Подключение библиотек

Основные уравнения, алгоритмы, зависимости и ф-и

▶ Параметры расчета

Исходные данные

Коэф. запаса: $safety = 1.3$

Горючее: $Fuel = "Керосин"$

$turbine = "ТВД"$

Высота движения (м): $H_{\upsilon} = 0$

Массовый расход перед Т (кг/с):
Массовый расход утечек Т (кг/с):
Массовый расход на охл Т (кг/с):

$$\begin{pmatrix} G_{г} \\ G_{leak} \\ G_{cooling} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} 32.30 \\ 106.96\cdot10^{-3} \\ 3240.8\cdot10^{-3} \end{pmatrix} \text{ if } turbine = "ТВД" \\ \begin{pmatrix} 35.43 \\ 35.65\cdot10^{-3} \\ 810.2\cdot10^{-3} \end{pmatrix} \text{ if } turbine = "ТНД" \end{array} \right. =$$

	1
1	32.30
2	0.11
3	3.24

Мощность Т (Вт): $$N_T = 10^{6}\cdot \left| \begin{array}{l} 14.893 \text{ if } turbine = "ТВД" \\ 15.181 \text{ if } turbine = "ТНД" \end{array} \right. = 14.893\cdot10^{6}$$

Полное давление перед Т (Па): $$P*_{г} = 10^{3}\cdot \left| \begin{array}{l} 2731.8 \text{ if } turbine = "ТВД" \\ 927.5 \text{ if } turbine = "ТНД" \end{array} \right. = 2731.8\cdot10^{3}$$

Полная температура перед Т (К): $$T*_{г} = \left| \begin{array}{l} 1773 \text{ if } turbine = "ТВД" \\ 1368.9 \text{ if } turbine = "ТНД" \end{array} \right. = 1773.0$$

Коэф. избытка воздуха в Т: $$\alpha_{ox} = \left| \begin{array}{l} 2.267 \text{ if } turbine = "ТВД" \\ 2.493 \text{ if } turbine = "ТНД" \end{array} \right. = 2.267$$

Полное давление отбора охлаждающего воздуха (К): $$P*_{cooling} = 10^{3}\cdot \left| \begin{array}{l} 2845.6 \text{ if } turbine = "ТВД" \\ 319.4 \text{ if } turbine = "ТНД" \end{array} \right. = 2845.6\cdot10^{3}$$

Полная температура отбора охлаждающего воздуха (К): $$T*_{cooling} = \left| \begin{array}{l} 806.9 \text{ if } turbine = "ТВД" \\ 418.2 \text{ if } turbine = "ТНД" \end{array} \right. = 806.9$$

Коэф. сохранения полного давления охлаждения: $\sigma_{cooling} = 0.97$

Подогрев охл. от КС [К]: $\Delta T_{охл.подогрев} = 40$

Газовая постоянная (Дж/кг/К): $R_{газ}(\alpha_{ox}, Fuel) = 288.5$

Допустимая температура Л (К): $T_{Л.доп} = 1373$

Абс. скорость перед Т (м/с):

Абс. скорость после Т (м/с):

$$\begin{pmatrix} c_{\text{Г}} \\ c_{\text{Т}} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} 100 \\ 180 \end{pmatrix} & \text{if turbine} = \text{"ТВД"} \\ \begin{pmatrix} 180 \\ 260 \end{pmatrix} & \text{if turbine} = \text{"ТНД"} \end{array} \right. =$$

	1
1	100.0
2	180.0

[1, с.15] $80 \le c_{\text{Т}} \le 400 = 1$

Лопаточный КПД Т: $\eta_{\text{Л}} = 88\%$

$88\% \le \eta_{\text{Л}} \le 95\% = 1$

Угол входа в Т: $\alpha_{\text{Г}} = 90 \cdot °$

Окр. скорость Л последней ступени на ср. диаметре Т (м/с):

$$u_{\text{Т}} = \left| \begin{array}{ll} 520 & \text{if turbine} = \text{"ТВД"} \\ 260 & \text{if turbine} = \text{"ТНД"} \end{array} \right. = 520.0$$

Исходные данные

Основне размеры Т

$z = \mathrm{ORIGIN}..N_r$

Полное давление отбора охлаждающего воздуха (К): $P^*_{cooling} = P^*_{cooling} \cdot \sigma_{cooling} = 2760.2 \cdot 10^3$

Полная температура отбора охлаждающего воздуха (К): $T^*_{cooling} = T^*_{cooling} + \Delta T_{охл.подогрев} = 846.9$

