



## Выпускная работа бакалавра техники и технологии

# Моделирование и исследование динамики работы газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания

Направление: 150303 – Прикладная механика

Выполнил студент гр. 43602/3 М.И. Трибунский  
Руководитель, к.т.н., проф. А.И. Боровков  
Соруководитель, О.И. Клявин

Санкт-Петербург  
2014

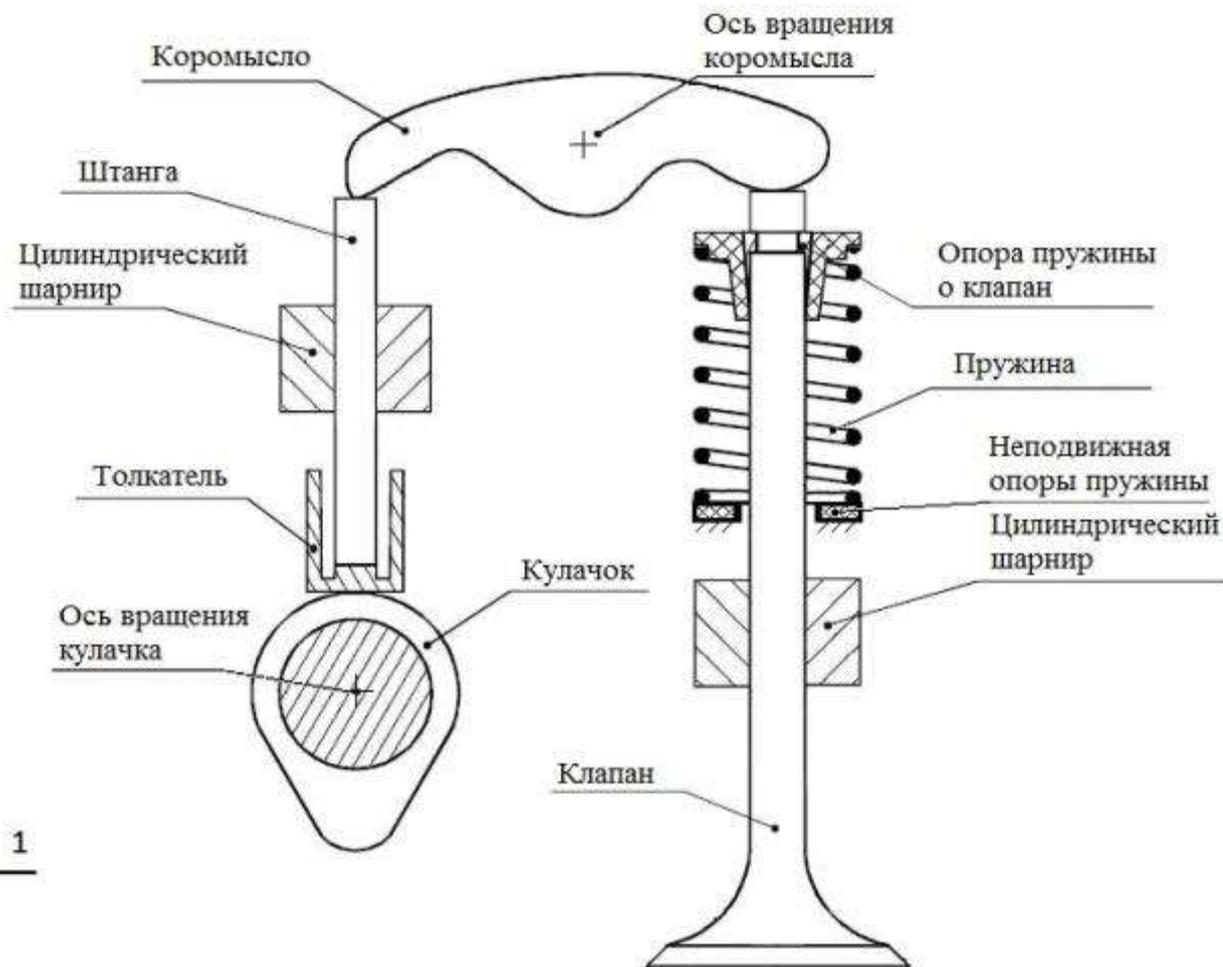
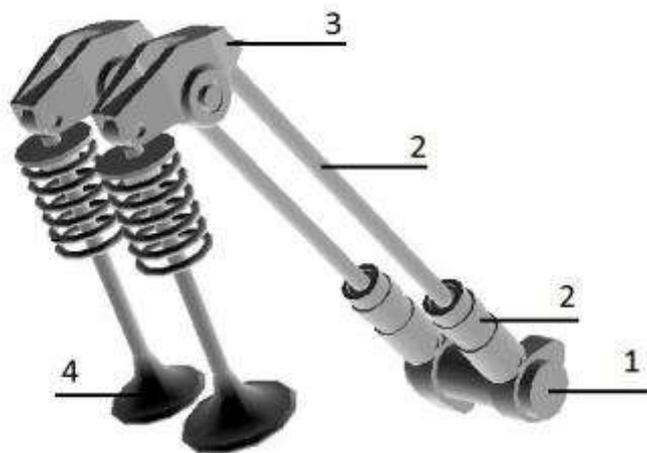
## Содержание

- Простейшая математическая модель газораспределительного механизма типа OHV
- Построение модели
- Вычислительные результаты
- Силовое замыкание
- Параметры оптимизации (3 способа)
- Целевая функция
- Результаты оптимизации
- Выбор параметров и оценка оптимизации
- Заключение

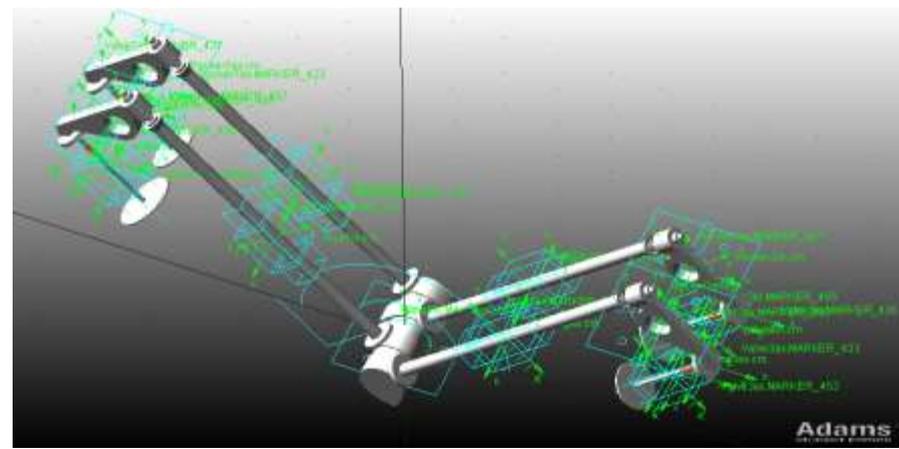
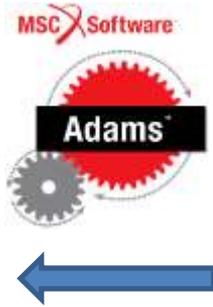
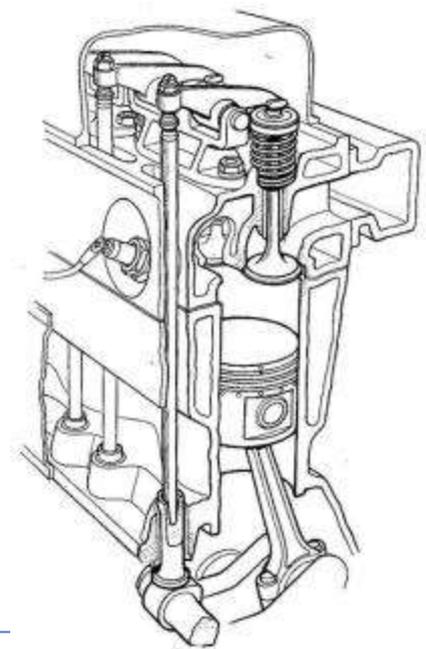
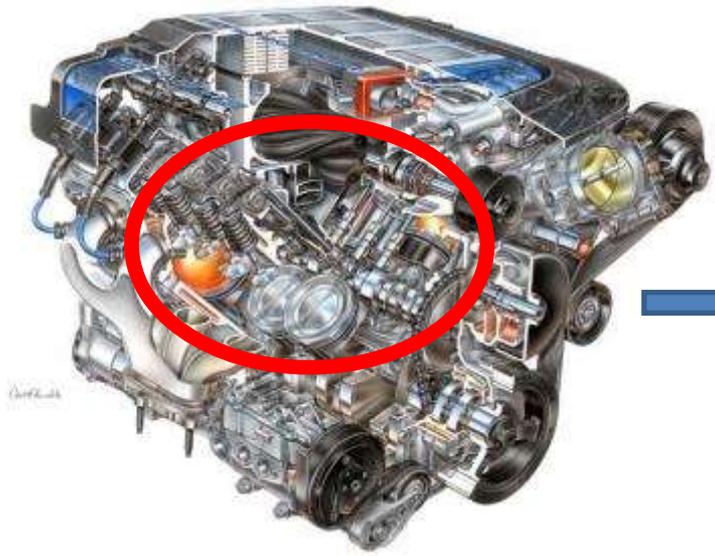


