

# Проектирование двигателя с элементами из сплава с эффектом памяти формы

Работа выполнена  
студенткой IV-33  
Ильиной Е. Э.  
под руководством  
доц. Зарубина З.В.

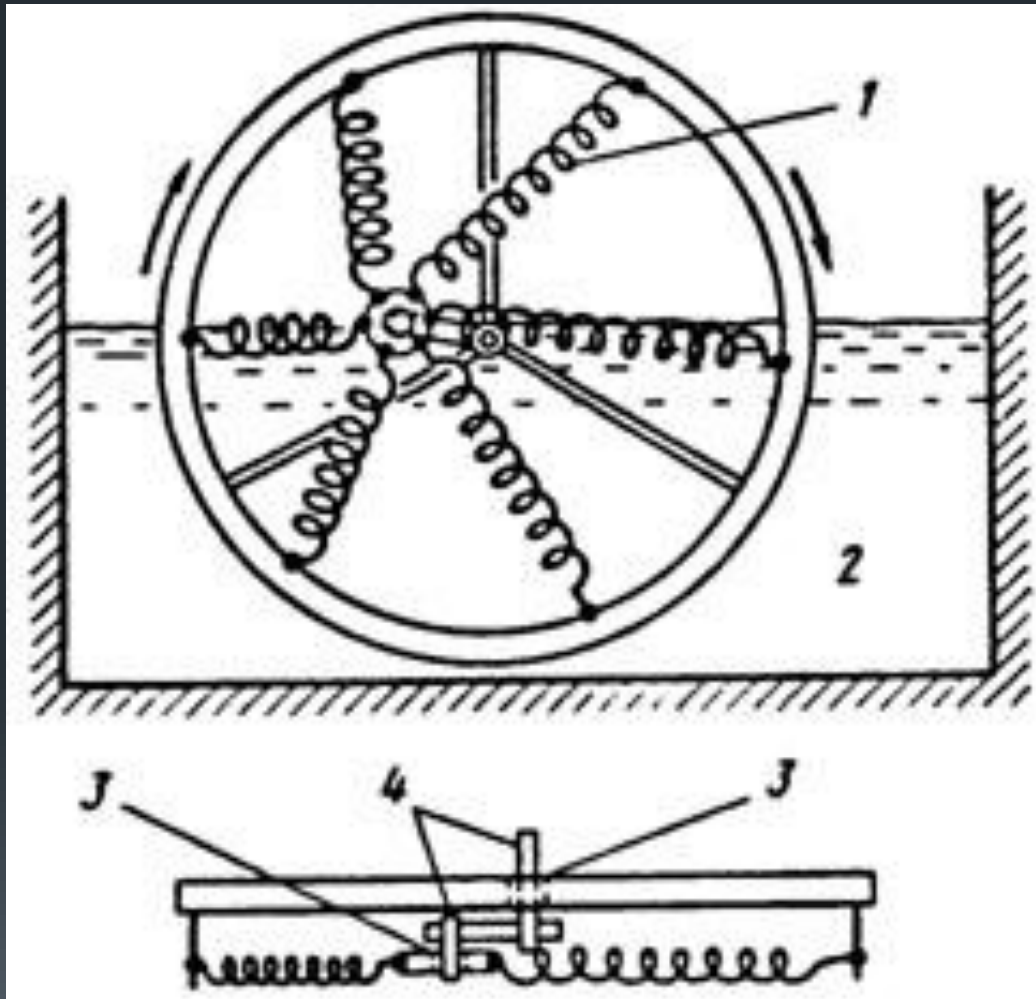
# Цель и задачи

Цель работы: проектирование и создание действующей модели двигателя Гинеля.

Задачи:

- построение динамической модели двигателя Гинеля;
- определение крутящего момента системы;
- решение уравнения движения системы численным методом;
- определение угловой скорости системы аналитическим методом;
- выбор оптимальных параметров двигателя;
- построение трехмерных моделей деталей и сборки;
- создание чертежей деталей двигателя и сборочного чертежа конструкции;
- создание реальной модели.

# Исходные данные



Дифференциальное уравнение вращательного движения:

