{мм}$, $D_4 = 172\text{мм}$, $D_5 = 192\text{мм}$, $D_6 = 146\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 8\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 7\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

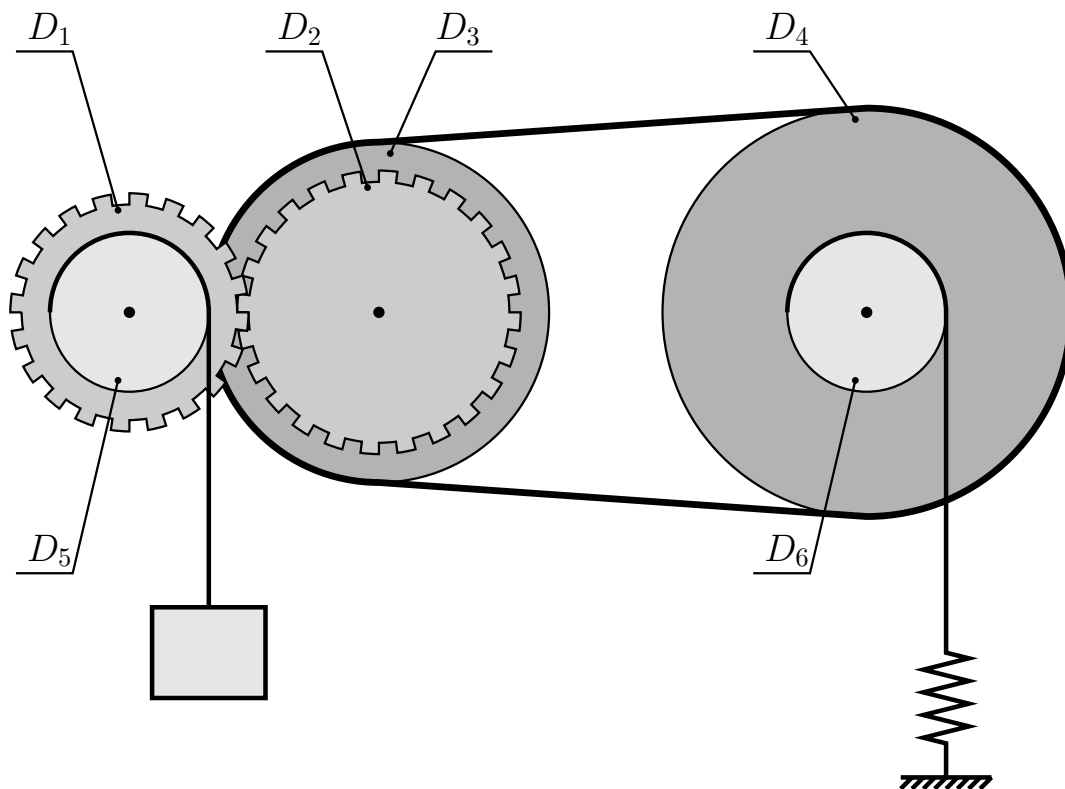
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 749x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{ нс/м}$.

Вариант №82



Диаметры дисков: $D_1 = 108\text{мм}$, $D_2 = 136\text{мм}$, $D_3 = 140\text{мм}$, $D_4 = 140\text{мм}$, $D_5 = 140\text{мм}$, $D_6 = 190\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 12\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 10\text{мм}$.

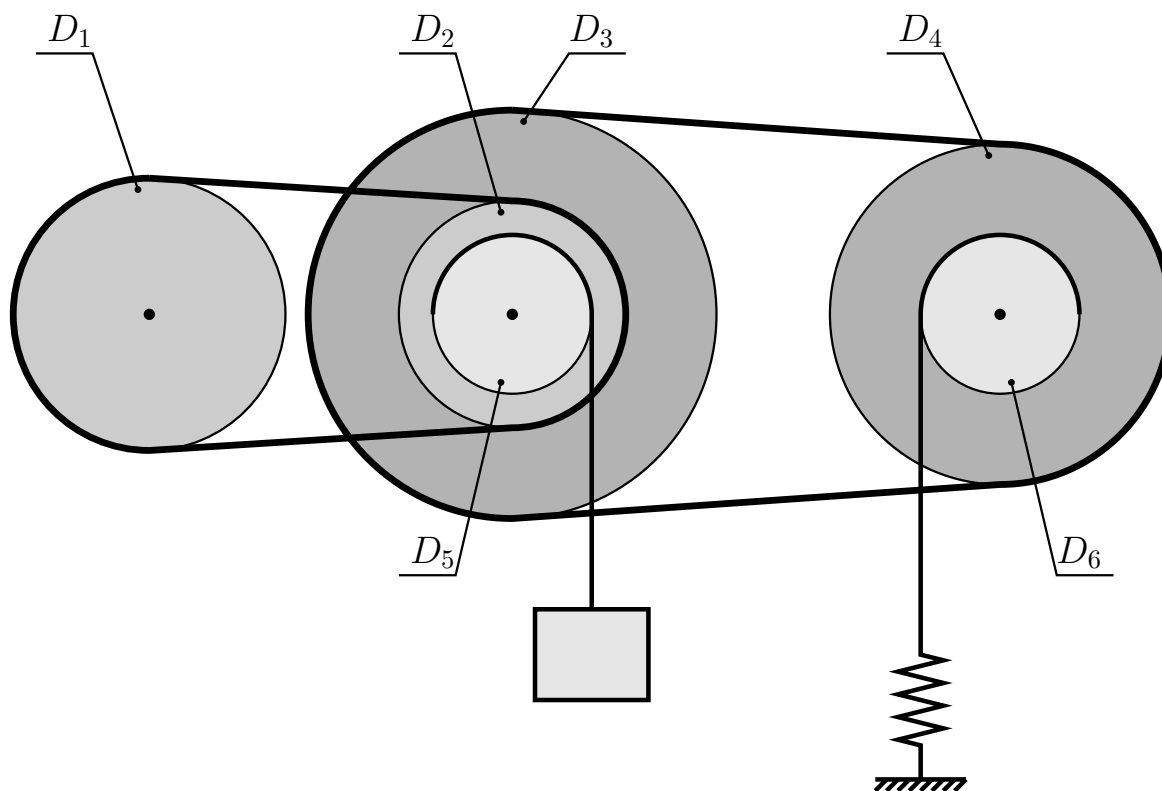
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 397x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6\text{ нс/м}$.

Вариант №83



Диаметры дисков: $D_1 = 138\text{мм}$, $D_2 = 136\text{мм}$, $D_3 = 194\text{мм}$, $D_4 = 164\text{мм}$, $D_5 = 130\text{мм}$, $D_6 = 158\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 7\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 18\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 5\text{мм}$.

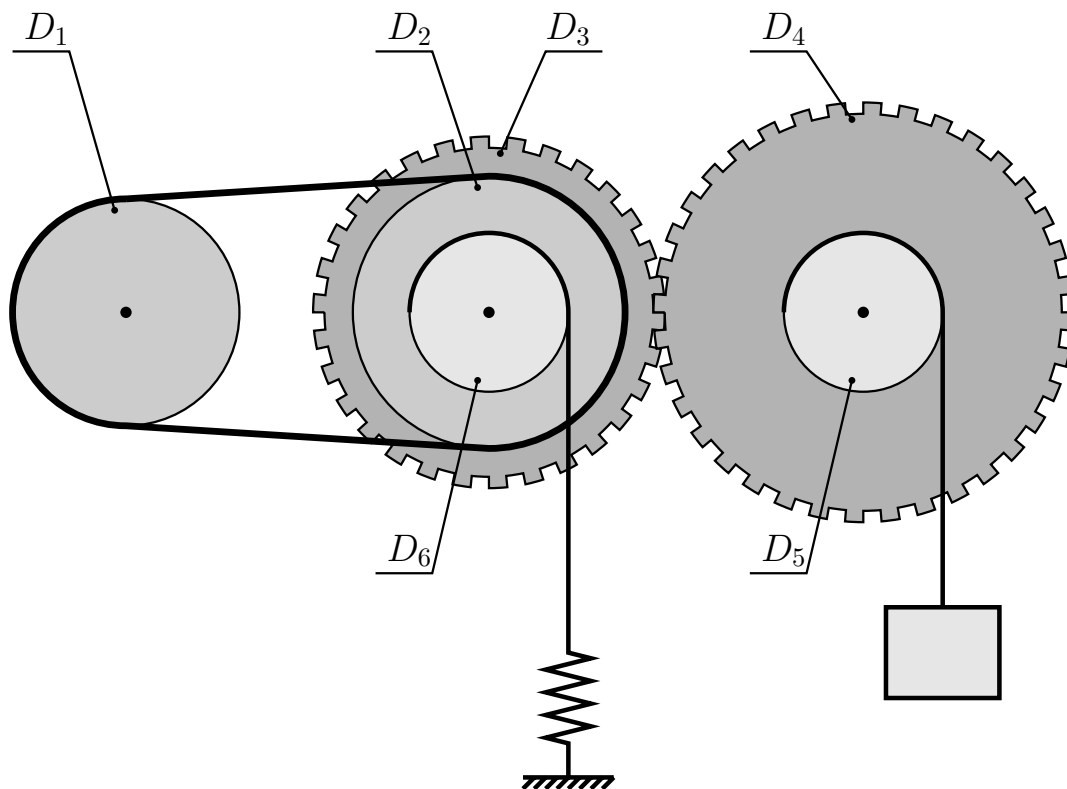
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 702x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.2\text{ нс/м}$.

Вариант №84



Диаметры дисков: $D_1 = 108\text{мм}$, $D_2 = 124\text{мм}$, $D_3 = 174\text{мм}$, $D_4 = 180\text{мм}$, $D_5 = 156\text{мм}$, $D_6 = 178\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 6\text{мм}$, $H_2 = 19\text{мм}$, $H_3 = 7\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 5\text{мм}$.

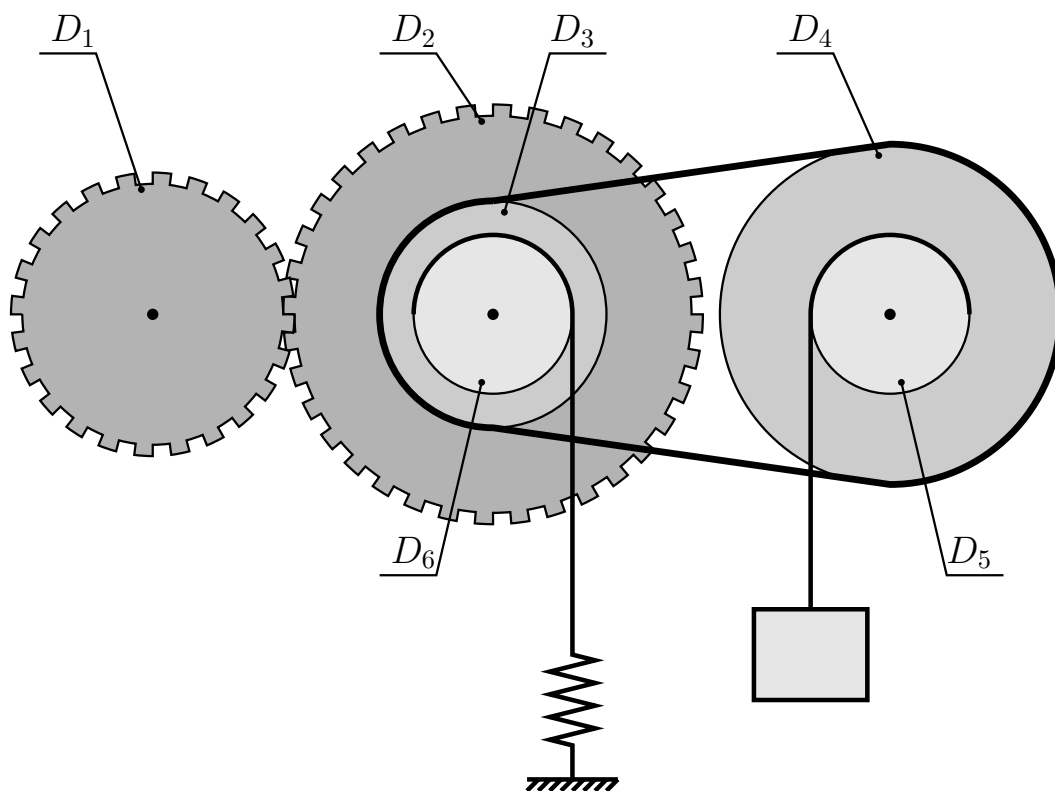
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 844x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{ нс/м}$.