## Простейшая математическая модель газораспределительного механизма типа OHV

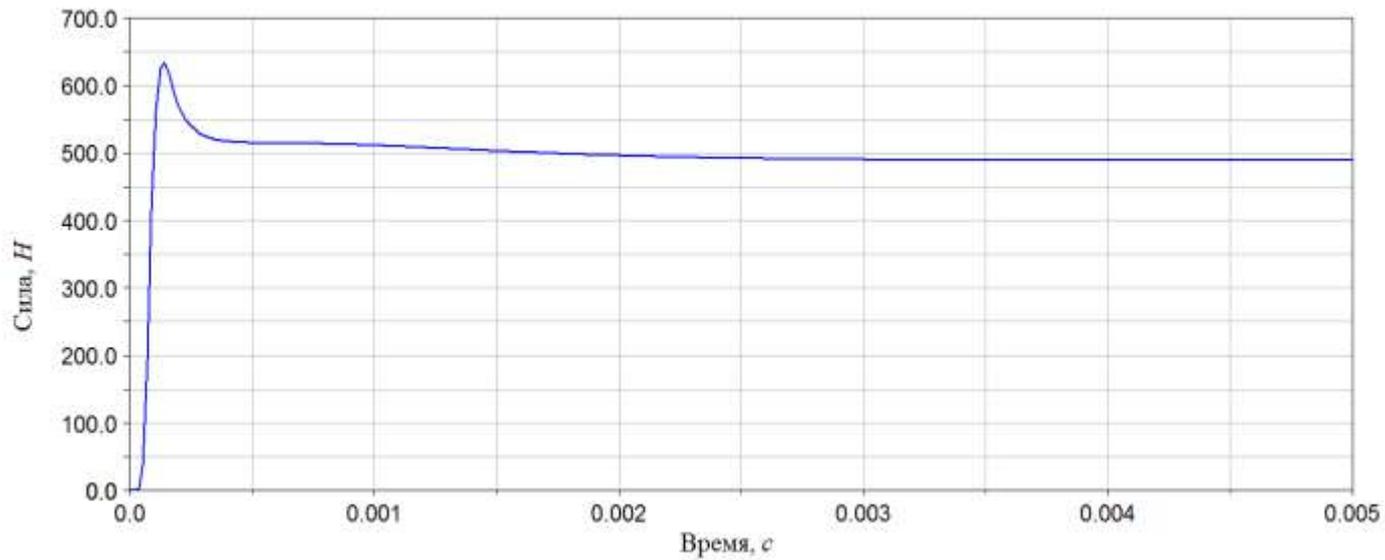
- 4 тела
- 4 силы
- 5 связей



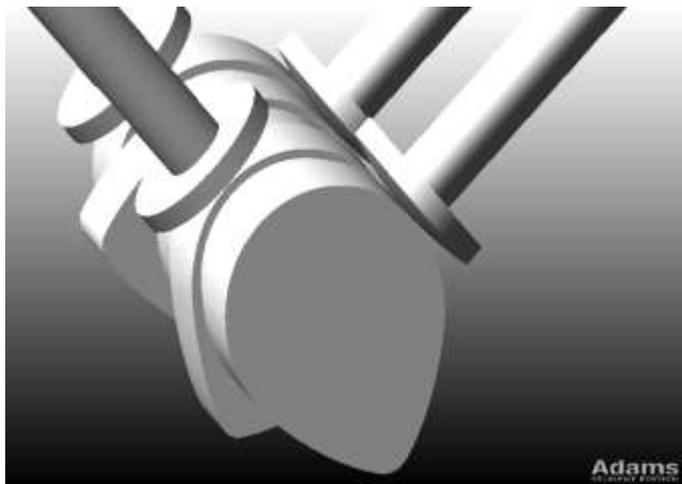
## Построение модели



## Вычислительные результаты

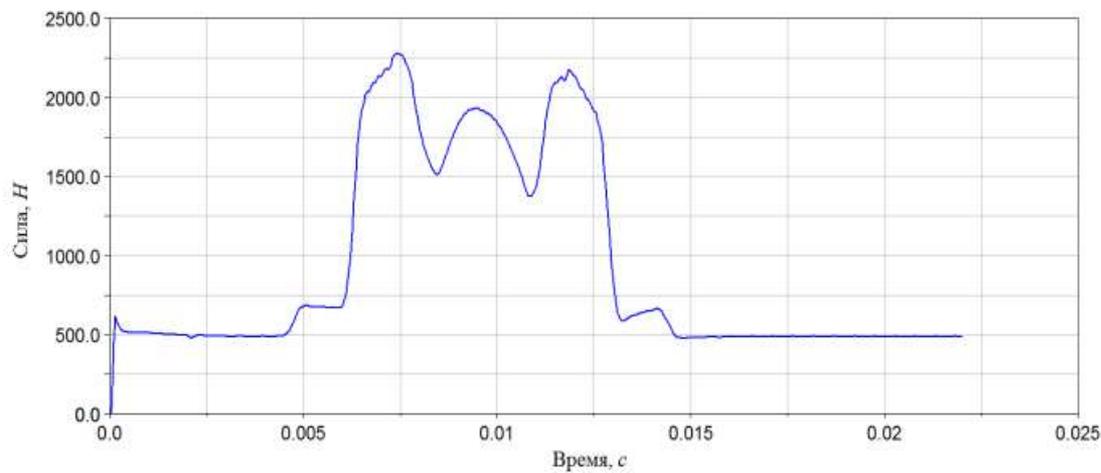
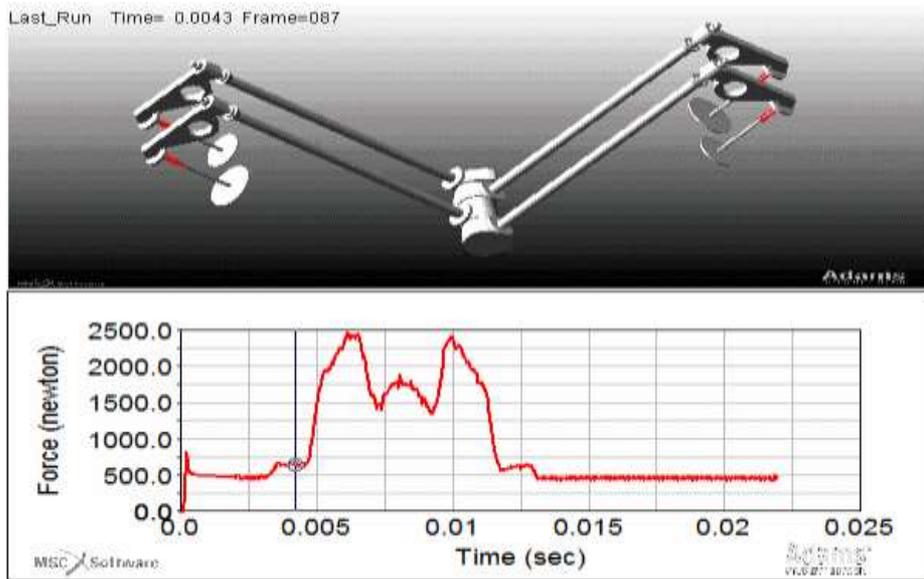