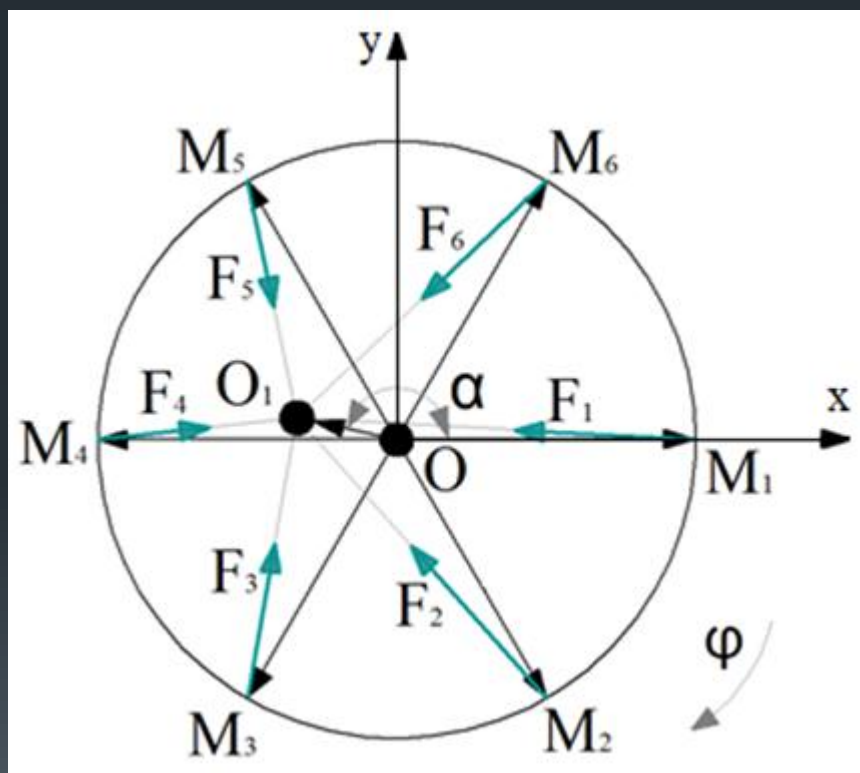
$$J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \sum M(\overline{F^e}), \quad (1)$$

где  $J = \text{const}$  – момент инерции данной модели ( $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ );  
 $\varphi$  – угол поворота модели, зависящий от времени  $t$  (рад);  
 $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$  – угловое ускорение ( $\text{рад}/\text{с}^2$ );  
 $\sum M(\overline{F^e})$  – сумма кинематических моментов внешних сил  $F^e$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ );

Рисунок 1 – Двигатель Гинеля: 1- пружина из сплава Ni-Ti; 2- жидкая среда; 3- подшипник; 4- фиксированные оси.

# Построение динамической модели двигателя Гинеля

На рисунке 2 приведена расчетная схема двигателя, иллюстрирующая усилия, возникающие в пружинах при действии ЭПФ.



В программе задаются исходные значения модели:

- радиус колеса  $R = 0,08$  м;
- угол  $\alpha$ , который составляют вектор  $OO_1$  с осью  $Ox$ ;
- коэффициент отношения расстояния между осями к радиусу колеса  $\lambda = 5/8$ ;
- длина пружины в недеформированном состоянии  $L_0 = 0,02$  м;
- коэффициент жесткости пружины в аустенитном состоянии  $k_A = 555$  Н/мм;
- коэффициент жесткости пружины в мартенситном состоянии  $k_M = 166$  Н/мм;
- уровень воды относительно оси  $Ox$   $w = 0$ .

Рисунок 2 – Расчетная схема двигателя.

# Построение динамической модели двигателя Гинеля

Для построения динамической модели используются следующие формулы (2.1-2.5):

$$\overline{OM}_1(\varphi) = \begin{pmatrix} R \cdot \cos(-\varphi) \\ R \cdot \sin(-\varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\overline{OO}_1(\varphi) = \begin{pmatrix} \lambda \cdot R \cdot \cos(\alpha) \\ \lambda \cdot R \cdot \sin(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$L_1(\varphi) = |\overline{OO}_1(\varphi) - \overline{OM}_1(\varphi)| \quad (2.3)$$

$$\overline{f}_1(\varphi) = \frac{\overline{OO}_1(\varphi) - \overline{OM}_1(\varphi)}{|\overline{OO}_1(\varphi) - \overline{OM}_1(\varphi)|} \quad (2.4)$$

$$\overline{F}_1(\varphi) = \begin{cases} k_M \cdot (L_1(\varphi) - L_0) \cdot \overline{f}_1(\varphi), & \text{если } OM_{1y}(\varphi) > w \\ k_A \cdot (L_1(\varphi) - L_0) \cdot \overline{f}_1(\varphi), & \text{если } OM_{1y}(\varphi) < w \end{cases} \quad (2.5)$$