Массовый расход перед Т (кг/с): $G_г = G_г - G_{leak} = 32.2$

Массовый расход после Т (кг/с): $G_т = G_г + G_{cooling} = 35.4$

Удельная работа Т (Дж/кг): $L^*_T = \dfrac{N_T}{\mathrm{mean}(G_г, G_т)} = 440.4 \cdot 10^3$

$L^*_T \le 550 \cdot 10^3 = 1$

Располагаемый теплоперепад в Т (Дж/кг): $H_T = \dfrac{L^*_T + 0.5 c_т^2}{\eta_л} = 518.9 \cdot 10^3$

$$\begin{pmatrix} \text{iteration} \\ k_{г} \\ P_{г} \\ T_{г} \end{pmatrix} =$$

```
$\text{iteration} = 0$
$k_{г} = k_{ад}\left(Cp_{газ}\left(P^*_{г}, T^*_{г}, \alpha_{ох}, \text{Fuel}\right), R_{газ}\left(\alpha_{ох}, \text{Fuel}\right)\right)$
while $1 > 0$
    $\text{iteration} = \text{iteration} + 1$
    $Cp_{г} = \frac{k_{г}}{k_{г} - 1} \cdot R_{газ}\left(\alpha_{ох}, \text{Fuel}\right)$
    $T_{г} = T^*_{г} - \frac{c_{г}^{2}}{2 \cdot Cp_{г}}$
    $P_{г} = P^*_{г} \cdot \left(\frac{T_{г}}{T^*_{г}}\right)^{\frac{k_{г}}{k_{г}-1}}$
    $k'_{г} = k_{ад}\left(Cp_{газ}\left(P_{г}, T_{г}, \alpha_{ох}, \text{Fuel}\right), R_{газ}\left(\alpha_{ох}, \text{Fuel}\right)\right)$
    if $\left|eps\left(\text{"rel"}, k_{г}, k'_{г}\right)\right| \le epsilon$
        $k_{г} = k'_{г}$
        break
    $k_{г} = k'_{г}$
$\left(\text{iteration} \quad k_{г} \quad P_{г} \quad T_{г}\right)^{T}$
```

=

	1
1	1.0
2	1.3
3	2705198.4
4	1769.2

Количество итераций: $\text{iteration} = 1$

Показатель адиабаты перед Т: $k_{г} = 1.283$

Статическое давление перед Т (Па): $P_{г} = 2705.2 \cdot 10^{3}$

Статическая температура перед Т (К): $T_{г} = 1769.2$

Теплоемкость перед Т (Дж/кг/К): $Cp_{г} = Cp_{газ}\left(P_{г}, T_{г}, \alpha_{ох}, \text{Fuel}\right) = 1309$

$$\begin{pmatrix} \text{iteration} \\ k_т \\ P_т \\ T_т \end{pmatrix} =$$

```
$iteration = 0$
$k_т = k_г$
while $1 > 0$
    $iteration = iteration + 1$
    $k_{ср} = mean(k_г, k_т)$
    $Cp = \frac{k_{ср}}{k_{ср} - 1} \cdot R_{газ}(\alpha_{ох}, Fuel)$
    $P_т = P*_г \cdot \left(1 - \frac{H_т}{Cp \cdot T*_г}\right)^{\frac{k_{ср}}{k_{ср}-1}}$
    $T_т = T*_г - \frac{H_т \cdot \eta_л}{Cp}$
    $k'_т = k_{ад}(Cp_{газ}(P_т, T_т, \alpha_{ох}, Fuel), R_{газ}(\alpha_{ох}, Fuel))$
    if $|eps("rel", k_т, k'_т)| \le epsilon$
        $k_т = k'_т$
        break
    $k_т = k'_т$
$(iteration \;\; k_т \;\; P_т \;\; T_т)^T$
```

=

	1
1	1
2	1.293
3	866477.23
4	1424.088

Количество итераций: $iteration = 1$

Показатель адиабаты после Т: $k_т = 1.293$

Статическое давление после Т (Па): $P_т = 866.5 \cdot 10^3$ $P_т \ge P_{атм}(H_υ) = 1$

Статическая температура после Т (К): $T_т = 1424.1$

Теплоемкость после Т (Дж/кг/К): $Cp_т = Cp_{газ}(P_т, T_т, \alpha_{ох}, Fuel) = 1271.6$

Ср. показатель адиабаты Т: $k = \mathrm{mean}(k_{Г}, k_{Т}) = 1.288$

Ср. теплоемкость Т (Дж/кг/К): $Cp = \frac{k}{k-1} \cdot R_{газ}(\alpha_{ox}, Fuel) = 1289.8$