$$t_{\text{зап}} = 2\text{мс}$$



## Вычислительные результаты

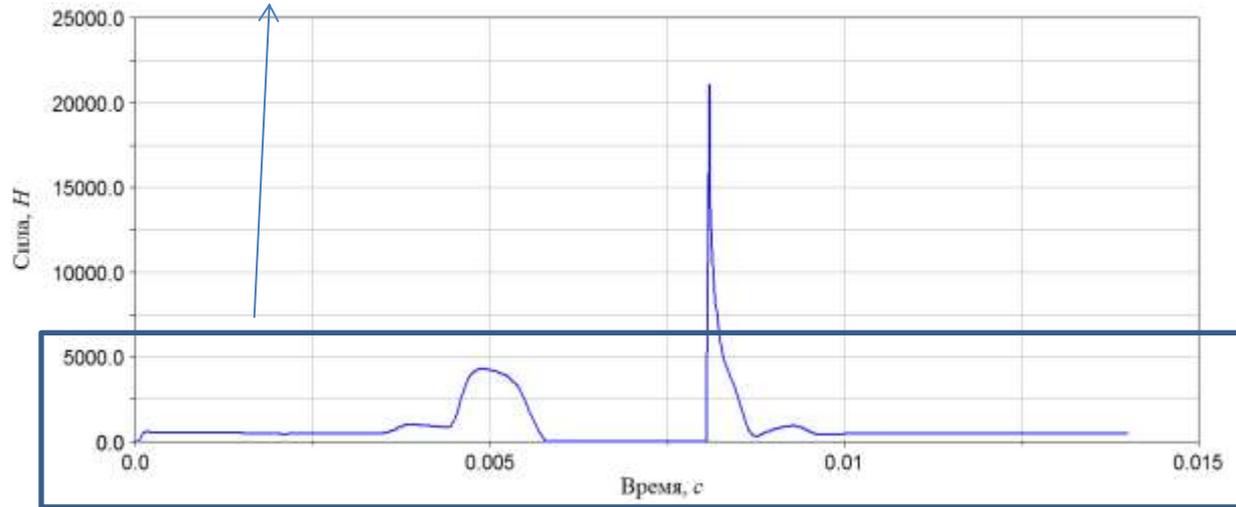
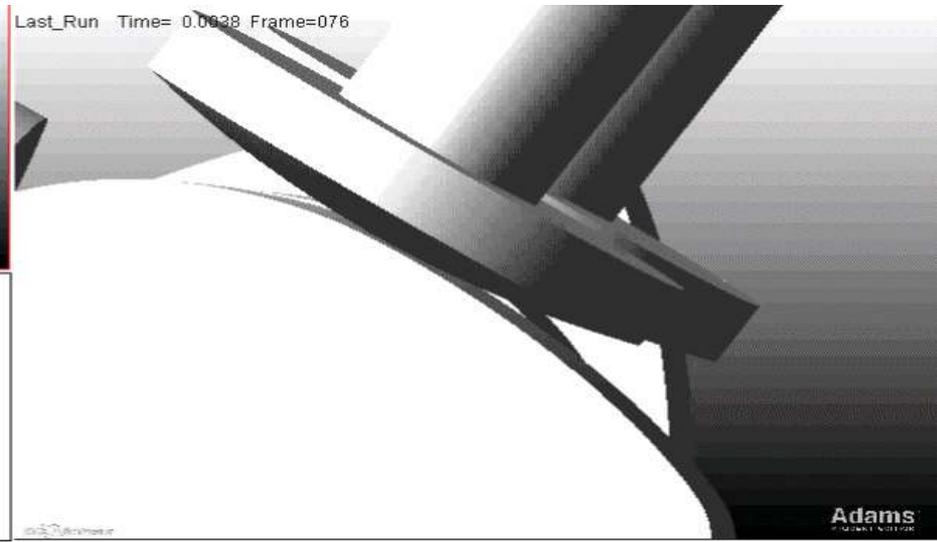
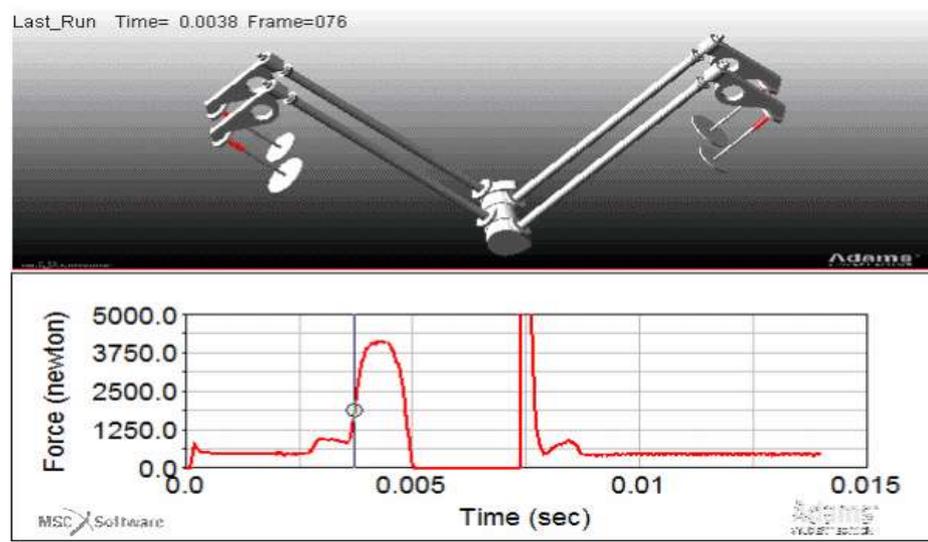
•3000 об/мин



$$F_{max} \approx 2280 \text{ Н}$$

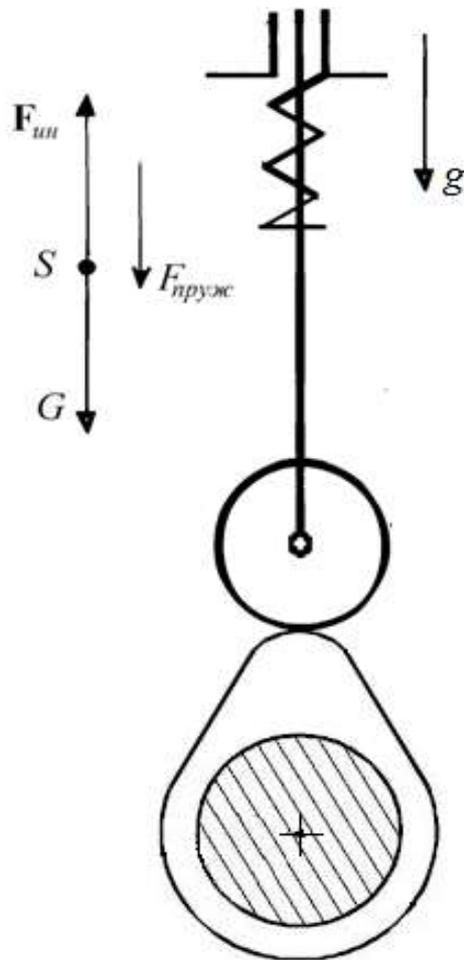
# Вычислительные результаты

•5000 об/мин



$$\tau_{\text{завис}} \approx 2.2 \text{ мс}$$

## Силовое замыкание



Условие силового замыкания:

$$F_{пруж} + G \geq F_{ин}$$

$$F_{ин} = -ma_s = -m * \frac{d^2S}{dt^2}; \quad G = mg,$$

$$F_{пруж} + m * \left( \frac{d^2S}{dt^2} + g \right) = F_{контакт} \geq 0$$

$$\frac{d^2S}{dt^2} \gg g \rightarrow F_{контакт} \approx F_{пруж} + m * \frac{d^2S}{dt^2} \quad (1)$$