Вариант №85



Диаметры дисков: $D_1 = 154\text{мм}$, $D_2 = 174\text{мм}$, $D_3 = 108\text{мм}$, $D_4 = 170\text{мм}$, $D_5 = 104\text{мм}$, $D_6 = 198\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 15\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 12\text{мм}$, $H_4 = 5\text{мм}$, $H_5 = 11\text{мм}$, $H_6 = 14\text{мм}$.

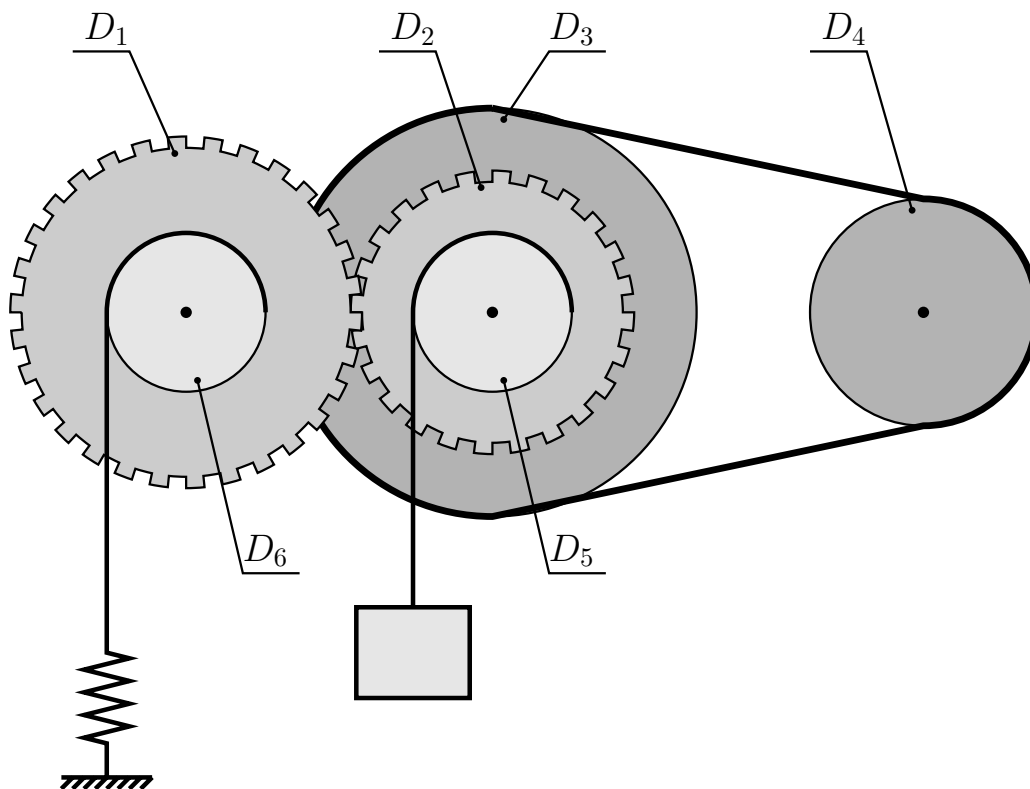
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 361x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.8\text{ нс/м}$.

Вариант №86



Диаметры дисков: $D_1 = 170\text{мм}$, $D_2 = 156\text{мм}$, $D_3 = 188\text{мм}$, $D_4 = 118\text{мм}$, $D_5 = 188\text{мм}$, $D_6 = 166\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 7\text{мм}$, $H_2 = 8\text{мм}$, $H_3 = 13\text{мм}$, $H_4 = 8\text{мм}$, $H_5 = 18\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

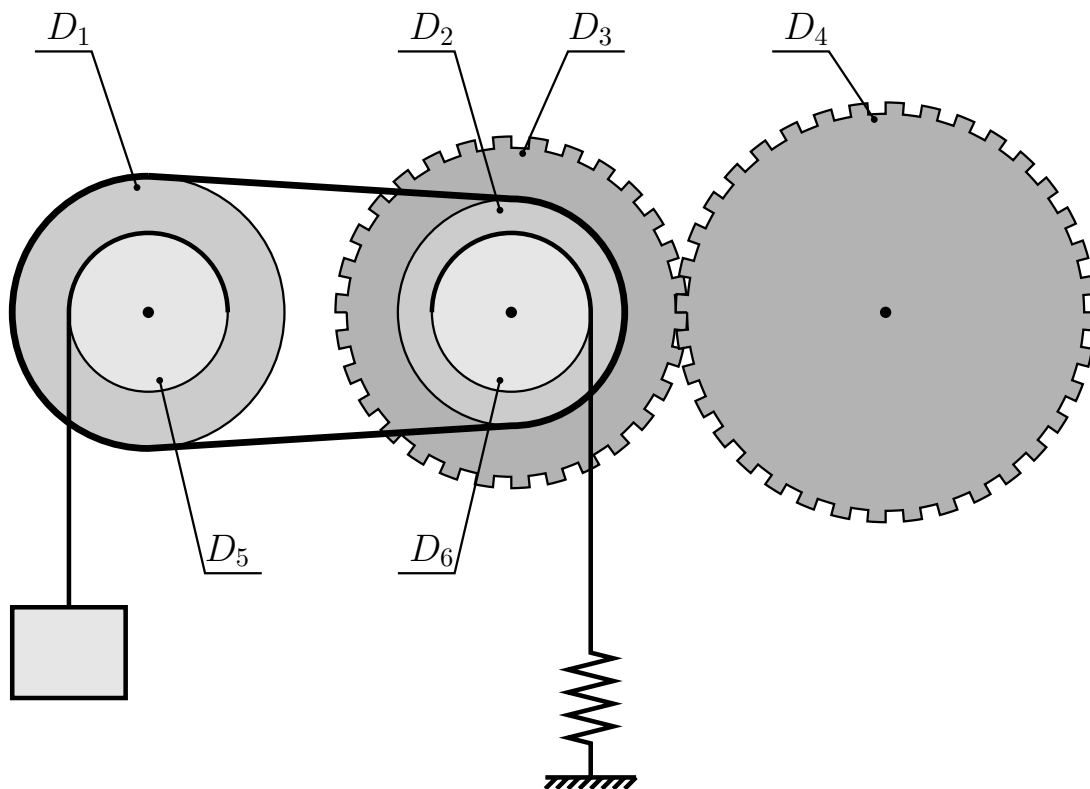
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 331x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.4\text{нс/м}$.

Вариант №87



Диаметры дисков: $D_1 = 132\text{мм}$, $D_2 = 120\text{мм}$, $D_3 = 174\text{мм}$, $D_4 = 188\text{мм}$, $D_5 = 194\text{мм}$, $D_6 = 124\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 6\text{мм}$, $H_2 = 5\text{мм}$, $H_3 = 15\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 12\text{мм}$, $H_6 = 7\text{мм}$.

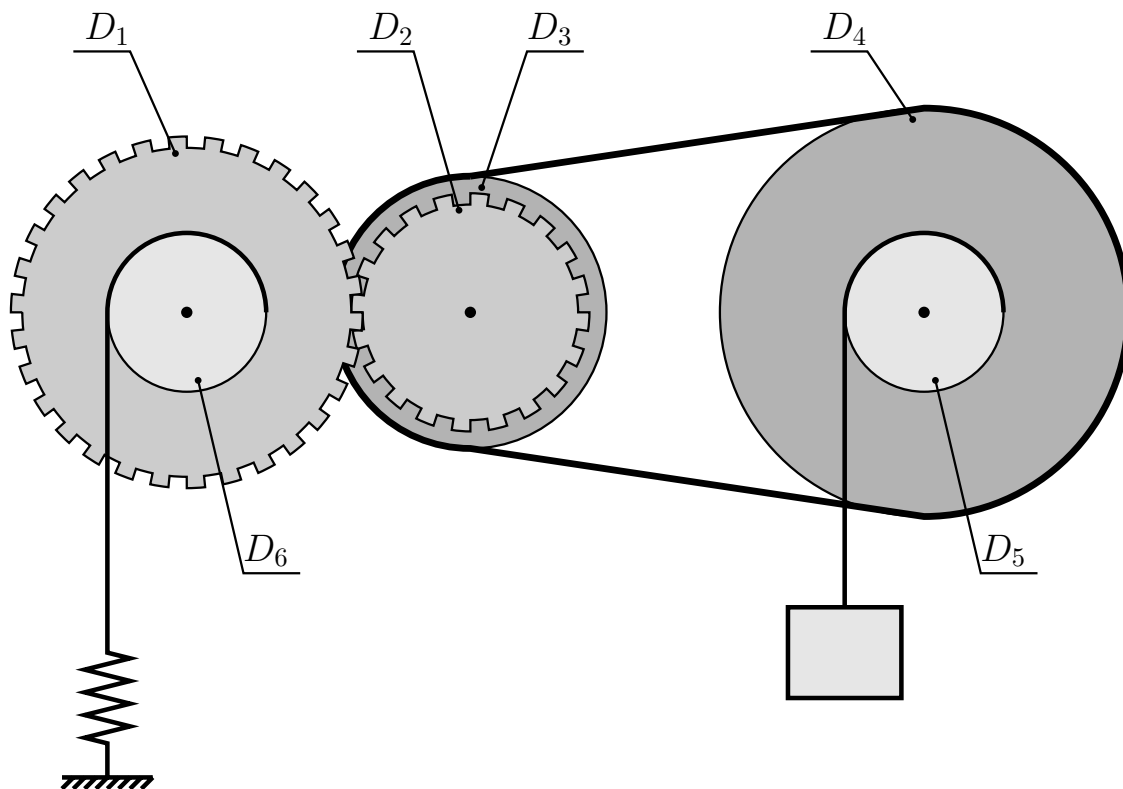
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 562x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{нс/м}$.

Вариант №88



Диаметры дисков: $D_1 = 170\text{мм}$, $D_2 = 154\text{мм}$, $D_3 = 168\text{мм}$, $D_4 = 182\text{мм}$, $D_5 = 152\text{мм}$, $D_6 = 192\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 8\text{мм}$, $H_2 = 7\text{мм}$, $H_3 = 16\text{мм}$, $H_4 = 13\text{мм}$, $H_5 = 6\text{мм}$, $H_6 = 16\text{мм}$.