# Построение динамической модели двигателя Гинеля

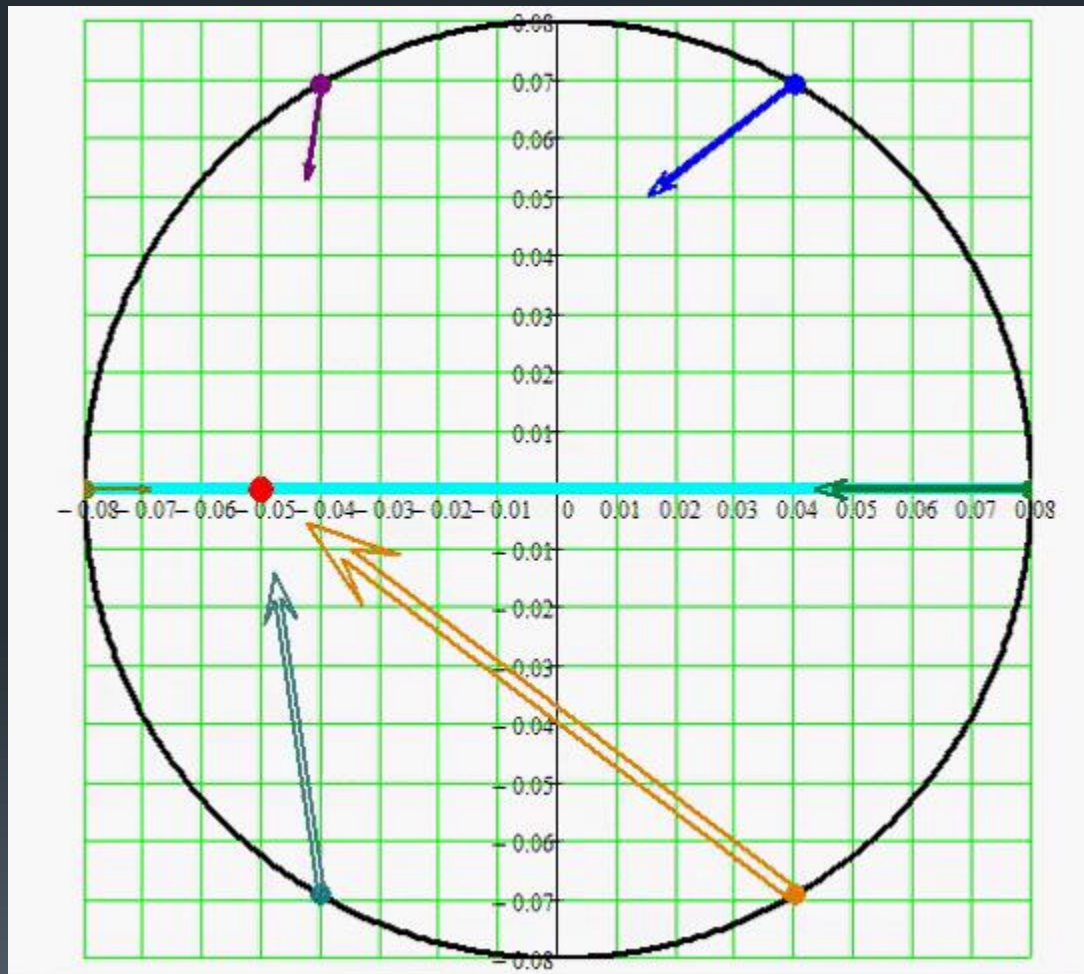


Рисунок 3 – Динамическая модель двигателя Гинеля.

## Определение крутящего момента системы

Для расчета суммарного крутящего момента используются следующие формулы:

$$\overline{M}_1 = \overline{OM}_1 \times \overline{F}_1 \quad (3)$$

$$\sum \overline{M}(\varphi) = \overline{M}(\varphi)_1 + \overline{M}(\varphi)_2 + \overline{M}(\varphi)_3 + \overline{M}(\varphi)_4 + \overline{M}(\varphi)_5 + \overline{M}(\varphi)_6 \quad (4)$$