## Параметры оптимизации

$$\varphi_{\text{выпуск}} \in [0^\circ; 180^\circ]$$

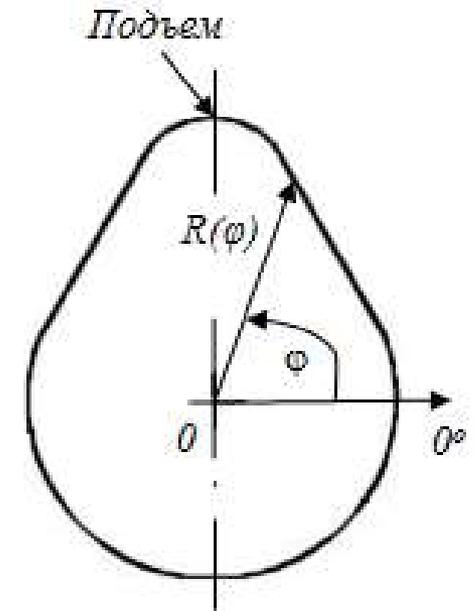
$$\varphi_{\text{симметрия}} = 90^\circ, \text{ тогда}$$

задаем функцию контура на отрезке:

$$\varphi \in [0^\circ; 90^\circ] \quad \text{или} \quad x \in [0\text{мм}; 21\text{мм}]$$

### Ограничения:

1. Согласно формуле (1) функция контура – гладкая  $\left(\frac{d^2S}{dt^2} - \text{огр.}\right)$
2. Подъем постоянен



## Параметры оптимизации

### Способ 1:

$$f(x) = g_{\text{исх}}(x) + \sum_1^5 a_i y_i(x)$$

$$\begin{cases} x_{11} = 0 \text{ мм} \\ x_{2j} = x_{1(j+2)}, j = \overline{1,3} \\ x_{25} = 21 \text{ мм} \end{cases}$$



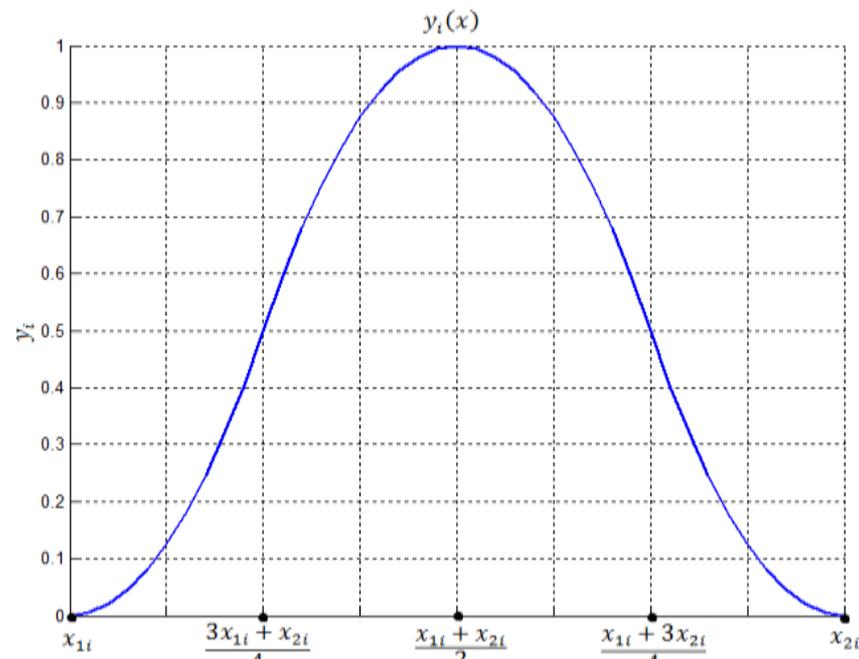
$$l_j = x_{2j} - x_{1j}, j = \overline{1,5}$$

## Параметры оптимизации

### Способ 1:

$$f(x) = g_{\text{исх}}(x) + \sum_1^5 a_i y_i(x)$$

•  $i=1..4$ :



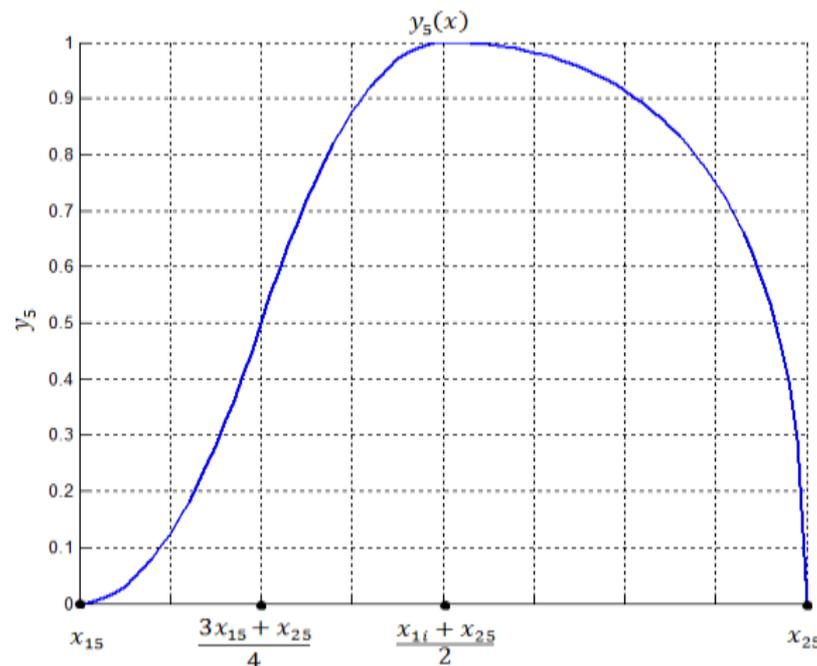
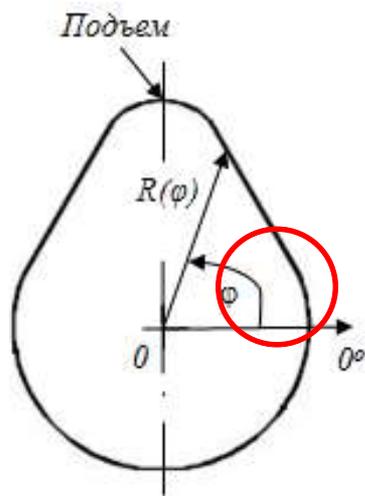
$$y_i(x) = \frac{1}{2} * \begin{cases} \left(\frac{x - x_{1i}}{l_i/4}\right)^2, & \text{при } x_{1i} \leq x < \frac{3x_{1i} + x_{2i}}{4} \\ -\left(\frac{x - \frac{x_{1i} + x_{2i}}{2}}{l_i/4}\right)^2 + 2, & \text{при } \frac{3x_{1i} + x_{2i}}{4} \leq x < \frac{x_{1i} + 3x_{2i}}{4} \\ \left(\frac{x - x_{2i}}{l_i/4}\right)^2, & \text{при } \frac{x_{1i} + 3x_{2i}}{4} \leq x < x_{2i} \end{cases}$$