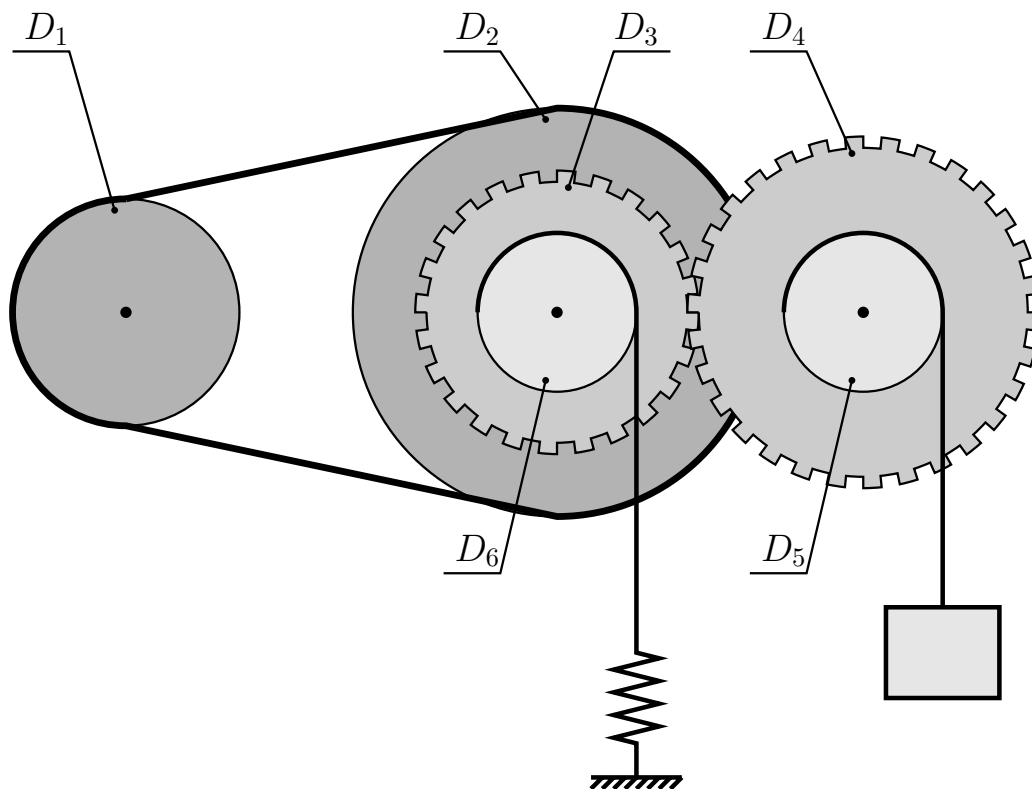
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 316x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.8\text{нс/м}$.

Вариант №89



Диаметры дисков: $D_1 = 132\text{мм}$, $D_2 = 182\text{мм}$, $D_3 = 142\text{мм}$, $D_4 = 142\text{мм}$, $D_5 = 198\text{мм}$, $D_6 = 160\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 12\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 10\text{мм}$, $H_4 = 8\text{мм}$, $H_5 = 15\text{мм}$, $H_6 = 17\text{мм}$.

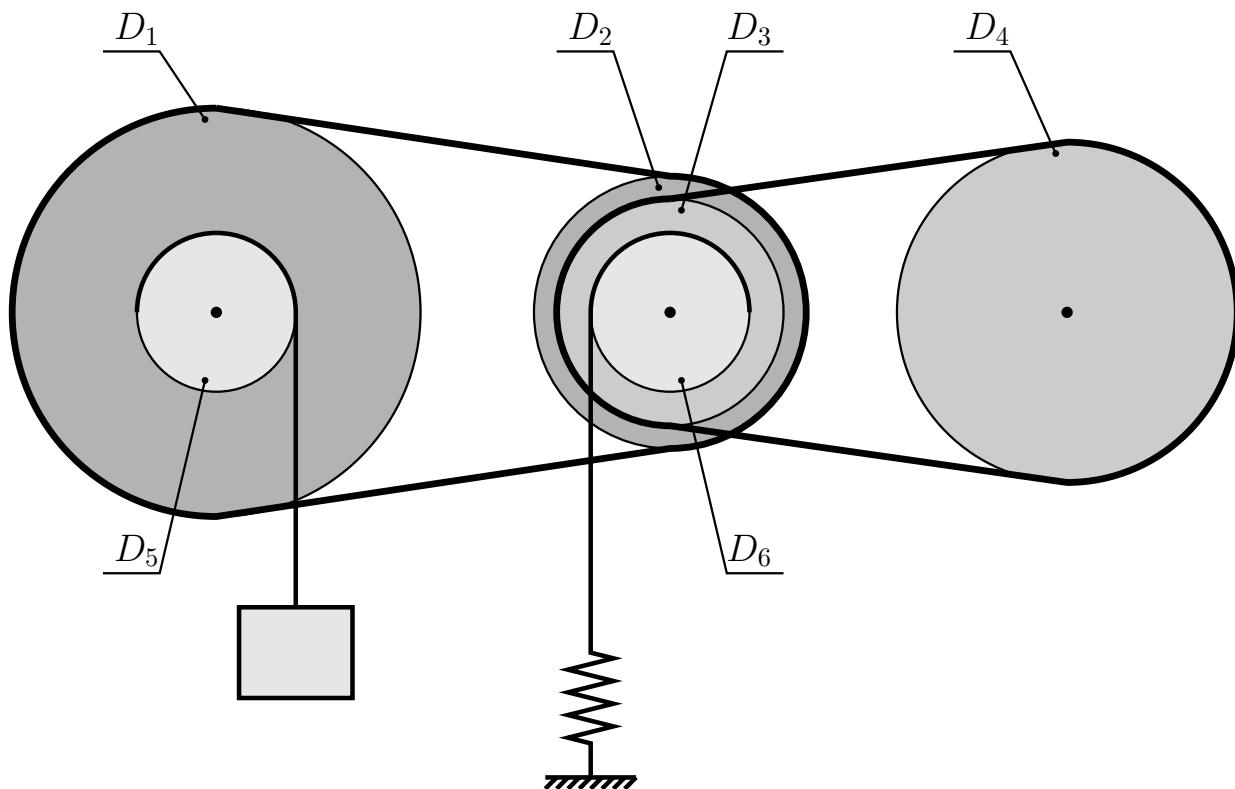
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 582x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.6\text{ нс/м}$.

Вариант №90



Диаметры дисков: $D_1 = 200\text{мм}$, $D_2 = 138\text{мм}$, $D_3 = 136\text{мм}$, $D_4 = 170\text{мм}$, $D_5 = 164\text{мм}$, $D_6 = 126\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 14\text{мм}$, $H_2 = 6\text{мм}$, $H_3 = 17\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 6\text{мм}$, $H_6 = 11\text{мм}$.

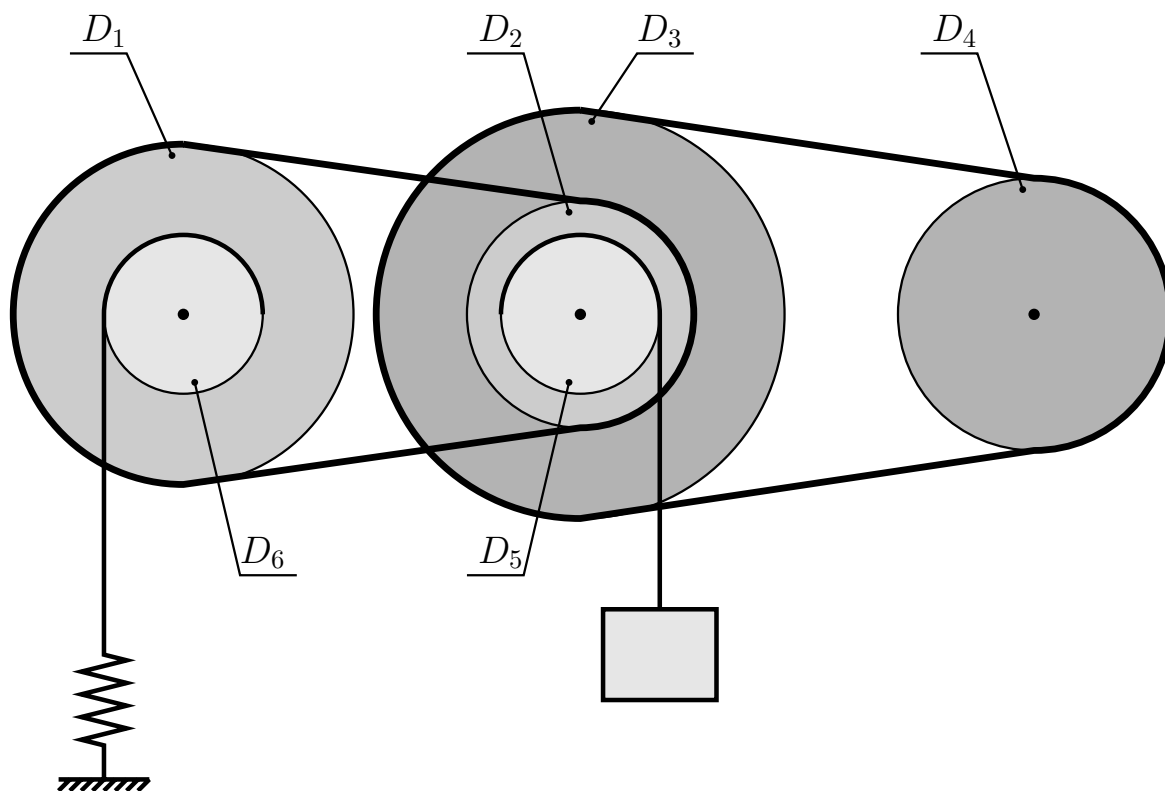
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 4\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 995x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.6 \text{ нс/м}$.