Степень понижения давления: $\pi_{Т} = \frac{P*_{Г}}{P_{Т}} = 3.15$

Удельный объём перед Т ($м^3$/кг):
Удельный объём после Т ($м^3$/кг):

$$\begin{pmatrix} v_{Г} \\ v_{Т} \end{pmatrix} = R_{газ}(\alpha_{ox}, Fuel) \cdot \begin{pmatrix} \frac{T_{Г}}{P_{Г}} \\ \frac{T_{Т}}{P_{Т}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	0.189
2	0.474

Площадь кольцевого сечения перед Т ($м^2$):
Площадь кольцевого сечения после Т ($м^2$):

$$\begin{pmatrix} F_{Г} \\ F_{Т} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{G_{Г} \cdot v_{Г}}{c_{Г}} \\ \frac{G_{Т} \cdot v_{Т}}{c_{Т}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	60741
2	93341

$\cdot 10^{-6}$

▲ Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

Коэф. использования скорости: $\mu_c = \text{mean}(0.7, 1) = 0.9$ $0.7 \le \mu_c \le 1 = 1$

Определение количества ступеней Т

```
$\begin{pmatrix} Z_{recomend} \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} :=$
    $c_{cp} \leftarrow \text{mean}(c_г, c_т)$
    $\alpha_{возв} \leftarrow 0.025$
    while $1 > 0$
        $Z \leftarrow \text{round}\left[\dfrac{2 \cdot H_T \cdot \dfrac{(1+\alpha_{возв})}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2} - 1}{\dfrac{u_т{}^2}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2 \cdot y_0{}^2} - 1}\right]$
        break if $\left|\text{eps}\left[\text{"rel"}, \alpha_{возв}, \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_T{}^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_л)\right]\right| < \text{epsilon}$
        $\alpha_{возв} \leftarrow \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_T{}^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_л)$
        if $\alpha_{возв} = 0$
            $\begin{pmatrix} Z \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
            break
    $\begin{pmatrix} Z \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix}$
=
```

	1
1	1.000
2	0.000

Рекомендуемое количество ступеней: $Z_{recomend} = 1$

Количество ступеней: $Z := \begin{cases} 1 & \text{if } turbine = \text{"ТВД"} \\ 4 & \text{if } turbine = \text{"ТНД"} \end{cases} = 1$

Дискретизация ступеней: $i := 1..Z$

Дискретизация сечений: $ii := 1..2 \cdot Z + 1$

Определение количества ступеней Т

Выбранный материал Л:

$$\text{material\_blade}_i = \begin{cases} \text{"ВКНА-1В"} & \text{if } 1523 \le T^*_г \\ \text{"ВЖМ7"} & \text{if } 1323 \le T^*_г < 1523 \\ \text{"ЖС-36"} & \text{if } 1123 \le T^*_г < 1323 \end{cases}$$

Плотность материала Л (кг/м^3):

$$\rho\_\text{blade}_i = \begin{cases} 7938 & \text{if material\_blade}_i = \text{"ВКНА-1В"} \\ 8390 & \text{if material\_blade}_i = \text{"ВЖМ7"} \\ 8760 & \text{if material\_blade}_i = \text{"ЖС-36"} \\ \text{NaN} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Предел длительной прочности Л РК (Па):

$$\sigma\_\text{blade\_long}_i = 10^6 \cdot \begin{cases} 205 & \text{if material\_blade}_i = \text{"ВКНА-1В"} \\ 120 & \text{if material\_blade}_i = \text{"ВЖМ7"} \\ 120 & \text{if material\_blade}_i = \text{"ЖС-36"} \\ \text{NaN} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{material\_blade}^T = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & \text{"ВКНА-1В"} \\ \hline \end{array}$$

$$\rho\_\text{blade}^T = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 7938 \\ \hline \end{array}$$

$$\sigma\_\text{blade\_long}^T = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 205 \\ \hline \end{array} \cdot 10^6$$

Коэф. формы: $k_n = 6.8$

Модуль Юнга I рода материала Л (Па): $E\_\text{blade} = 210 \cdot 10^9$

Коэф. Пуассона материала Л (): $\mu\_\text{steel} = 0.3$

Частота вращения Т

Мах частота вращения ротора на входе (об/мин): $\sqrt{\dfrac{\sigma\_\text{blade}\_\text{long}_Z}{\text{safety}\cdot k_n\cdot F_\text{г}}} = 19539$

Мах частота вращения ротора на выходе (об/мин): $n_\text{max} = \sqrt{\dfrac{\sigma\_\text{blade}\_\text{long}_Z}{\text{safety}\cdot k_n\cdot F_\text{т}}} = 15762$