## Параметры оптимизации

### Способ 1:

$$f(x) = g_{\text{исх}}(x) + \sum_1^5 a_i y_i(x)$$

•  $i=5$ :

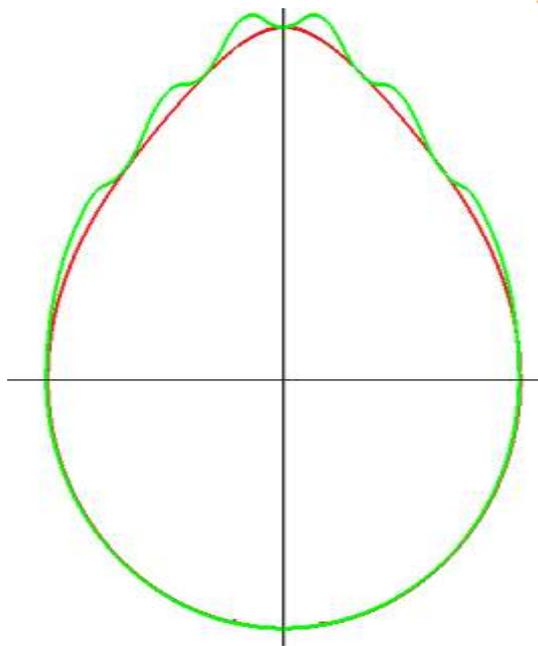


$$y_5(x) = \frac{1}{2} * \begin{cases} \left(\frac{x - x_{15}}{l_5/4}\right)^2, & \text{при } x_{15} \leq x < \frac{3x_{15} + x_{25}}{4} \\ \left(\frac{x - \frac{x_{15} + x_{25}}{2}}{l_5/4}\right)^2 + 2, & \text{при } \frac{3x_{15} + x_{25}}{4} \leq x < \frac{x_{15} + x_{25}}{2} \\ \left(\frac{x - x_{25}}{l_5/4}\right)^2, & \text{при } \frac{x_{15} + x_{25}}{2} \leq x \leq x_{25} \end{cases}$$

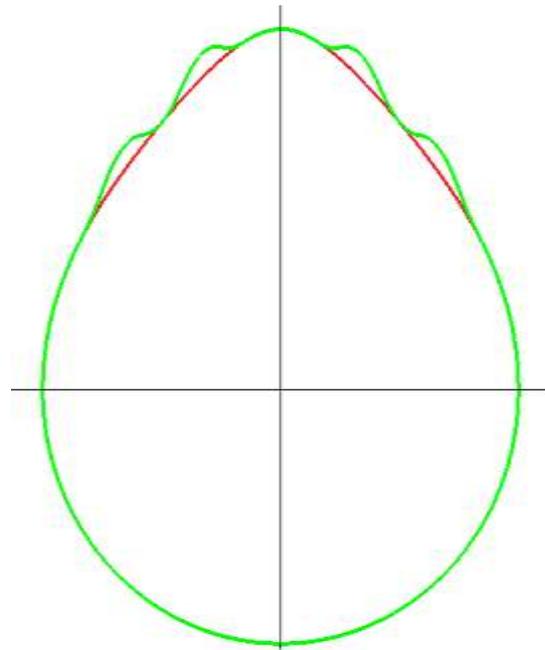
## Параметры оптимизации

### Способ 1:

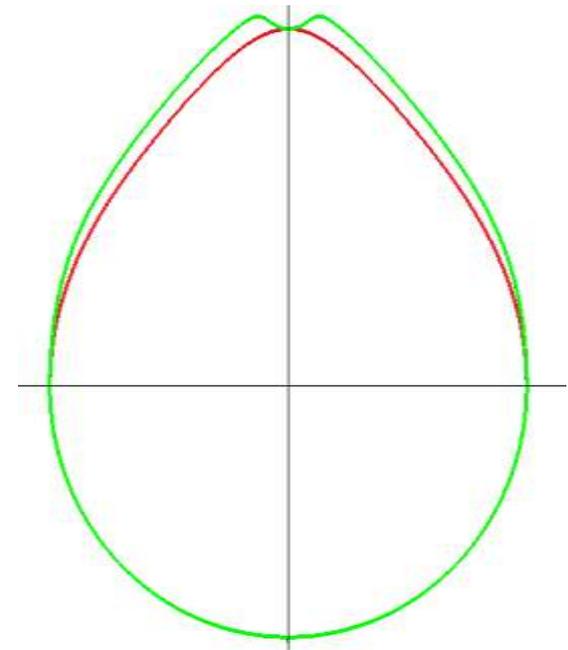
$$f(x) = g_{\text{исх}}(x) + \sum_1^5 a_i y_i(x)$$



$$a_1 = a_3 = a_5 = 2$$



$$a_2 = a_4 = 2$$



$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = 2$$

Итого, 5 параметров.

## Параметры оптимизации

### Способ 2:

$$R(\varphi) = \rho_{\text{исх}}(\varphi) + \sum_1^5 a_i r_i(\varphi)$$

$$\begin{cases} \varphi_{11} = 0^\circ \\ \varphi_{2j} = \varphi_{1(j+2)}, j = \overline{1,3} \\ \varphi_{25} = 90^\circ \end{cases}$$

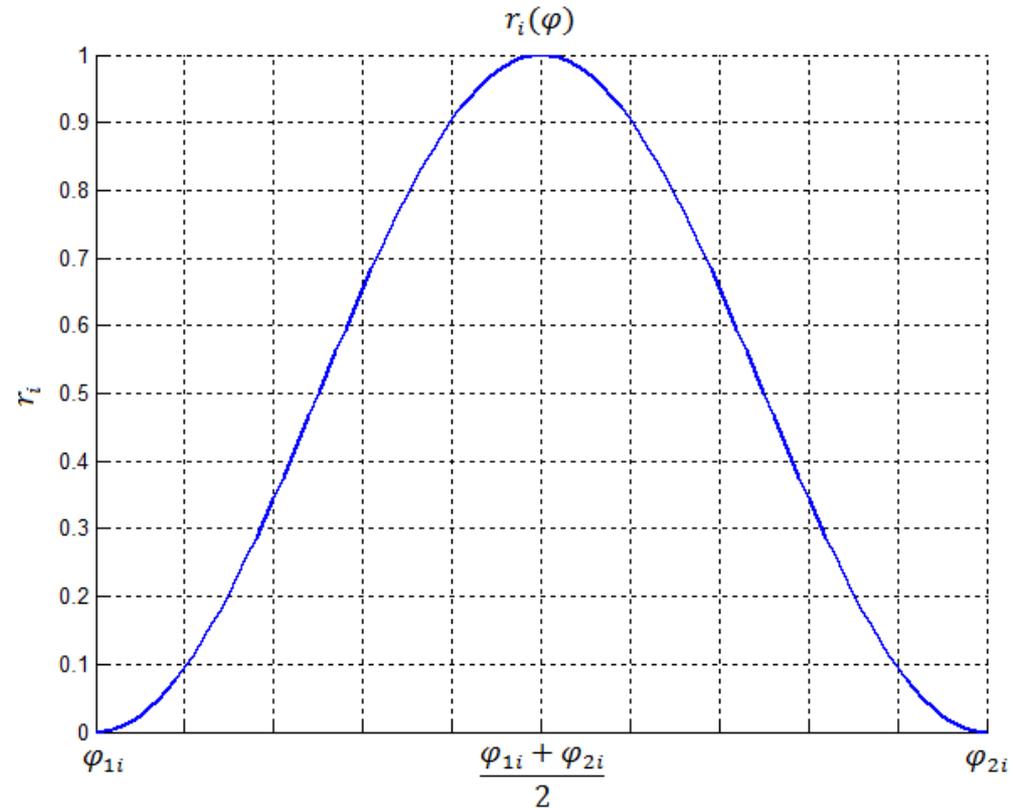


$$l_j = \varphi_{2j} - \varphi_{1j}, j = \overline{1,5}$$

## Параметры оптимизации

### Способ 2:

$$R(\varphi) = \rho_{\text{исх}}(\varphi) + \sum_1^5 a_i r_i(\varphi)$$



$$r_i(\varphi) = \cos^2\left(\frac{\pi}{l_i} * \left(\varphi - \frac{\varphi_{1i} + \varphi_{2i}}{2}\right)\right), \text{ при } \varphi_{1i} \leq \varphi < \varphi_{2i}$$

Итого, 5 параметров.