Вариант №91



Диаметры дисков: $D_1 = 174\text{мм}$, $D_2 = 124\text{мм}$, $D_3 = 198\text{мм}$, $D_4 = 126\text{мм}$, $D_5 = 182\text{мм}$, $D_6 = 130\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 11\text{мм}$, $H_2 = 15\text{мм}$, $H_3 = 18\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

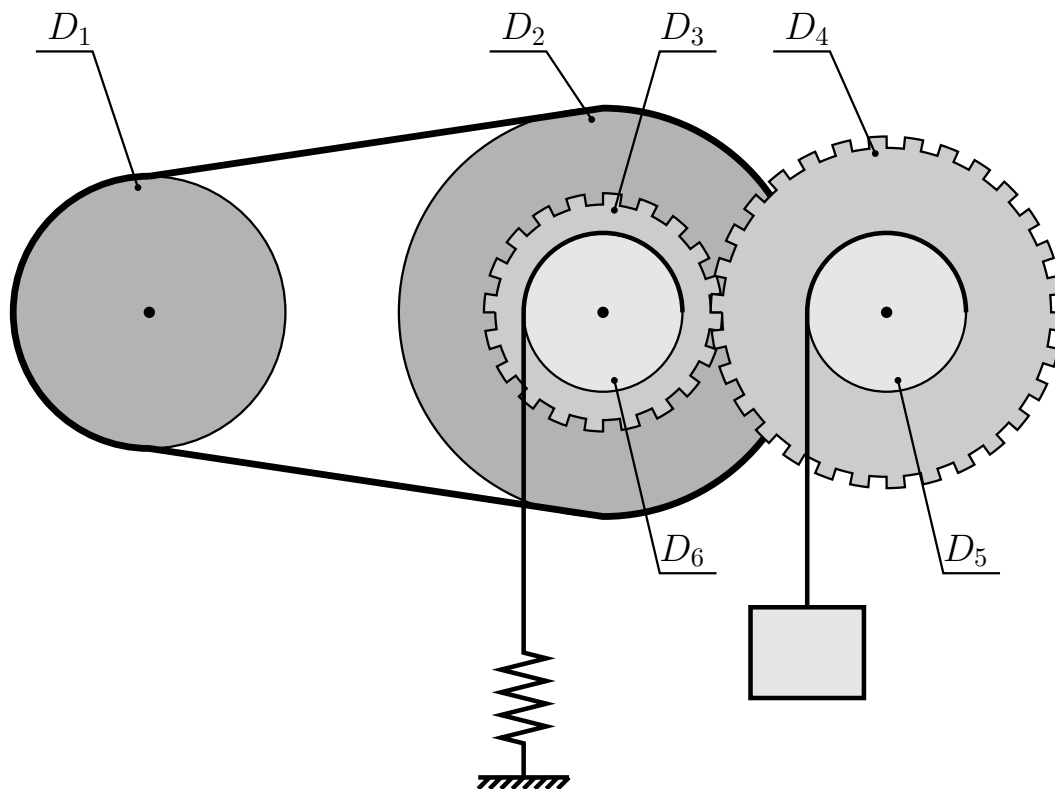
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 147x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.4\text{ нс/м}$.

Вариант №92



Диаметры дисков: $D_1 = 172\text{мм}$, $D_2 = 184\text{мм}$, $D_3 = 132\text{мм}$, $D_4 = 178\text{мм}$, $D_5 = 116\text{мм}$, $D_6 = 120\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 8\text{мм}$, $H_2 = 6\text{мм}$, $H_3 = 6\text{мм}$, $H_4 = 6\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 10\text{мм}$.

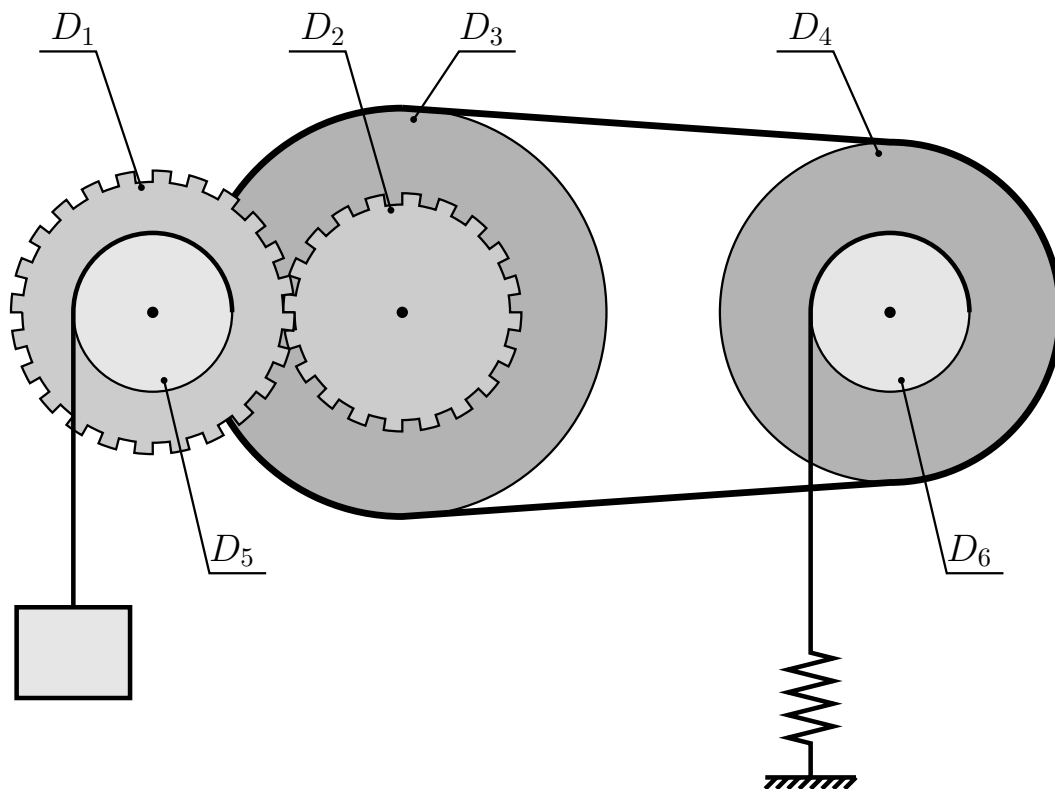
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 645x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 4\text{ нс/м}$.

Вариант №93



Диаметры дисков: $D_1 = 142\text{мм}$, $D_2 = 140\text{мм}$, $D_3 = 184\text{мм}$, $D_4 = 174\text{мм}$, $D_5 = 170\text{мм}$, $D_6 = 190\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 16\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 17\text{мм}$, $H_4 = 5\text{мм}$, $H_5 = 9\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

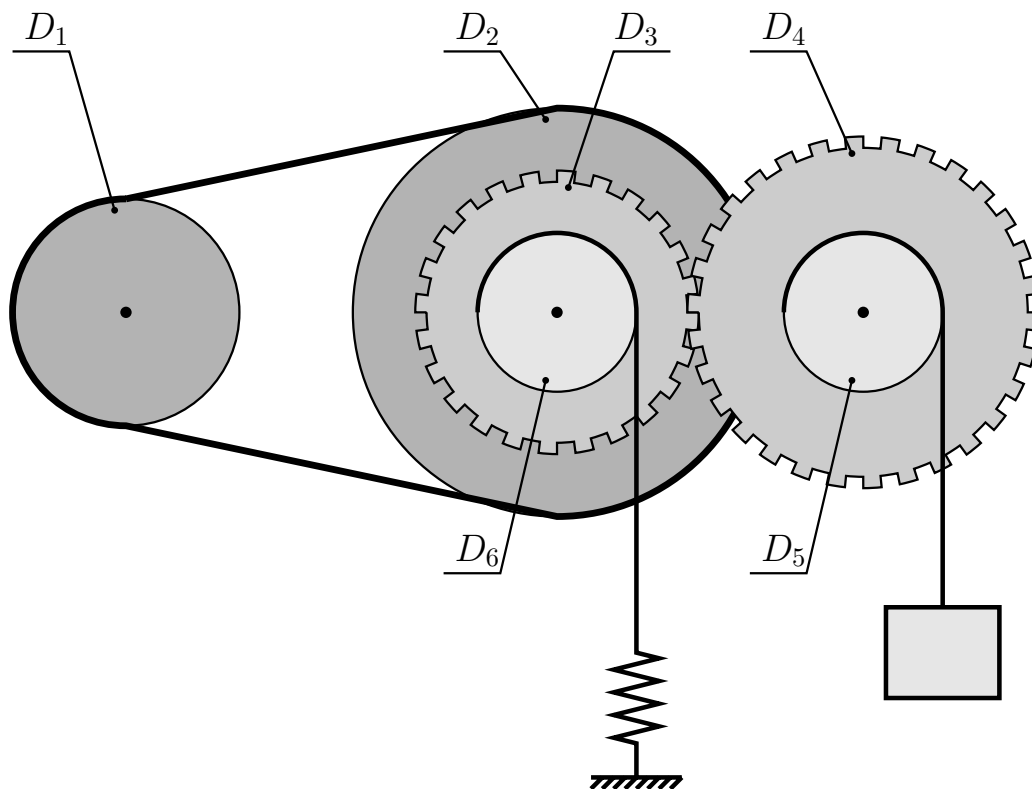
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 300x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3\text{ нс/м}$.

Вариант №94



Диаметры дисков: $D_1 = 102\text{мм}$, $D_2 = 192\text{мм}$, $D_3 = 106\text{мм}$, $D_4 = 176\text{мм}$, $D_5 = 192\text{мм}$, $D_6 = 176\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 11\text{мм}$, $H_2 = 9\text{мм}$, $H_3 = 14\text{мм}$, $H_4 = 9\text{мм}$, $H_5 = 15\text{мм}$, $H_6 = 10\text{мм}$.

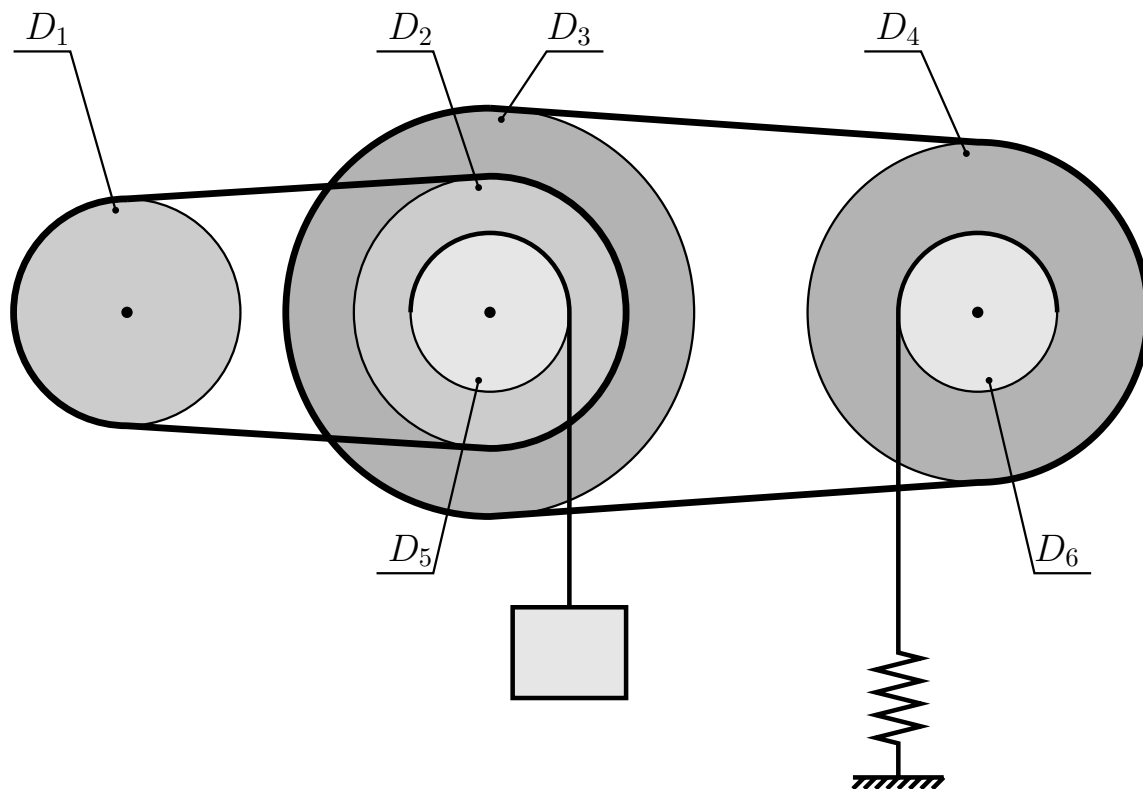
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 282x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 0.8\text{ нс/м}$.