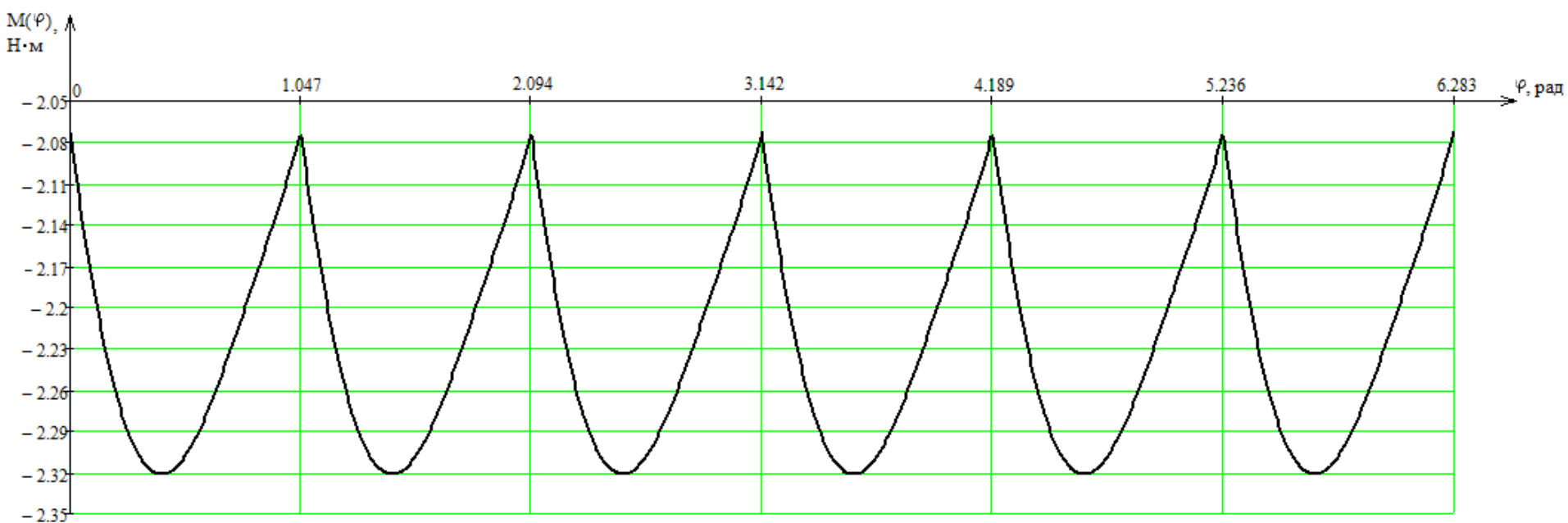


Рисунок 4 – График изменения крутящего момента модели, зависящего от угла поворота.

# Решение уравнения движения системы численным методом

8

$$J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt} = M(\varphi) - K \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент сопротивления воды ( $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ );  $J$  – момент инерции данной модели ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ );  $\varphi$  – угол вращения, зависящий от времени  $t$  (рад);  $M(\varphi)$  – внешний момент, создаваемый силами сжатия пружин, изготовленных из ЭПФ ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ );  $\frac{d\varphi}{dt}$  – угловая скорость (1<sup>ая</sup> производная угла вращения по времени) (рад/с);  $\frac{d^2\varphi}{dt}$  – угловое ускорение (2<sup>ая</sup> производная угла вращения по времени) (рад/с<sup>2</sup>).

$$\frac{d\varphi}{dt} = \psi \quad (6)$$

$$J \cdot \frac{d\psi}{dt} = M(\varphi) - K \cdot \psi \quad (7)$$

$$\frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{M(\varphi)}{J \cdot \psi} - \frac{K}{J} \quad (8)$$



# Решение уравнения движения системы численным методом

9

$$\psi_{i+1} = \psi_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (9)$$

где  $k_{1i} = h \cdot f(\varphi_i, \psi_i)$  – первая точность, считаемая в данной точке;

$k_{2i} = h \cdot f(\varphi_i + \frac{h}{2}, \psi_i + \frac{k_1}{2})$  – вторая точность, считаемая с отступом в полшага от данной точки;

$k_{3i} = h \cdot f(\varphi_i + \frac{h}{2}, \psi_i + \frac{k_2}{2})$  – третья точность, считаемая с отступом в полшага от данной точки;

$k_{4i} = h \cdot f(\varphi_i + h, \psi_i + k_3)$  – четвертая точность, считаемая с отступом в шаг от данной точки.

Начальные условия задачи Коши:  $\varphi_0 = 0$ ;  $\psi(\varphi_0) = \psi_0$ .

Шаг для данного расчета:  $h = \frac{\pi}{24} = 0,131$ .

Количество шагов:  $N = \frac{2\pi}{h} = 48$  шагов.

# Решение уравнения движения системы численным методом

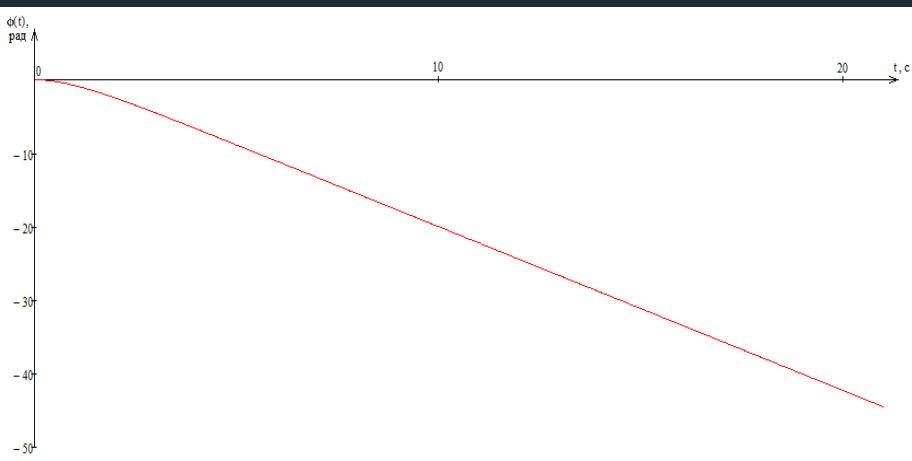


Рисунок 5 – График зависимости угла поворота от времени.