## Параметры оптимизации

### Способ 3:

$$R = \sum_0^8 a_i (\varphi/90^\circ)^i$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R(0^\circ) = 21 = a_0 \left( \frac{0^\circ}{90^\circ} \right)^0 \rightarrow a_0 = 21 \\ R'(0^\circ) = 0 = \frac{a_1}{90^\circ} \rightarrow a_1 = 0 \\ R(90^\circ) = \text{const} = \text{top} = \sum_{i=2}^8 a_i + 21 \\ R'(90^\circ) = 0 = \frac{1}{90^\circ} \sum_{i=2}^8 i a_i \end{array} \right.$$

## Параметры оптимизации

### Способ 3:

$$R = \sum_0^8 a_i (\varphi/90^0)^i$$

$$\begin{cases} a_7 + a_8 = (c - 21) - \sum_{j=2}^6 a_j \\ 7a_7 + 8a_8 = - \sum_{j=2}^6 ja_j \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_7 = 8 * \left( top - 21 - \sum_{j=2}^6 a_j \right) + 1 * \sum_{j=2}^6 ja_j \\ a_8 = (-7) * \left( top - 21 - \sum_{j=2}^6 a_j \right) + (-1) * \sum_{j=2}^6 ja_j \end{cases}$$

Итого, 5 параметров.

$$X = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} \quad - \text{ вектор параметров.}$$



## Целевая функция

$$f_{\text{цел}} = \max(F_{3000 \text{ об/мин}})$$

### Задача оптимизации:

Найти:

$$X^* \in R^n, \text{ такой что: } f(X^*) = \min f(X)$$

При условии, что:

$$X_l \leq X^* \leq X_u, \text{ где:}$$

$X_l$  — ограничение на выбор параметров снизу

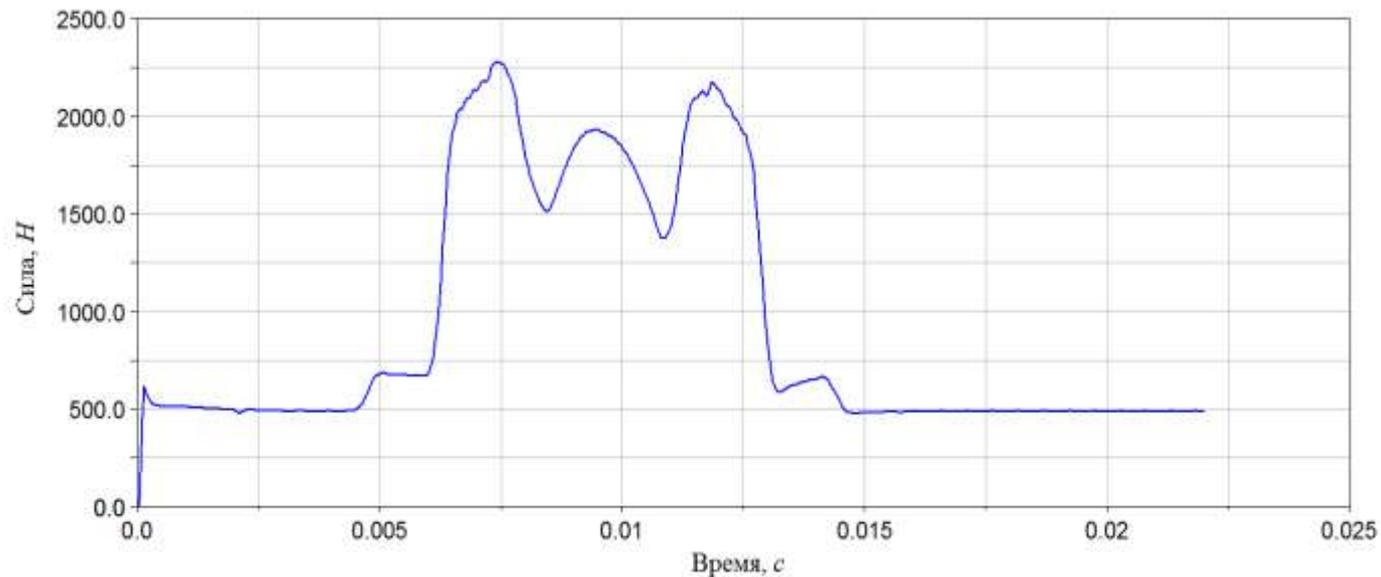
$X_u$  — ограничение на выбор параметров сверху

Итого, 5 параметров.

## Результаты оптимизации

### Способ 1:

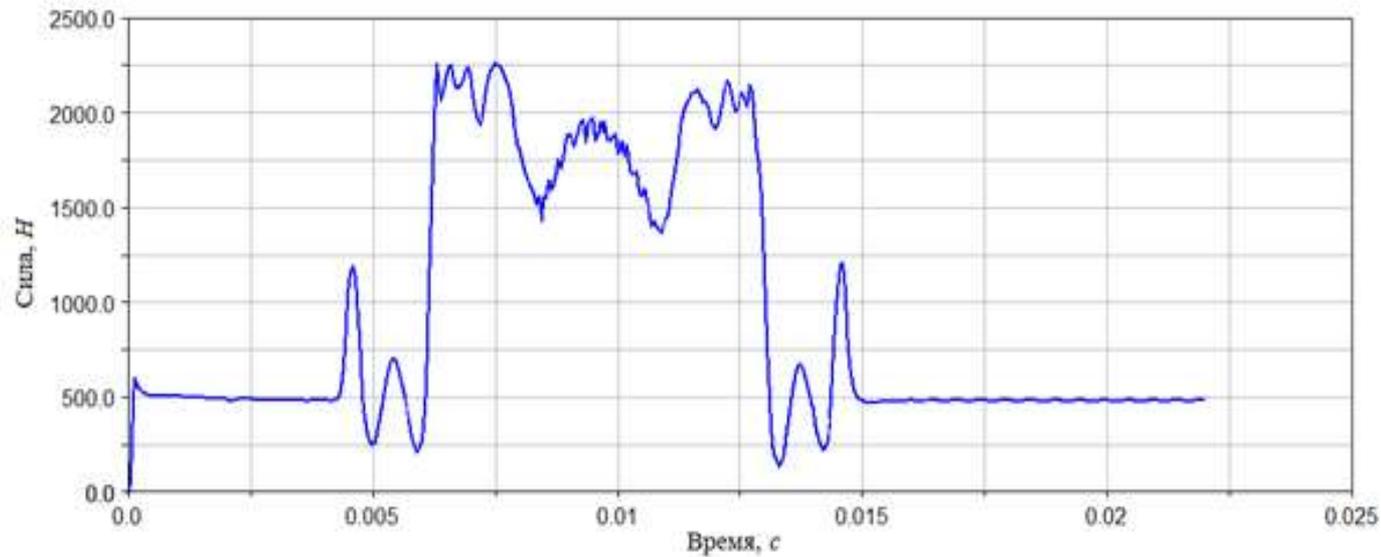
$$X_a^* = X_a^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ мм}; \quad f_{\text{цел}}(X_a^*) \approx 2280 \text{ Н}$$