Вариант №95



Диаметры дисков: $D_1 = 116\text{мм}$, $D_2 = 138\text{мм}$, $D_3 = 184\text{мм}$, $D_4 = 164\text{мм}$, $D_5 = 198\text{мм}$, $D_6 = 100\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 16\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 12\text{мм}$, $H_4 = 12\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 16\text{мм}$.

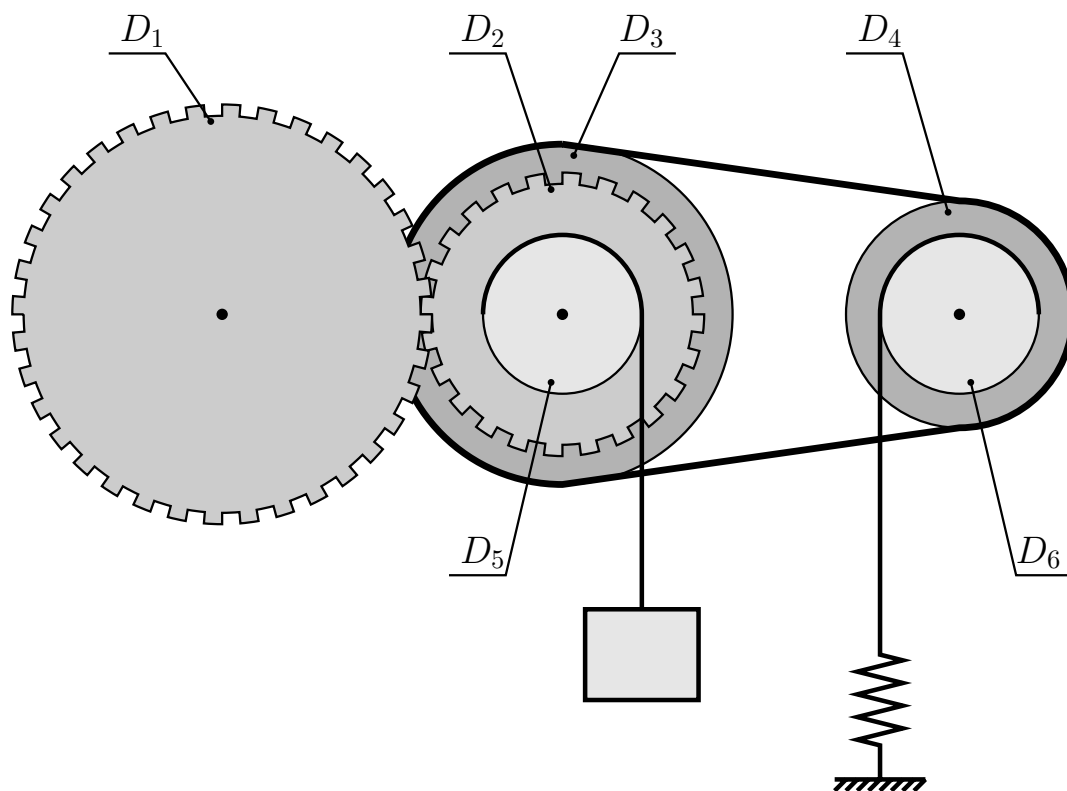
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 506x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.4\text{нс/м}$.

Вариант №96



Диаметры дисков: $D_1 = 200\text{мм}$, $D_2 = 134\text{мм}$, $D_3 = 190\text{мм}$, $D_4 = 104\text{мм}$, $D_5 = 192\text{мм}$, $D_6 = 110\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 5\text{мм}$, $H_2 = 14\text{мм}$, $H_3 = 10\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 20\text{мм}$, $H_6 = 7\text{мм}$.

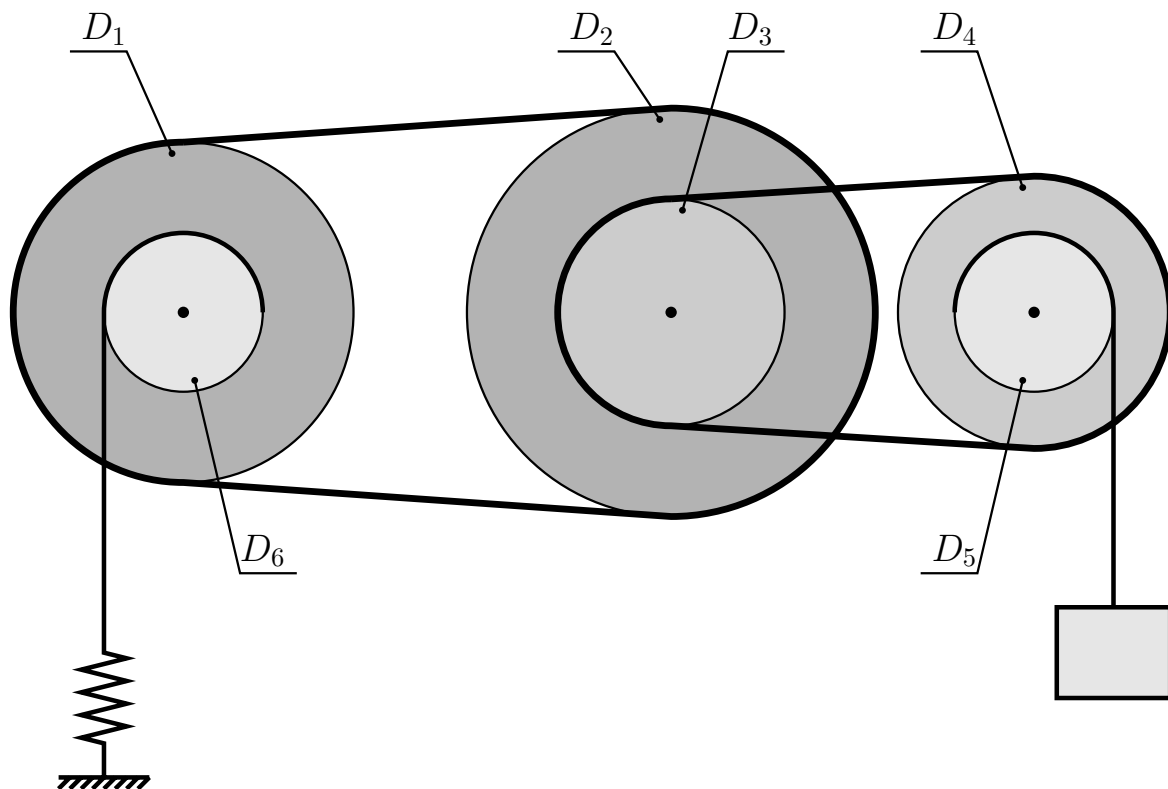
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 5\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 438x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 3.8\text{ нс/м}$.

Вариант №97



Диаметры дисков: $D_1 = 120\text{мм}$, $D_2 = 190\text{мм}$, $D_3 = 106\text{мм}$, $D_4 = 118\text{мм}$, $D_5 = 184\text{мм}$, $D_6 = 194\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 9\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 19\text{мм}$, $H_4 = 10\text{мм}$, $H_5 = 10\text{мм}$, $H_6 = 13\text{мм}$.

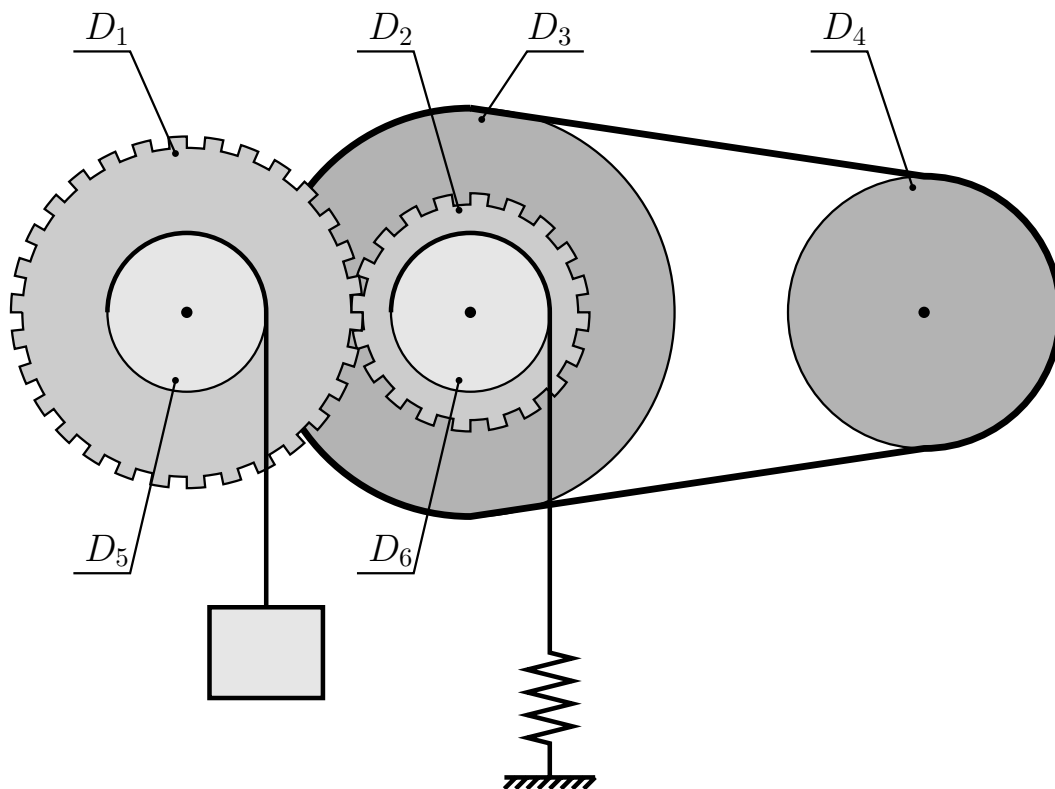
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 476x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 2.8\text{ нс/м}$.

Вариант №98



Диаметры дисков: $D_1 = 156\text{мм}$, $D_2 = 138\text{мм}$, $D_3 = 198\text{мм}$, $D_4 = 138\text{мм}$, $D_5 = 164\text{мм}$, $D_6 = 128\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 10\text{мм}$, $H_2 = 12\text{мм}$, $H_3 = 14\text{мм}$, $H_4 = 11\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 17\text{мм}$.