Рекомендукмая ном. частота вращения (об/мин): $n = n_\text{max}\cdot 0.95 = 14974$

$$n = \begin{cases} 15000 & \text{if turbine} = \text{"ТВД"} \\ 5300 & \text{if turbine} = \text{"ТНД"} \end{cases} = 15000$$

Ном. частота вращения (рад/с): $\omega = \dfrac{2\cdot\pi\cdot n}{60} = 1570.8$

Ср. диаметр перед Т (м):

Ср. диаметр после Т (м):

$$\begin{pmatrix} D_\text{г.ср} \\ D_\text{т.ср} \end{pmatrix} = \frac{2}{\omega}\cdot\begin{pmatrix} u_\text{г} \\ u_\text{т} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 662.1 \\ 2 & 662.1 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Длина Л первой ступени Т (м):

Длина Л последней ступени Т (м):

$$\begin{pmatrix} l_\text{г} \\ l_\text{т} \end{pmatrix} = \frac{1}{\pi}\cdot\begin{pmatrix} \dfrac{F_\text{г}}{D_\text{г.ср}} \\ \dfrac{F_\text{т}}{D_\text{т.ср}} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 29.20 \\ 2 & 44.88 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{l_\text{г}}{D_\text{г.ср}} = \frac{1}{22} \qquad \frac{l_\text{т}}{D_\text{т.ср}} = \frac{1}{14}$$

Диаметр периферии после Т (м):

Диаметр корня после Т (м):

$$\begin{pmatrix} D_\text{т.пер} \\ D_\text{т.кор} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_\text{т.ср} + l_\text{т} \\ D_\text{т.ср} - l_\text{т} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 707.0 \\ 2 & 617.2 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Частота вращения Т

Равномерное распределение мощности Т по ступеням (Вт): $N_{\text{ст}_i} = \frac{N_T}{Z}$

$N_{\text{ст}}^{T} =$

	1
1	14.89

$\cdot 10^{6}$

Вид проточной части:
("const", "кор", "ср", "пер","доля от предыдущего диаметра периферии")

$$\text{ЗППЧ} = \begin{pmatrix} \left| \begin{array}{ll} \text{"const"} & \text{if } Z = 1 \\ \text{"кор"} & \text{otherwise} \end{array} \right. & \text{"1.07"} & \text{"1.065"} & \text{"1.03"} & \text{"пер"} & \text{"пер"} \\ \left| \begin{array}{ll} \text{"пер"} & \text{if } Z = 1 \\ \text{"1.055"} & \text{otherwise} \end{array} \right. & \text{"1.07"} & \text{"1.05"} & \text{"кор"} & \text{"пер"} & \text{"пер"} \end{pmatrix}^{T}$$

Определение проточной части ОТ

Линейное распределение кольцевых площадей по сечениям:

```
F =  for i ∈ 1 .. 2Z + 1
       $F_i = \frac{F_T - F_Г}{st(Z,3) - 1} \cdot i + \left(F_Г - \frac{F_T - F_Г}{st(Z,3) - 1}\right)$
     for i ∈ 1 .. Z
       for a ∈ 2 .. 3
         $F_{st(i,a)} = F_{st(i,a-1)}$ if $ЗППЧ_{i,a-1} = "const"$
     F
```

$F^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	60741	60741	93341						

$\cdot 10^{-6}$

```
$D =$
  for $i \in 2Z + 1$
    for $r \in 1 .. N_r$
      $D_{i,r} =$
        $D_{т.кор}$  if $r = 1$
        $D_{т.ср}$  if $r = av(N_r)$
        $D_{т.пер}$  if $r = N_r$
  for $i \in Z .. 1$
    for $a \in 2 .. 1$
      for $r \in 1 .. N_r$
        $D_{st(i,a),r} =$
          if $ЗППЧ_{i,a} = "const"$
            $D_{st(i,a+1),av(N_r)} - \frac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}}$  if $r = 1$
            $D_{st(i,a+1),av(N_r)}$  if $r = av(N_r)$
            $D_{st(i,a+1),av(N_r)} + \frac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}}$  if $r = N_r$
          if $ЗППЧ_{i,a} = "кор"$
            $D_{st(i,a+1),1}$  if $r = 1$
            $\frac{1}{2} \cdot \left[ D_{st(i,a+1),1} + \sqrt{\left(D_{st(i,a+1),1}\right)^2 + \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} \right]$  if $r = av(N_r)$
            $\sqrt{\left(D_{st(i,a+1),1}\right)^2 + \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}}$  if $r = N_r$
          if $ЗППЧ_{i,a} = "ср"$
            $D_{st(i,a+1),av(N_r)} - \frac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}}$  if $r = 1$
            $D_{st(i,a+1),av(N_r)}$  if $r = av(N_r)$
            $D_{st(i,a+1),av(N_r)} + \frac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}}$  if $r = N_r$
          if $ЗППЧ_{i,a} = "пер"$
            $\sqrt{\left(D_{st(i,a+1),N_r}\right)^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}}$  if $r = 1$
            $\frac{1}{2} \cdot \left[ \sqrt{\left(D_{st(i,a+1),N_r}\right)^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} + D_{st(i,a+1),N_r} \right]$  if $r = av(N_r)$
            $D$  if $r = N$
```