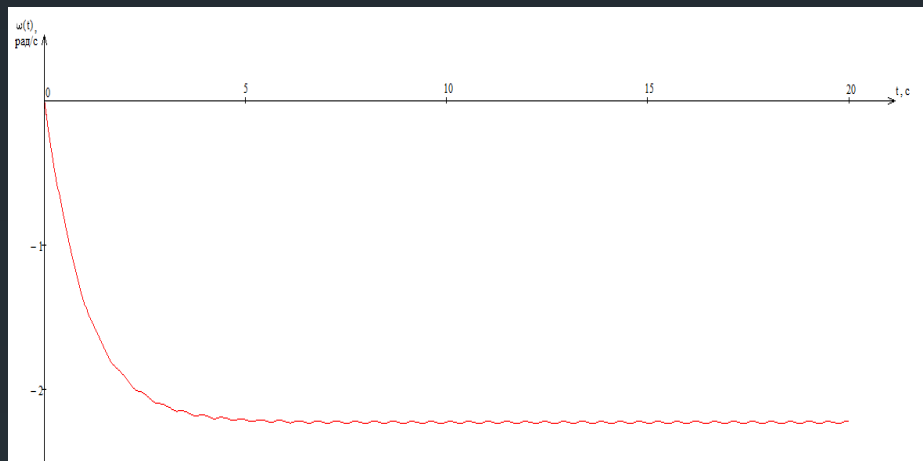


Рисунок 6 – (а) График зависимости угловой скорости от времени.

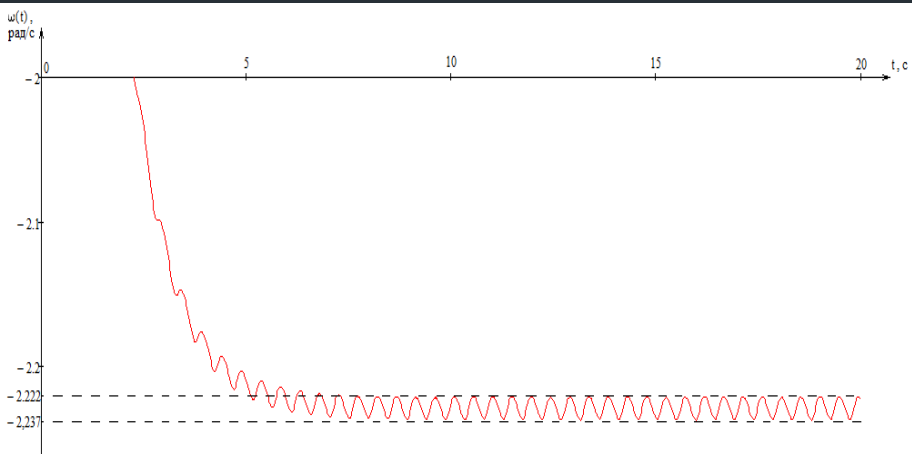


Рисунок 6 – (б) Значения, в пределах которого варьируется угловая скорость.

$$\omega_{\text{ср}} = \left| \frac{-2.222 - 2.237}{2} \right| = 2,23 \text{ (рад/с)}$$

# Определение угловой скорости вращения аналитическим методом

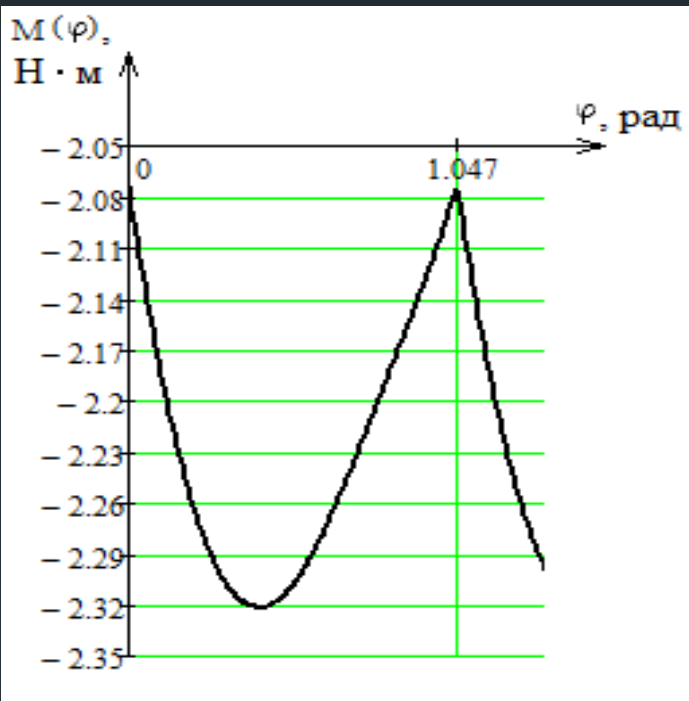


Рисунок 7 – Рассматриваемый участок графика крутящего момента.