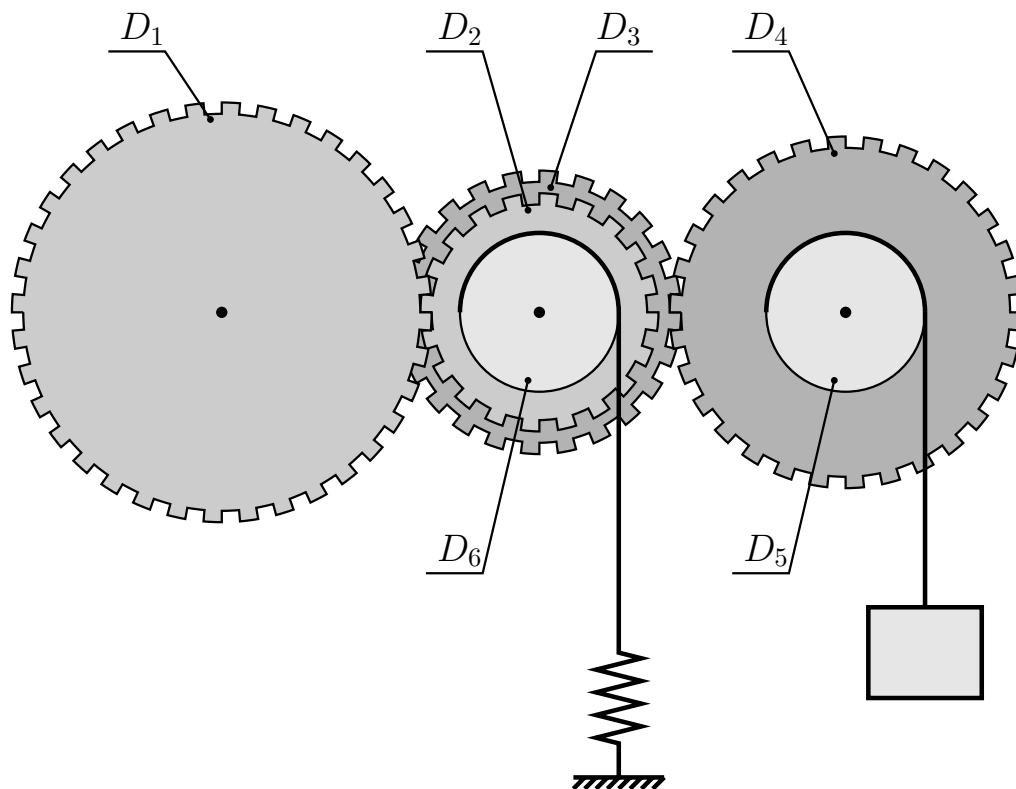
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 2\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 579x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.6\text{ нс/м}$.

Вариант №99



Диаметры дисков: $D_1 = 176\text{мм}$, $D_2 = 142\text{мм}$, $D_3 = 152\text{мм}$, $D_4 = 170\text{мм}$, $D_5 = 182\text{мм}$, $D_6 = 142\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 19\text{мм}$, $H_2 = 18\text{мм}$, $H_3 = 19\text{мм}$, $H_4 = 7\text{мм}$, $H_5 = 13\text{мм}$, $H_6 = 15\text{мм}$.

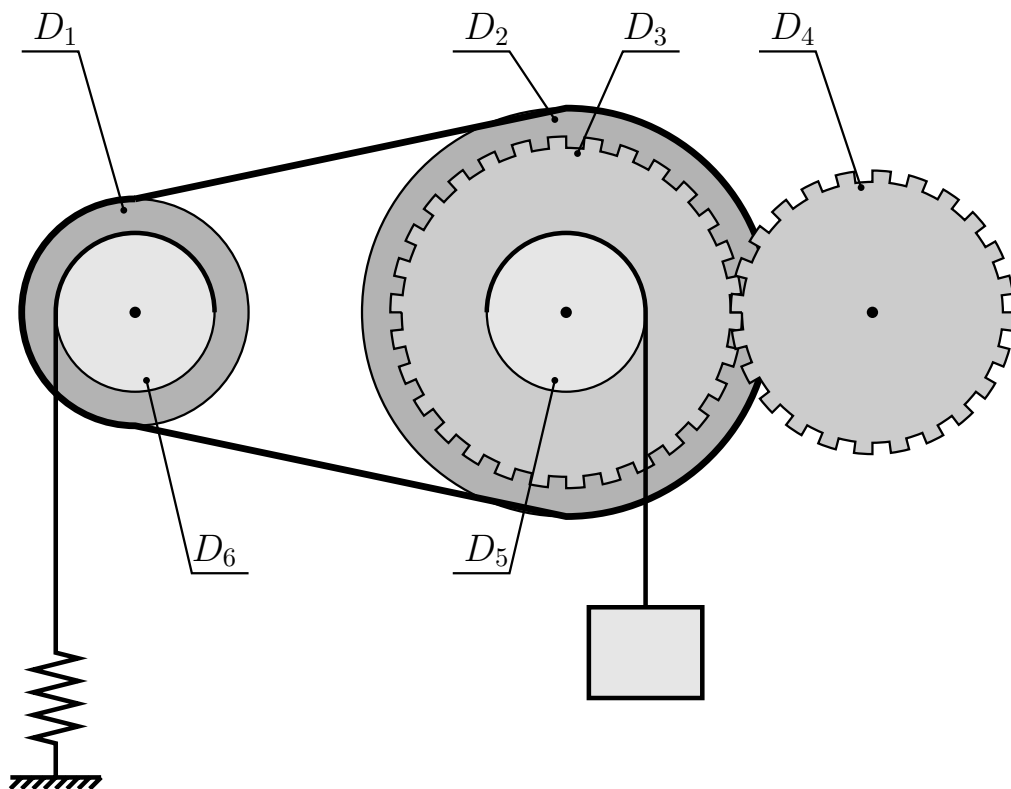
Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 3\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 278x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.2\text{ нс/м}$.

Вариант №100



Диаметры дисков: $D_1 = 100\text{мм}$, $D_2 = 130\text{мм}$, $D_3 = 114\text{мм}$, $D_4 = 108\text{мм}$, $D_5 = 118\text{мм}$, $D_6 = 134\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 11\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 704x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.8\text{нс/м}$.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т1. Механика. -М: Физматлит, 2005.
2. Айзерман М. А. Классическая механика. -М: Наука, 1980.
3. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы - 2-е изд., испр. и доп. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 312 с
4. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 496 с.
5. Черных И. В. “Simulink: Инструмент моделирования динамических систем”.
URL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1>

Приложение А

Пример выполнения контрольной работы

В данном приложении приводится пример выполнения контрольной работы. В процессе написания примера контрольной работы для проведения всех вычислений использовался математический пакет Matlab.

Донской государственный технический университет
факультет «Автоматизация, мехатроника и управление»

Заочная форма обучения

=====

Студент _____ Адрес _____

_____ группа _____ Шифр _____

(номер зачетной книжки)

Контрольная работа №1

по дисциплине «Моделирование систем и процессов»

за _____ курс

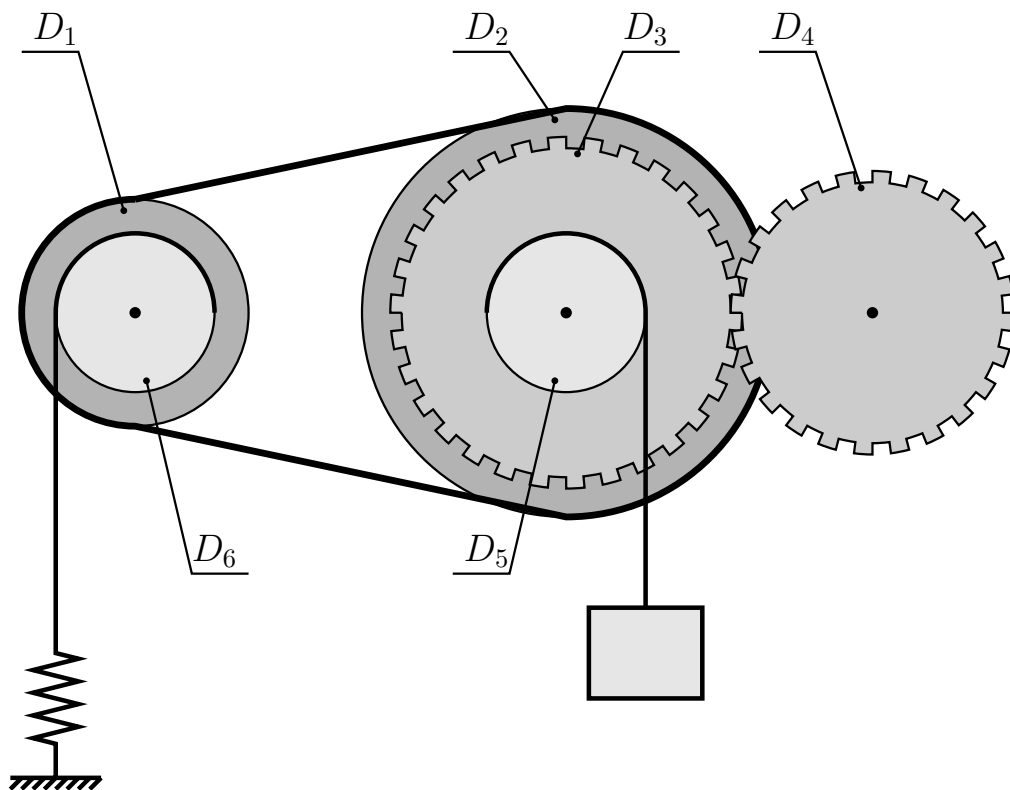
Содержание

1	Выбор задания	3
2	Расчет основных параметров системы	4
3	Установка кинематических соотношений	5
4	Кинетическая энергия системы	6
5	Потенциальная энергия системы	7
6	Диссипативная функция Релея	8
7	Математическая модель системы	9
8	Математическая модель линеаризованной системы	10
9	Компьютерное моделирование динамики	11
10	Компьютерное моделирование динамики линеаризованной системы	13
	Заключение	14

					15.03.04.10000000.000 КР			
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.					Контрольная работа по дисциплине «Моделирование систем и процессов»	Лит.	Лист	Листов
Пров.	Чувейко					У	2	14
Н. контр.						ДГТУ каф. АПП		
Утв.								

1 Выбор задания

В соответствии с номером варианта $N=100$ выбираем механическую систему и ее параметры:



Диаметры дисков: $D_1 = 100\text{мм}$, $D_2 = 130\text{мм}$, $D_3 = 114\text{мм}$, $D_4 = 108\text{мм}$, $D_5 = 118\text{мм}$, $D_6 = 134\text{мм}$.

Толщина дисков: $H_1 = 11\text{мм}$, $H_2 = 13\text{мм}$, $H_3 = 11\text{мм}$, $H_4 = 15\text{мм}$, $H_5 = 8\text{мм}$, $H_6 = 19\text{мм}$.

Плотность материала дисков: $\rho = 7500\text{кг/м}^3$.

Масса груза: $M_g = 1\text{кг}$.

Зависимость реакции нелинейной пружины от её растяжения: $F(x) = 704x^3$.

Коэффициент диссипации пружины: $h = 1.8\text{ нс/м}$.