## Результаты оптимизации

### Способ 2:

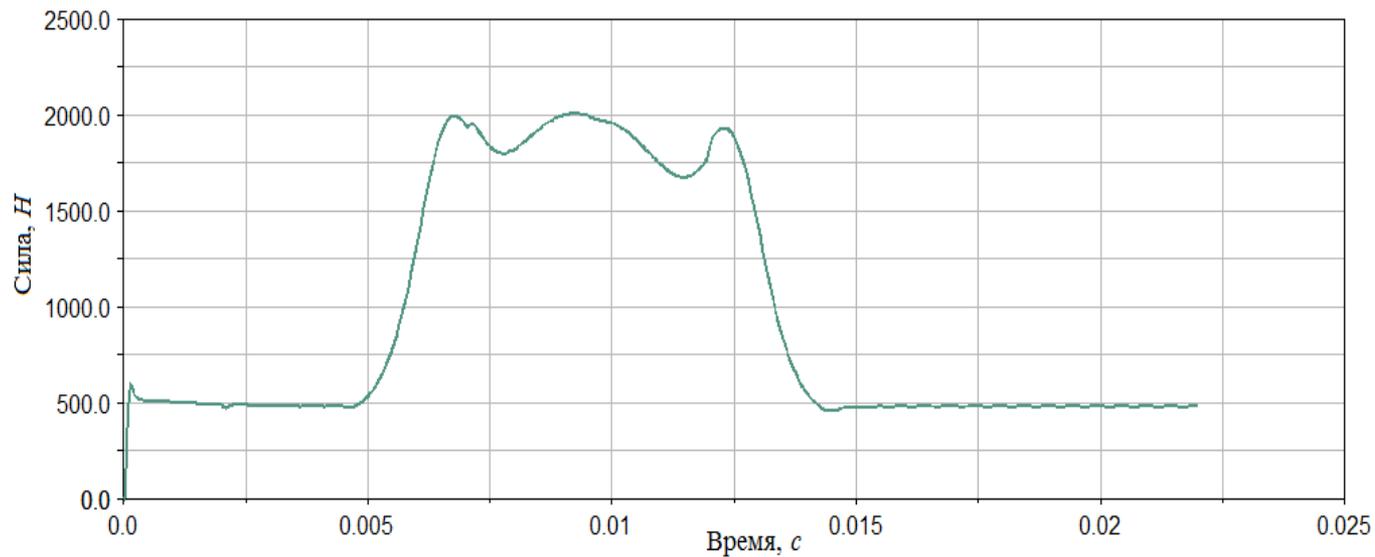
$$X_6^* = \begin{bmatrix} 0.19 \\ 0.18 \\ -0.05 \\ -0.07 \\ -0.05 \end{bmatrix} \text{ мм}; \quad f_{\text{цел}}(X_6^*) \approx 2260 \text{ Н}$$



## Результаты оптимизации

### Способ 3:

$$X_B^* = \begin{bmatrix} -1.1 \\ 0.1 \\ 46.8 \\ -28 \\ -99.5 \end{bmatrix} \text{ мм}; \quad f_{\text{цел}}(X_B^*) \approx 2000 \text{ Н}$$



## Выбор параметров и оценка оптимизации

$$\delta = 100\% * \left( 1 - \frac{F_{\max \text{ опт}}}{F_{\max \text{ нач}}} \right)$$

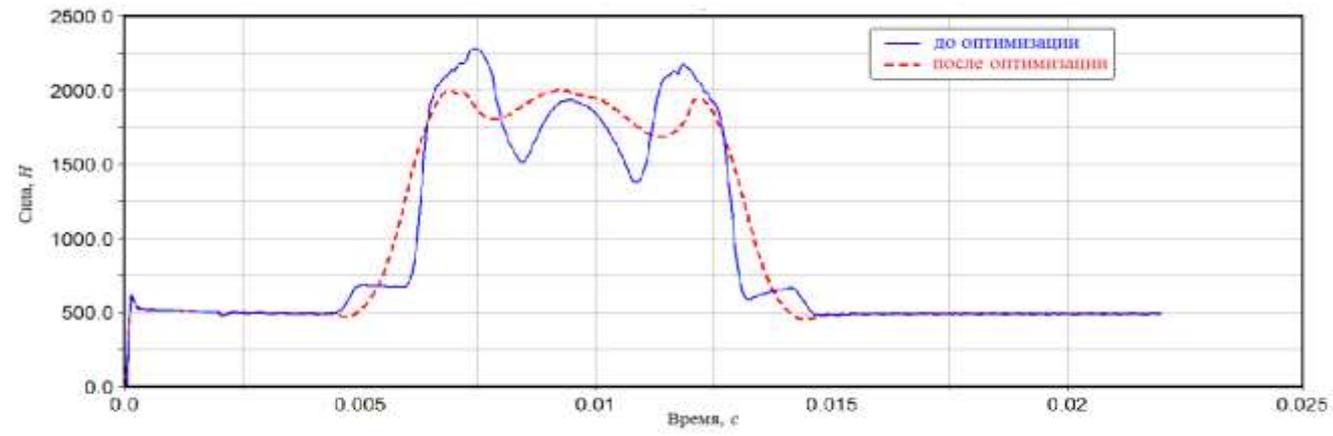
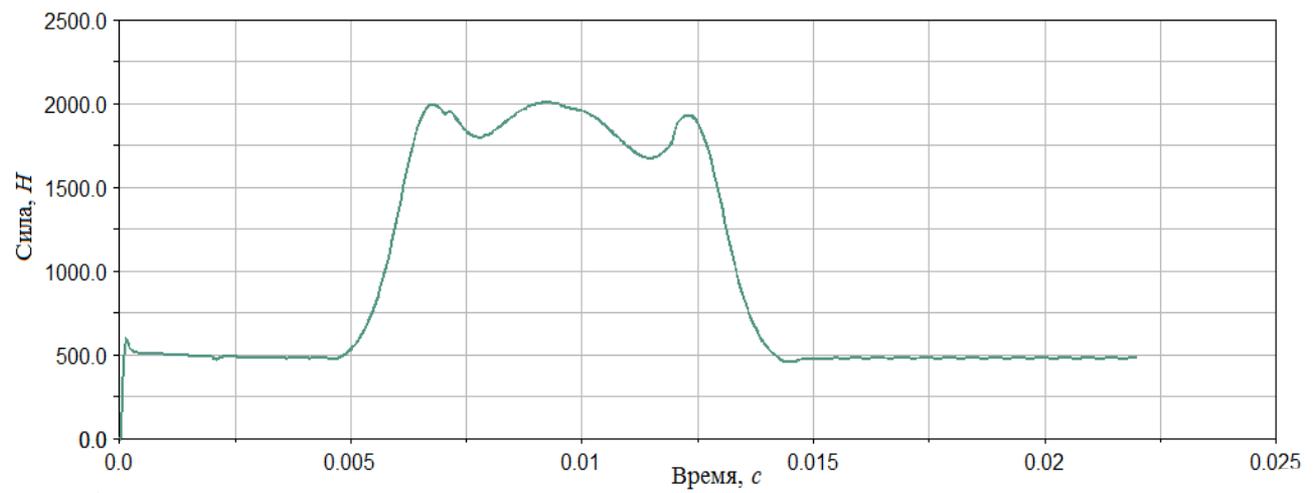
• Способ 1:  $\delta_1 \lll 1\%$