$$\varphi(t) = \omega \cdot t \quad (10)$$

$$M(\omega \cdot t) - K \cdot \omega = 0 \quad (11)$$

$$\int_0^{\pi/3} M(\varphi) d\varphi = \int_0^{\pi/3} (K \cdot \omega) d\varphi \quad (12)$$

$$\int_0^{\pi/3} M(\varphi) d\varphi = 0,0499 \cdot \left( \frac{-2,073 - 2,073}{2} - 44,725 \right) = -2,335 \quad (\text{Н} \cdot \text{м}) \quad (13)$$

$$\int_0^{\pi/3} (K \cdot \omega) d\varphi = (K \cdot \omega) \int_0^{\pi/3} d\varphi = (K \cdot \omega) \cdot \frac{\pi}{3} = K \cdot \omega \cdot 1,047 \quad (14)$$

$$\omega = \frac{2,335}{1,047} = 2,23 \quad (\text{рад/с}) \quad - \text{значение угловой скорости} \quad (15)$$

# Выбор оптимальных параметров двигателя

$\alpha, ^\circ$	М, Н · м	$\omega$ , рад/с	$\alpha, ^\circ$	М, Н · м	$\omega$ , рад/с
0	3,634	3,361	170	3,771	3,216
5	3,634	3,666	180	3,807	3,671
10	3,633	3,368	190	3,807	3,369
15	3,633	3,34	200	3,807	3,268
20	3,633	3,283	210	3,62	3,059

Таблица 1 – Выбор оптимального значения  $\alpha$  для получения максимальной скорости вращения

Таблица 2 – Выбор оптимального значения  $\lambda$  для получения максимальной скорости вращения

$\lambda$	М, Н · м	$\omega$ , рад/с	$\lambda$	М, Н · м	$\omega$ , рад/с
$\frac{1,5}{8}$	0,7	0,677	$\frac{5,5}{8}$	2,565	2,46
$\frac{2}{8}$	0,932	0,9	$\frac{6}{8}$	2,818	2,685
$\frac{2,5}{8}$	1,164	1,12	$\frac{6,5}{8}$	3,082	2,9
$\frac{3}{8}$	1,359	1,346	$\frac{7}{8}$	3,356	3,136
$\frac{3,5}{8}$	1,625	1,568	$\frac{7,5}{8}$	3,633	3,363

w, м	М, Н · м	$\omega$ , рад/с
- 0,02	3,633	3,334
- 0,01	3,633	3,369
0	3,633	3,379
0,01	3,806	3,377
0,02	3,807	3,351

Таблица 3 – Выбор оптимального значения w для получения максимальной скорости вращения