$D^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	650.0	650.0	617.2						
2	678.5	678.5	662.1						
3	707.0	707.0	707.0						

$\cdot 10^{-3}$

$$R = \frac{D}{2}$$

$R^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	325.0	325.0	308.6						
2	339.2	339.2	331.0						
3	353.5	353.5	353.5						

$\cdot 10^{-3}$

```
$\overline{d} =$
  for $i \in 1 .. Z$
    for $a \in 1 .. 3$
      $\overline{d}_{st(i,a)} = \frac{D_{st(i,a),1}}{D_{st(i,a),N_r}}$
  $\overline{d}$
```

$\overline{d}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.9194	0.9194	0.8730						

$\overline{d}^T \le 0.9 =$

	1	2	3
1	0	0	1

```
$h =$
  for $i \in 1 .. 2Z + 1$
    $h_i = \frac{F_i}{\pi \cdot D_{i,av(N_r)}}$
  $h$
```

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

$$D_{st(i,a+1),N_r} \quad \text{if } r = N_r$$

$$\text{if } \left(ЗППЧ_{i,a} \neq \text{"const"}\right) \wedge \left(ЗППЧ_{i,a} \neq \text{"кор"}\right) \wedge \left(ЗППЧ_{i,a} \neq \text{"ср"}\right) \wedge \left(ЗППЧ_{i,a} \neq \text{"пер"}\right)$$

$$\sqrt{\left(\frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{\text{str2num}\left(ЗППЧ_{i,a}\right)}\right)^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} \quad \text{if } r = 1$$

$$\frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{\text{str2num}\left(ЗППЧ_{i,a}\right)}\right)^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} + \frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{\text{str2num}\left(ЗППЧ_{i,a}\right)}\right] \quad \text{if } r = av\left(N_r\right)$$

$$\frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{\text{str2num}\left(ЗППЧ_{i,a}\right)} \quad \text{if } r = N_r$$

$$\text{NaN} \quad \text{otherwise}$$

$$D$$

$$u = \begin{array}{|l} \text{for } i \in 1 .. 2 \cdot Z + 1 \\ \quad \text{for } r \in 1 .. N_r \\ \quad \quad u_{i,r} = \dfrac{\pi \cdot D_{i,r} \cdot n}{60} \\ u \end{array}$$

$u^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	510.5	510.5	484.8						
2	532.9	532.9	520.0						
3	555.2	555.2	555.2						