• Способ 2:  $\delta_2 \approx 1\%$

• Способ 3:  $\delta_3 \approx 12\%$  

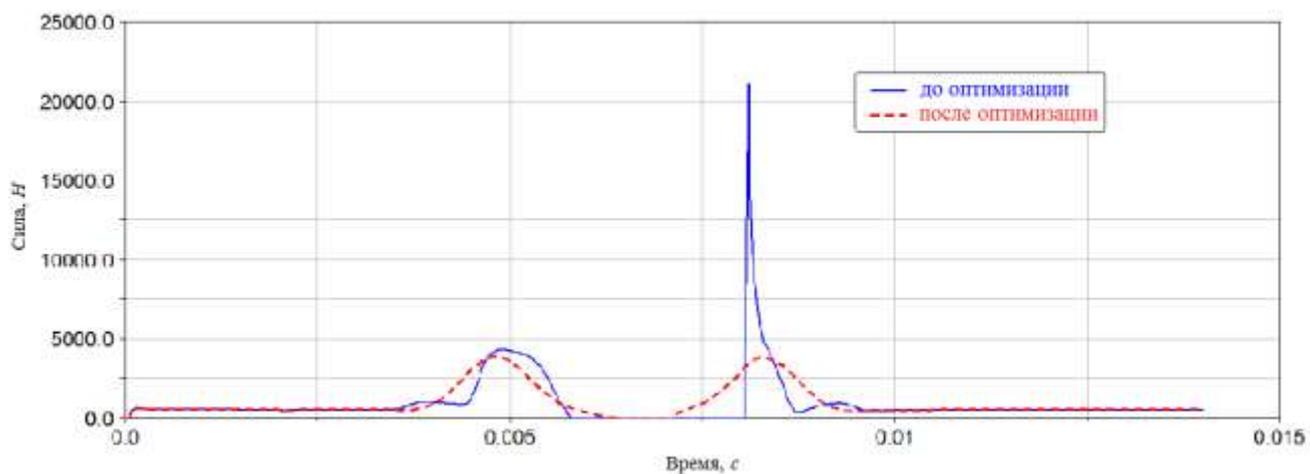
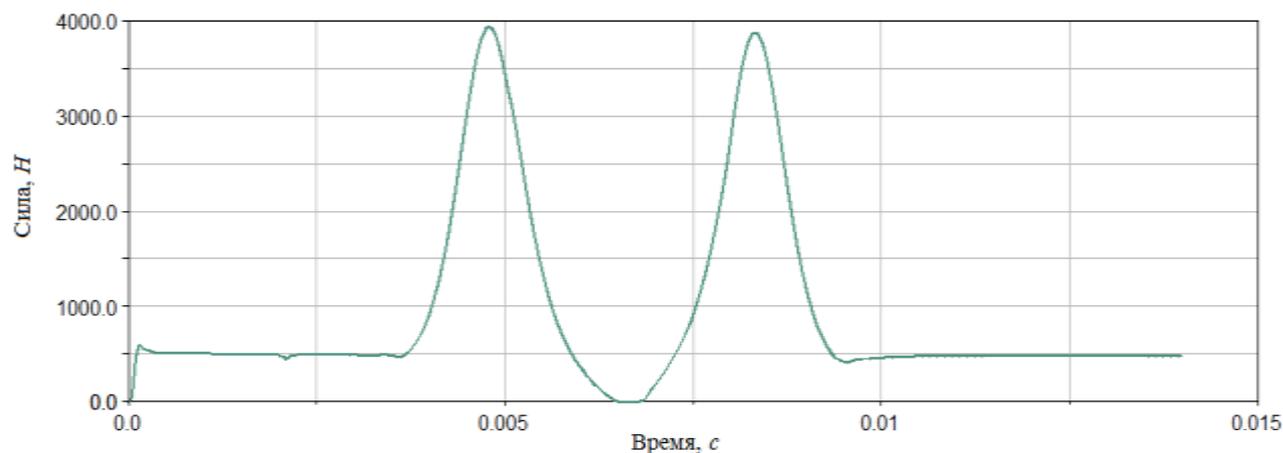
# Выбор параметров и оценка оптимизации

•3000 об/мин



## Выбор параметров и оценка оптимизации

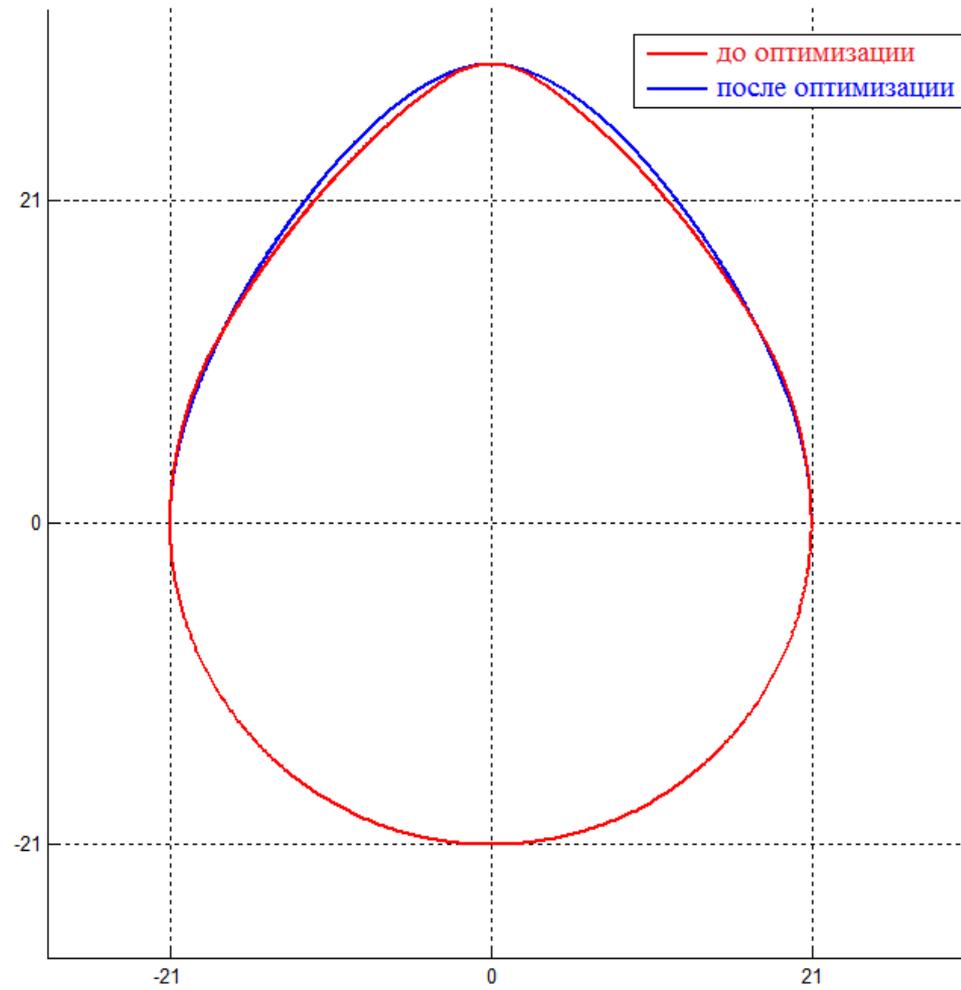
•5000 об/мин



$\tau_{\text{завис нач}} \approx 2.2 \text{ мс}$

$\tau_{\text{завис опт}} \approx 0.3 \text{ мс}$

## Выбор параметров и оценка оптимизации



## Заключение

- ✓ Построена модель ГРМ и найдена характерная зависимость  $F_{\text{конт}}(t)$
- ✓ Предложены 3 способа параметризации задачи оптимизации
- ✓ Проведена оптимизация геометрических характеристик кулачков распределительного вала ГРМ.  
В результате:
  - ✓ При 6000 об/мин коленчатого вала пиковые значения силы контакта упали на 12%
  - ✓ При 10000 об/мин коленчатого вала удалось избавиться от жесткого удара
  - ✓ При 10000 об/мин время зависания кулачков упало с 2.2мс до 0.3мс
- ✓ Показана возможность и эффективность использования применяемой методики для проведения оптимизации геометрических параметров элементов механической системы автомобиля с целью повышения их износостойкости.





**Спасибо за внимание!**