2 Расчет основных параметров системы

Рассчитаем массу дисков. Масса i-ого диска может быть найдена по формуле:

$$M_i = \pi \rho H_i \frac{D_i^2}{4}. \quad (1)$$

Тогда масса дисков будет:

$$M_1 = 3.142 \cdot 7500 \frac{11}{10^3} \frac{100^2}{4 \cdot 10^6} = 0.648 \text{ кг.}$$

$$M_2 = 3.142 \cdot 7500 \frac{13}{10^3} \frac{130^2}{4 \cdot 10^6} = 1.294 \text{ кг.}$$

$$M_3 = 3.142 \cdot 7500 \frac{11}{10^3} \frac{114^2}{4 \cdot 10^6} = 0.842 \text{ кг.}$$

$$M_4 = 3.142 \cdot 7500 \frac{15}{10^3} \frac{108^2}{4 \cdot 10^6} = 1.031 \text{ кг.}$$

$$M_5 = 3.142 \cdot 7500 \frac{8}{10^3} \frac{118^2}{4 \cdot 10^6} = 0.656 \text{ кг.}$$

$$M_6 = 3.142 \cdot 7500 \frac{19}{10^3} \frac{134^2}{4 \cdot 10^6} = 2.010 \text{ кг.}$$

Рассчитаем момент инерции дисков. Момент инерции i-ого диска может быть найден по формуле:

$$J_i = 0.5 M_i \frac{D_i^2}{4}. \quad (2)$$

Тогда момент инерции дисков будет:

$$J_1 = 0.5 \cdot 0.648 \frac{100^2}{4 \cdot 10^6} = 0.810 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_2 = 0.5 \cdot 1.294 \frac{130^2}{4 \cdot 10^6} = 2.734 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_3 = 0.5 \cdot 0.842 \frac{114^2}{4 \cdot 10^6} = 1.368 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_4 = 0.5 \cdot 1.031 \frac{108^2}{4 \cdot 10^6} = 1.503 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_5 = 0.5 \cdot 0.656 \frac{118^2}{4 \cdot 10^6} = 1.142 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_6 = 0.5 \cdot 2.010 \frac{134^2}{4 \cdot 10^6} = 4.511 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

					15.03.04.10000000.000 КР	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		4

3 Установка кинематических соотношений

Пусть система находится в равновесии. Очевидно, что для описания отклонения системы от положения равновесия достаточно одной обобщенной координаты. Выберем в качестве обобщенной координаты величину отклонения груза от положения равновесия и обозначим его как x_1 . Будем полагать положительным направлением движения движение от поверхности земли. Величину растяжения пружины обозначим как x_2 . Обозначим поворот i -ого диска как ϕ_i . При этом примем в качестве положительного вращения вращение против часовой стрелки. Используя рисунок механической системы составим систему уравнений выражающих кинематическую связь элементов системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1\phi_1 = R_2\phi_2, \\ \phi_2 = \phi_3, \\ R_3\phi_3 = -R_4\phi_4, \\ \phi_5 = \phi_2, \\ \phi_6 = \phi_1, \\ R_5\phi_5 = x_1, \\ -R_6\phi_6 = x_2. \end{array} \right.$$

Разрешим систему относительно x_1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_5 = \frac{1}{R_5}x_1, \\ \phi_2 = \frac{1}{R_5}x_1, \\ \phi_3 = \frac{1}{R_5}x_1, \\ \phi_1 = \frac{R_2}{R_1R_5}x_1, \\ \phi_4 = -\frac{R_3}{R_4R_5}x_1, \\ \phi_6 = \frac{R_2}{R_1R_5}x_1, \\ x_2 = -\frac{R_2R_6}{R_1R_5}x_1. \end{array} \right. \quad (3)$$

Продифференцируем полученные выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1 = \dot{\phi}_1 = \frac{R_2}{R_1 R_5} \dot{x}_1, \\ \omega_2 = \dot{\phi}_2 = \frac{1}{R_5} \dot{x}_1, \\ \omega_3 = \dot{\phi}_3 = \frac{1}{R_5} \dot{x}_1, \\ \omega_4 = \dot{\phi}_4 = -\frac{R_3}{R_4 R_5} \dot{x}_1, \\ \omega_5 = \dot{\phi}_5 = \frac{1}{R_5} \dot{x}_1, \\ \omega_6 = \dot{\phi}_6 = \frac{R_2}{R_1 R_5} \dot{x}_1, \\ \dot{x}_2 = -\frac{R_2 R_6}{R_1 R_5} \dot{x}_1. \end{array} \right. \quad (4)$$

4 Кинетическая энергия системы

Кинетическая энергия i -ого диска вращающегося вокруг оси с угловой частотой ω может быть найдена по формуле:

$$T_i = \frac{J_i \omega^2}{2}. \quad (5)$$

Тогда с учетом ранее полученных кинематических соотношений (4), кинетические энергии дисков будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} = \frac{J_1 \left(\frac{R_2}{R_1 R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2}, \\ T_2 = \frac{J_2 \omega_2^2}{2} = \frac{J_2 \left(\frac{1}{R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2}, \\ T_3 = \frac{J_3 \omega_3^2}{2} = \frac{J_3 \left(\frac{1}{R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2}, \\ T_4 = \frac{J_4 \omega_4^2}{2} = \frac{J_4 \left(-\frac{R_3}{R_4 R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2}, \\ T_5 = \frac{J_5 \omega_5^2}{2} = \frac{J_5 \left(\frac{1}{R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2}, \\ T_6 = \frac{J_6 \omega_6^2}{2} = \frac{J_6 \left(\frac{R_2}{R_1 R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2}. \end{array} \right.$$

Кинетическая энергия груза может быть найдена по формуле:

$$T_g = \frac{M_g \dot{x}_1^2}{2}. \quad (6)$$

					15.03.04.10000000.000 КР	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		6

Тогда совокупная кинетическая энергия системы равна:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_g =$$

$$= \frac{J_1 \left(\frac{R_2}{R_1 R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2} + \frac{J_2 \left(\frac{1}{R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2} + \frac{J_3 \left(\frac{1}{R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2} +$$

$$+ \frac{J_4 \left(-\frac{R_3}{R_4 R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2} + \frac{J_5 \left(\frac{1}{R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2} + \frac{J_6 \left(\frac{R_2}{R_1 R_5} \dot{x}_1 \right)^2}{2} + \frac{M_g \dot{x}_1^2}{2}.$$

Вынесем $\frac{\dot{x}_1^2}{2}$ за скобки, а выражение в скобках обозначим как I - коэффициент инерции. Тогда кинетическая энергия будет иметь вид:

$$T = \frac{I \dot{x}_1^2}{2}. \quad (7)$$

где $I = J_1 \left(\frac{R_2}{R_1 R_5} \right)^2 + J_2 \left(\frac{1}{R_5} \right)^2 + J_3 \left(\frac{1}{R_5} \right)^2 + J_4 \left(-\frac{R_3}{R_4 R_5} \right)^2 + J_5 \left(\frac{1}{R_5} \right)^2 + J_6 \left(\frac{R_2}{R_1 R_5} \right)^2 + M_g$.
Найдем численное значение I :

$$I = 0.810 \cdot 10^{-3} \left(\frac{65 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 59 \cdot 10^{-3}} \right)^2 +$$

$$+ 2.734 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{59 \cdot 10^{-3}} \right)^2 +$$

$$+ 1.368 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{59 \cdot 10^{-3}} \right)^2 +$$

$$+ 1.503 \cdot 10^{-3} \left(-\frac{57 \cdot 10^{-3}}{54 \cdot 10^{-3} \cdot 59 \cdot 10^{-3}} \right)^2 +$$

$$+ 1.142 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{59 \cdot 10^{-3}} \right)^2 +$$

$$+ 4.511 \cdot 10^{-3} \left(\frac{65 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 59 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + 1 = 5.5705 \text{ кг}.$$

5 Потенциальная энергия системы

Потенциальная энергия системы состоит из двух слагаемых: потенциальной энергии груза в поле силы тяжести и потенциальной энергии пружины. С

					15.03.04.10000000.000 КР	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		7

учетом выбранной обобщенной координаты первое слагаемое может быть определено по формуле:

$$P_g = M_g g x_1.$$

где $g \approx 9.8$ - ускорение свободного падения.

Для получения второго слагаемого необходимо осуществить интегрирование силы реакции пружины при её сжатии из текущего состояния в состояние с нулевой потенциальной энергией. За состояние пружины с нулевой потенциальной энергией примем её естественное состояние, то есть когда величина растяжения равна нулю. Тогда потенциальная энергия пружины с учетом введенного ранее определения x_2 будет:

$$P_s = - \int_{x_2}^0 F(x_2) dx_2 = - \int_{x_2}^0 704 x_2^3 dx_2 = \frac{704 x_2^4}{4}.$$

Тогда потенциальная энергия системы будет иметь следующий вид:

$$P = P_g + P_s = M_g g x_1 + \frac{704 x_2^4}{4}.$$

Заменим все переменные на обобщенные координаты с учетом установленных ранее кинематических соотношений (3):

$$P = M_g g x_1 + \frac{704 \left(-\frac{R_2 R_6}{R_1 R_5} \right)^4 x_1^4}{4}.$$

Для удобства записи введем обозначение C :

$$C = 704 \left(-\frac{R_2 R_6}{R_1 R_5} \right)^4 = 704 \left(-\frac{65 \cdot 10^{-3} \cdot 67 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 59 \cdot 10^{-3}} \right)^4 = 3343.7764.$$

С учетом этого обозначения потенциальная энергия системы примет вид:

$$P = M_g g x_1 + \frac{C x_1^4}{4}.$$

6 Диссипативная функция Релея

Диссипация в системе обусловлена наличием диссипативных сил со стороны пружины. Учитывая что один конец пружины является неподвижным, то

					15.03.04.10000000.000 КР	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		8

скорость сжатия/растяжения пружины определяется только \dot{x}_2 . С учетом этого диссипативная функция Релея будет иметь вид:

$$R = \frac{h\dot{x}_2^2}{2}.$$

Или с учетом выражения (4):

$$R = \frac{h \left(-\frac{R_2 R_6}{R_1 R_5} \right)^2 \dot{x}_1^2}{2}.$$

Для удобства записи введем обозначение H :

$$H = 1.8 \left(-\frac{R_2 R_6}{R_1 R_5} \right)^2 = 1.8 \left(-\frac{65 \cdot 10^{-3} \cdot 67 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 59 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 3.9229.$$

С учетом этого обозначения диссипативная функция системы примет вид:

$$R = \frac{H\dot{x}_1^2}{2}. \quad (8)$$

7 Математическая модель системы

Для составления математической модели системы используем уравнения Лагранжа 2-ого рода. Система уравнений имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (9)$$

где: q_i - обобщенные координаты;

Q_i - обобщенные силы;

L - лагранжиан системы.