$F^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	60741	60741	93341						

$\cdot 10^{-6}$

$\overline{d}_1 = 0.9194$ $\overline{d}_1 \le 0.9 = 0$

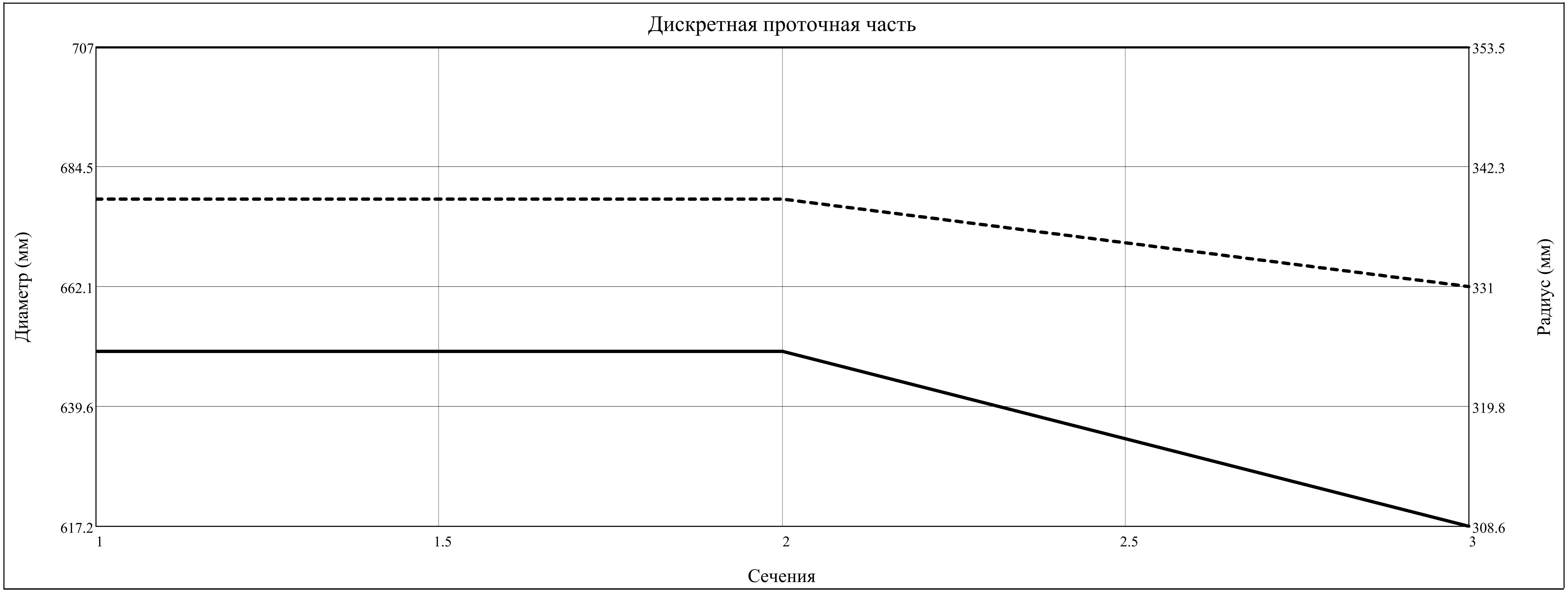
$\overline{d}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.9194	0.9194	0.8730						

$D^T =$

	1	2	3
1	650.0	650.0	617.2
2	678.5	678.5	662.1
3	707.0	707.0	707.0

$\cdot 10^{-3}$



Дискретная проточная часть

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

Осевая ширина Л СА и РК [1, с.183]:

$$\begin{pmatrix} B_{CA} \\ B_{PK} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \begin{pmatrix} B_{CA_i} \\ B_{PK_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{D_{st(i,2),av(N_r)} - 0.25\cdot h_{st(i,2)}}{16.4} \\ \dfrac{D_{st(i,3),av(N_r)}}{22} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} B_{CA} \\ B_{PK} \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

$$\mathrm{stack}\left(B_{CA}{}^{T}, B_{PK}{}^{T}\right) = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 40.9 \\ \hline 2 & 30.1 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Радиальный зазор (м):
Осевой зазор (м):
(Лучше выбирать большее значение)

$$\begin{pmatrix} \Delta_r \\ \Delta_a \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } a \in 1..3 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} \Delta_{r_{st(i,a)}} = 0.001\cdot D_{st(i,a),N_r} \\ \Delta_{a_i} = 0.25\cdot B_{CA_i} \end{array} \right. \\ \begin{pmatrix} \Delta_r \\ \Delta_a \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

$$\Delta_r{}^{T} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.707 & 0.707 & 0.707 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta_a{}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 10.234 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$0.2 \le \frac{\Delta_{a_i}}{B_{CA_i}} \le 0.25 = \boxed{1}$$

```
$\begin{pmatrix}\gamma_{ПЧпер}\\ \gamma_{ПЧ}\\ \gamma_{ПЧкор}\end{pmatrix} =$
  for $i \in 1..Z$
    for $a \in 1..2$
      for $r \in N_r$
        $\begin{pmatrix}k2\\ k1\end{pmatrix} = \frac{0.5}{B_{CA_i}} \cdot \begin{pmatrix}D_{st(i,2),r} - D_{st(i,1),r}\\ 0\end{pmatrix}$ if $a = 1$
        $\begin{pmatrix}k2\\ k1\end{pmatrix} = \frac{0.5}{B_{PK_i}} \cdot \begin{pmatrix}D_{st(i,3),r} - D_{st(i,2),r}\\ 0\end{pmatrix}$ if $a = 2$
        $\gamma_{ПЧпер_{st(i,a)}} = atan\left(\frac{k2 - k1}{1 + k2 \cdot k1}\right)$
  for $i \in 1..Z$
    for $a \in 1..2$
      $\begin{pmatrix}k2\\ k1\end{pmatrix} = \frac{0.5}{B_{CA_i}} \cdot \begin{pmatrix}D_{st(i,2),N_r} - D_{st(i,1),N_r}\\ D_{st(i,2),1} - D_{st(i,1),1}\end{pmatrix}$ if $a = 1$
      $\begin{pmatrix}k2\\ k1\end{pmatrix} = \frac{0.5}{B_{PK_i}} \cdot \begin{pmatrix}D_{st(i,3),N_r} - D_{st(i,2),N_r}\\ D_{st(i,3),1} - D_{st(i,2),1}\end{pmatrix}$ if $a = 2$
      $\gamma_{ПЧ_{st(i,a)}} = atan\left(\frac{k2 - k1}{1 + k2 \cdot k1}\right)$
  for $i \in 1..Z$
    for $a \in 1..2$
      for $r \in 1$
        $\begin{pmatrix}k2\\ k1\end{pmatrix} = \frac{0.5}{B_{CA_i}} \cdot \begin{pmatrix}D_{st(i,2),r} - D_{st(i,1),r}\\ 0\end{pmatrix}$ if $a = 1$
        $\begin{pmatrix}k2\\ k1\end{pmatrix} = \frac{0.5}{B_{PK_i}} \cdot \begin{pmatrix}D_{st(i,3),r} - D_{st(i,2),r}\\ 0\end{pmatrix}$ if $a = 2$
        $\gamma_{ПЧкор_{st(i,a)}} = atan\left(\frac{k2 - k1}{1 + k2 \cdot k1}\right)$
  $\begin{pmatrix}\gamma_{ПЧпер}\\ \gamma_{ПЧ}\\ \gamma_{ПЧкор}\end{pmatrix}$
```