# Проектирование двигателя

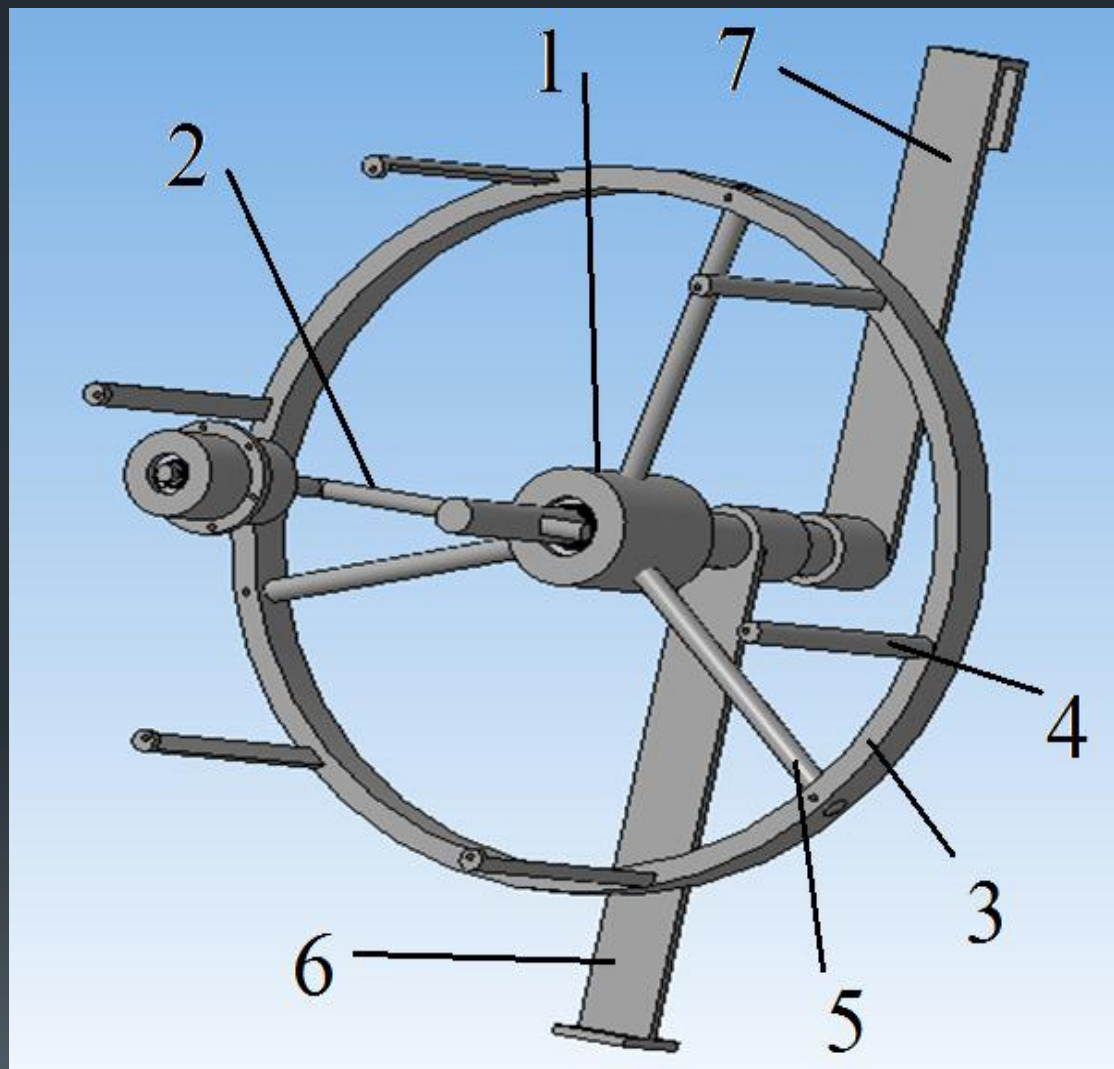


Рисунок 8 – 3D модель общей сборки: 1 – узел №1; 2 – узел №2; 3 – колесо; 4 – выступ; 5 – спица; 6 – крепление 1; 7 – крепление 2