Составим Лагранжиан системы:

$$L = T - P = \frac{I\dot{x}_1^2}{2} - M_g g x_1 - \frac{C x_1^4}{4}.$$

Найдем обобщенные силы. С учетом (8) обобщенная сила будет определяться выражением:

$$Q = -\frac{\partial R}{\partial \dot{x}_1} = -\frac{\partial}{\partial \dot{x}_1} \frac{H\dot{x}_1^2}{2} = -H\dot{x}_1.$$

Вычислим все частные производные входящие в состав уравнения Лагранжа:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = \frac{\partial}{\partial \dot{x}_1} \left(\frac{I\dot{x}_1^2}{2} - M_g g x_1 - \frac{C x_1^4}{4} \right) = I\dot{x}_1,$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = \frac{d}{dt} (I\dot{x}_1) = I\ddot{x}_1,$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{I\dot{x}_1^2}{2} - M_g g x_1 - \frac{C x_1^4}{4} \right) = -M_g g - C x_1^3.$$

Подставляя полученные выражения в (9) получаем математическую модель системы:

$$I\ddot{x}_1 + H\dot{x}_1 + M_g g + C x_1^3 = 0. \quad (10)$$

8 Математическая модель линеаризованной системы

Для осуществления линеаризации системы (13) найдем стационарную точку. В стационарном режиме функционирования все производные равны нулю:

$$\dot{q}_1 = 0, \dot{q}_2 = 0.$$

С учетом этого разрешим систему (13):

$$\begin{cases} 0 = q_2^*, \\ 0 = -\frac{1}{I} (H q_2^* + C q_1^{*3} + M_g g). \end{cases} \quad (11)$$

Несложно видеть, что решением данной системы будут следующие значения:

$$\begin{cases} q_2^* = 0, \\ q_1^* = -\left(\frac{M_g g}{C}\right)^{1/3} = -0.14311. \end{cases}$$

Пусть переменные состояния представлены в виде суммы:

$$q_1 = q_1^* + \tilde{q}_1, \quad q_2 = q_2^* + \tilde{q}_2.$$

где \tilde{q}_1, \tilde{q}_2 - вариации соответствующих переменных в окрестности стационарного состояния. Тогда исходная система представляется в виде:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(q_1^* + \tilde{q}_1) = q_2^* + \tilde{q}_2, \\ \frac{d}{dt}(q_2^* + \tilde{q}_2) = -\frac{1}{I}(H(q_2^* + \tilde{q}_2) + C(q_1^* + \tilde{q}_1)^3 + M_g g). \end{cases}$$

Так как выполняется:

$$(q_1^* + \tilde{q}_1)^3 = q_1^{*3} + 3q_1^{*2}\tilde{q}_1 + 3q_1^*\tilde{q}_1^2 + \tilde{q}_1^3,$$

с учетом условия стационарности (11) и пренебрегая членами высшего порядка малости ($3q_1^*\tilde{q}_1^2 = 0, \tilde{q}_1^3 = 0$) получаем линеаризованную систему:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{q}}_1 = \tilde{q}_2, \\ \dot{\tilde{q}}_2 = -\frac{1}{I}(H\tilde{q}_2 + 3q_1^{*2}C\tilde{q}_1). \end{cases} \quad (12)$$

9 Компьютерное моделирование динамики

Для проведения компьютерного моделирования приведем систему (10) к форме Коши. Для этого введем следующие обозначения:

$$q_1 = x_1, q_2 = \dot{x}_1.$$

С учетом введенных обозначений система будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = q_2, \\ \dot{q}_2 = -\frac{1}{I}(Hq_2 + Cq_1^3 + M_g g). \end{cases} \quad (13)$$

Для осуществления компьютерного моделирования будем использовать программный пакет Matlab. Листинг программы осуществляющей моделирование:

```
function Start()
H = 3.9229; I = 5.5705;
C = 3343.7764; Mg = 1;
g = 9.8;
x1s = -0.14311;
```

```

Q0 = [x1s + abs(x1s)*0.1;0]; Tend = 11;
sets = odeset( 'RelTol',1e-6,'AbsTol',1e-6);
[t,Q] = ode15s(@model,[0 Tend],Q0,sets);
x1 = Q(:,1); dx1 = Q(:,2);
plot(t, x1, '-k', 'linewidth', 1.5);
xlabel('t, sec'); ylabel('x_1'); grid on;
function dq = model(t,q)
    dq1 = q(2);
    dq2 = -(H * q(2) + C * q(1)^3 + Mg*g)/I;
    dq = [dq1;dq2];
end

```

Результат численного моделирования приведен на рисунке 1.

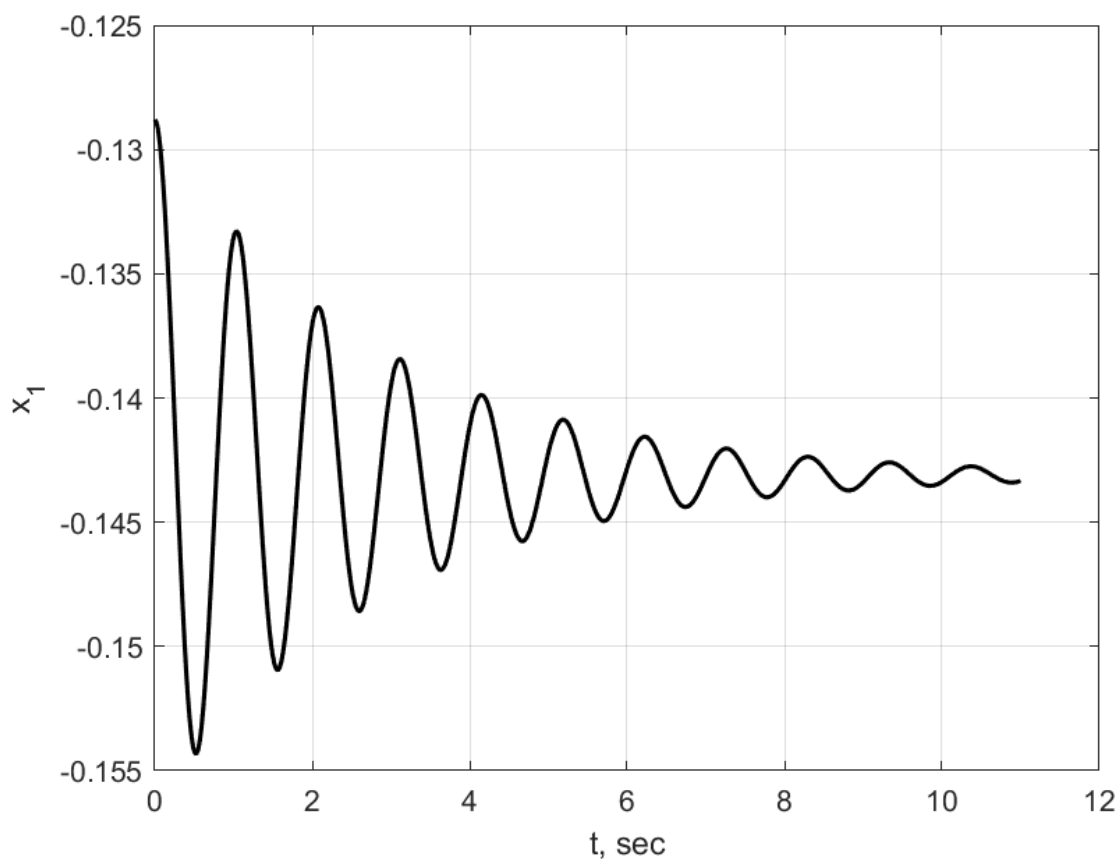


Рисунок 1 – Переходной процесс

10 Компьютерное моделирование динамики линеаризованной системы

Осуществим моделирование линеаризованной системы (12) при таких же начальных условиях как и в случае моделирования нелинейной системы. Для этого определим их:

$$q_1(0) = q_1^* + 0.1|q_1^*| = q_1^* + \tilde{q}_1(0), \quad q_2(0) = 0 = q_2^* + \tilde{q}_2(0).$$

тогда с учетом (11):

$$\tilde{q}_1(0) = 0.1|q_1^*|, \quad \tilde{q}_2(0) = 0.$$

Листинг программы осуществляющей моделирование системы (12):

```
function Start2()
H = 3.9229;
I = 5.5705;
C = 3343.7764;
Mg = 1;
x1s = -0.14311;
g = 9.8;
Q0 = [abs(x1s)*0.1;0];
Tend = 11;
sets = odeset('RelTol',1e-6,'AbsTol',1e-6);
[t,Q] = ode15s(@model,[0 Tend],Q0,sets);
x1 = Q(:,1) + x1s; dx1 = Q(:,2);
plot(t, x1, '-k', 'linewidth', 1.5);
xlabel('t, _sec'); ylabel('x_1'); grid on;
function dq = model(t,q)
    dq1 = q(2);
    dq2 = -(H * q(2) + 3 * x1s^2 * C * q(1))/I;
    dq = [dq1;dq2];
end
```

Результат численного моделирования приведен на рисунке 2.

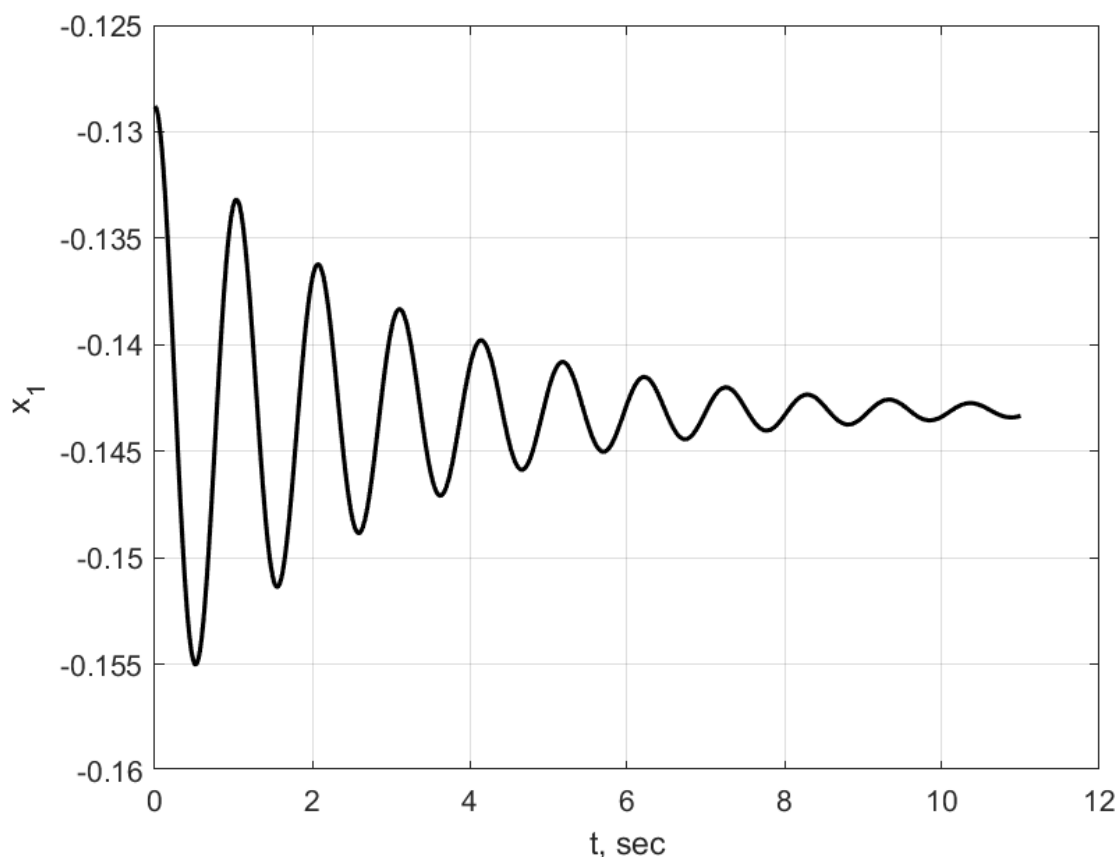


Рисунок 2 – Переходной процесс линеаризованной системы

Заключение

В ходе работы было освоено применение современных методов математического моделирования механических систем, а также осуществления компьютерного моделирования динамических систем с использованием прикладного математического пакета Matlab. В результате выполнения работы было получено две математические модели исходной механической системы: нелинейная модель и линеаризованная модель. Компьютерное моделирование продемонстрировало схожесть поведения данных систем. Погрешность динамики линеаризованной системы по координате x_1 составила $\approx 0.44293\%$, а по $\dot{x}_1 \approx 3.6241\%$ (погрешность оценивалась по амплитудам первого колебания). Малая величина погрешности свидетельствует о корректности выполненной линеаризации.

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

15.03.04.10000000.000 КР

Лист

14