$stack\left(\gamma_{ПЧкор}^{T}, \gamma_{ПЧ}^{T}, \gamma_{ПЧпер}^{T}\right) =$

	1	2
1	0.00	-28.56
2	-0.00	28.56
3	0.00	0.00

$\cdot °$

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 20 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 25 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -12 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -15 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

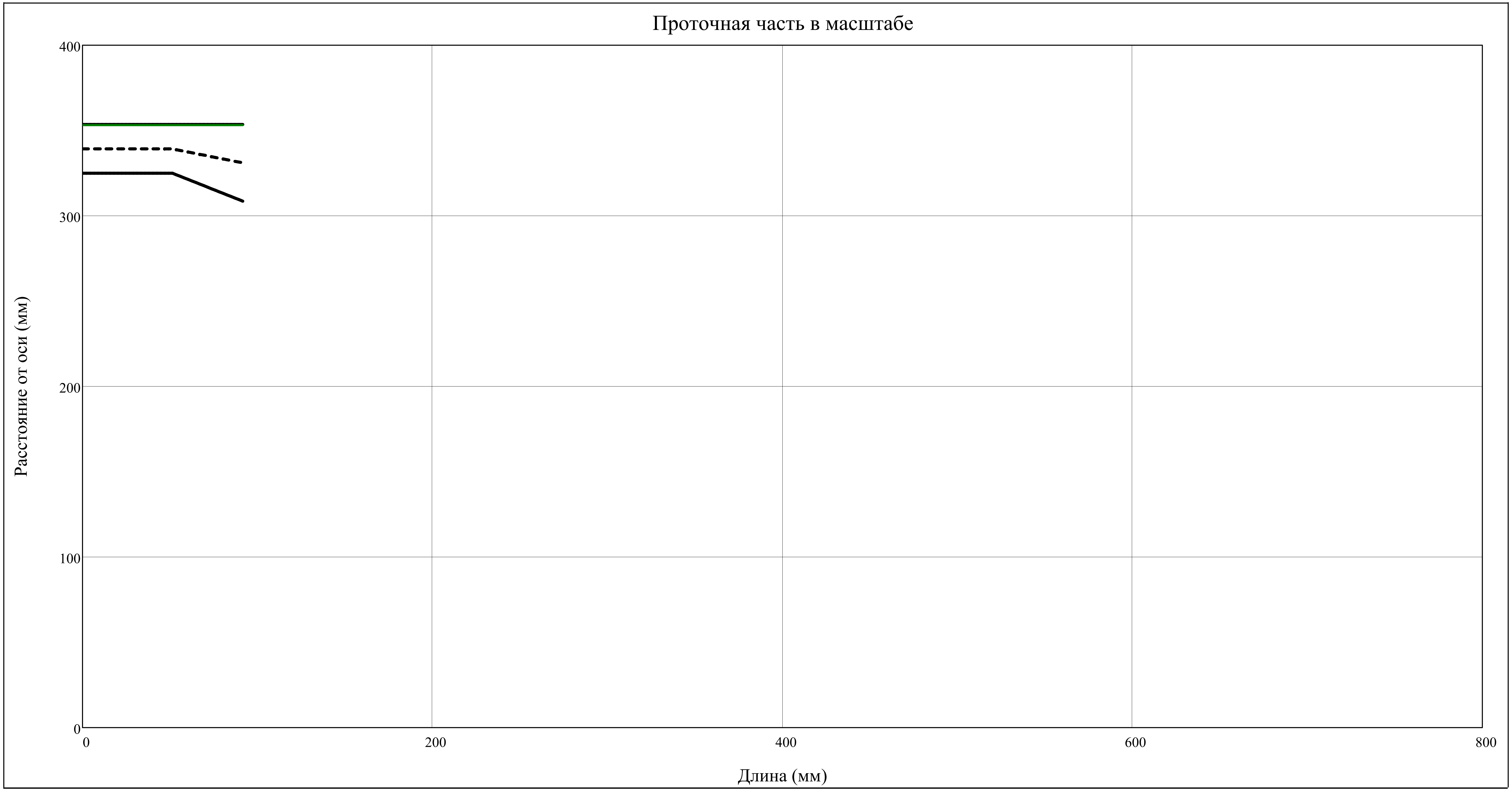
```
$\begin{pmatrix} x_{\text{ПЧ}} \\ y_{\text{ПЧпер}} \\ y_{\text{ПЧср}} \\ y_{\text{ПЧкор}} \\ y_{\text{Лпер}} \end{pmatrix} =$
    $c = 1$
    $x_{\text{ПЧ}_c} = 0$
    $y_{\text{ПЧпер}_c} = D_{st(c,1),N_r}$
    $y_{\text{Лпер}_c} = y_{\text{ПЧпер}_c} - \Delta_{r_c}$
    $y_{\text{ПЧср}_c} = D_{st(c,1),av(N_r)}$
    $y_{\text{ПЧкор}_c} = D_{st(c,1),1}$
    for $i \in 1..Z$
        $c = c + 1$
        $x_{\text{ПЧ}_c} = x_{\text{ПЧ}_{c-1}} + 0.5\cdot\Delta_{a_i} + B_{\text{CA}_i} + 0.5\cdot\Delta_{a_i}$
        $\begin{pmatrix} y_{\text{ПЧпер}_c} \\ y_{\text{ПЧср}_c} \\ y_{\text{ПЧкор}_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{st(i,2),N_r} \\ D_{st(i,2),av(N_r)} \\ D_{st(i,2),1} \end{pmatrix}$