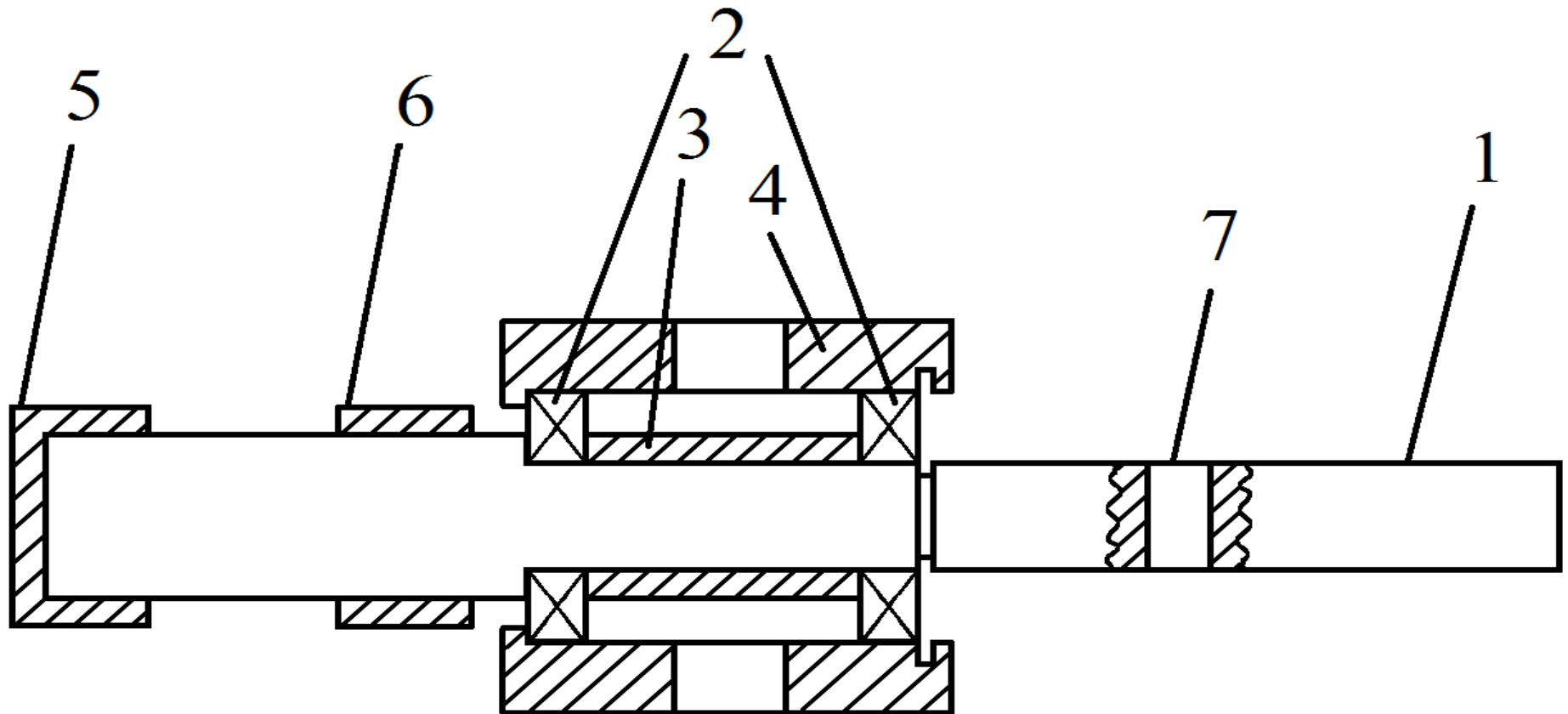


Рисунок 8 – Схема узла №1: 1 – основной вал; 2 – подшипники качения; 3 – стопорная втулка; 4 – внешняя втулка с пазами для спиц; 5 – настенное крепление; 6 – напольное крепление; 7 – паз под побочный вал.

# Проектирование двигателя

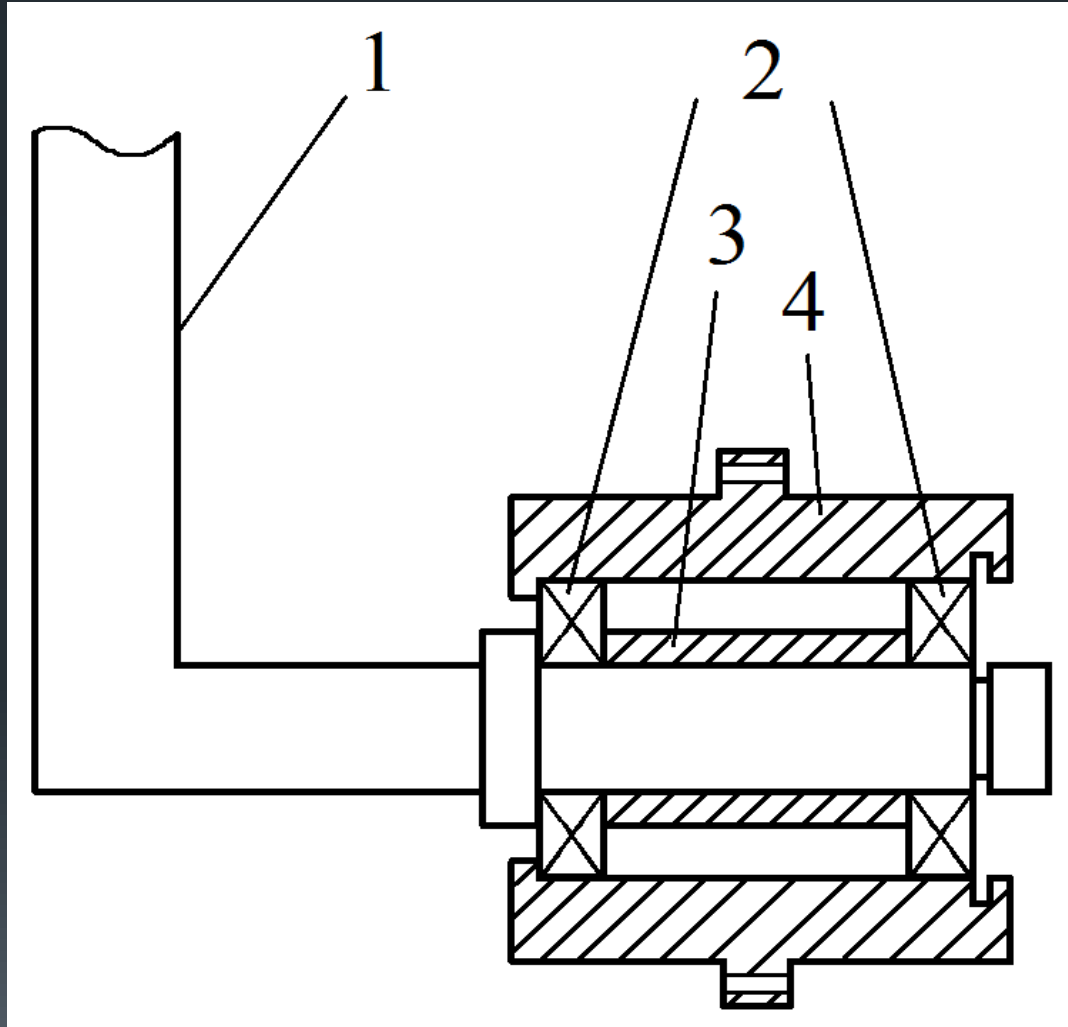


Рисунок 9 – Схема узла №2; 1 – побочный вал; 2 – подшипники качения; 3 – стопорная втулка; 4 – внешняя втулка с пазами для пружин.