        $y_{\text{Лпер}_c} = y_{\text{ПЧпер}_c} - \Delta_{r_i}$
        $c = c + 1$
        $x_{\text{ПЧ}_c} = x_{\text{ПЧ}_{c-1}} + 0.5\cdot\Delta_{a_i} + B_{\text{PK}_i} + 0.5\cdot\Delta_{a_i}$
        $\begin{pmatrix} y_{\text{ПЧпер}_c} \\ y_{\text{ПЧср}_c} \\ y_{\text{ПЧкор}_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{st(i+1,1),N_r} \\ D_{st(i+1,1),av(N_r)} \\ D_{st(i+1,1),1} \end{pmatrix}$
        $y_{\text{Лпер}_c} = y_{\text{ПЧпер}_c} - \Delta_{r_i}$
    $\begin{pmatrix} x_{\text{ПЧ}} \\ y_{\text{ПЧпер}} \\ y_{\text{ПЧср}} \\ y_{\text{ПЧкор}} \\ y_{\text{Лпер}} \end{pmatrix}$
```

$$\text{Length} = \sum_{i=1}^{Z} B_{\text{CA}_i} + \sum_{i=1}^{Z} \Delta_{a_i} + \sum_{i=1}^{Z} B_{\text{PK}_i} = 81.3\cdot10^{-3}$$

$$x = \min(x_{\text{ПЧ}}), \min(x_{\text{ПЧ}}) + \frac{\max(x_{\text{ПЧ}}) - \min(x_{\text{ПЧ}})}{N_{dis}} .. \max(x_{\text{ПЧ}})$$

$y_{ПЧпер}(l) = \mathrm{linterp}\left(x_{ПЧ}, 0.5\cdot y_{ПЧпер}, l\right)$ $y_{ПЧср}(l) = \mathrm{linterp}\left(x_{ПЧ}, 0.5\cdot y_{ПЧср}, l\right)$ $y_{ПЧкор}(l) = \mathrm{linterp}\left(x_{ПЧ}, 0.5\cdot y_{ПЧкор}, l\right)$

$y_{Лпер}(l) = \mathrm{interp}\left(\mathrm{cspline}\left(x_{ПЧ}, 0.5\cdot y_{Лпер}\right), x_{ПЧ}, 0.5\cdot y_{Лпер}, l\right)$



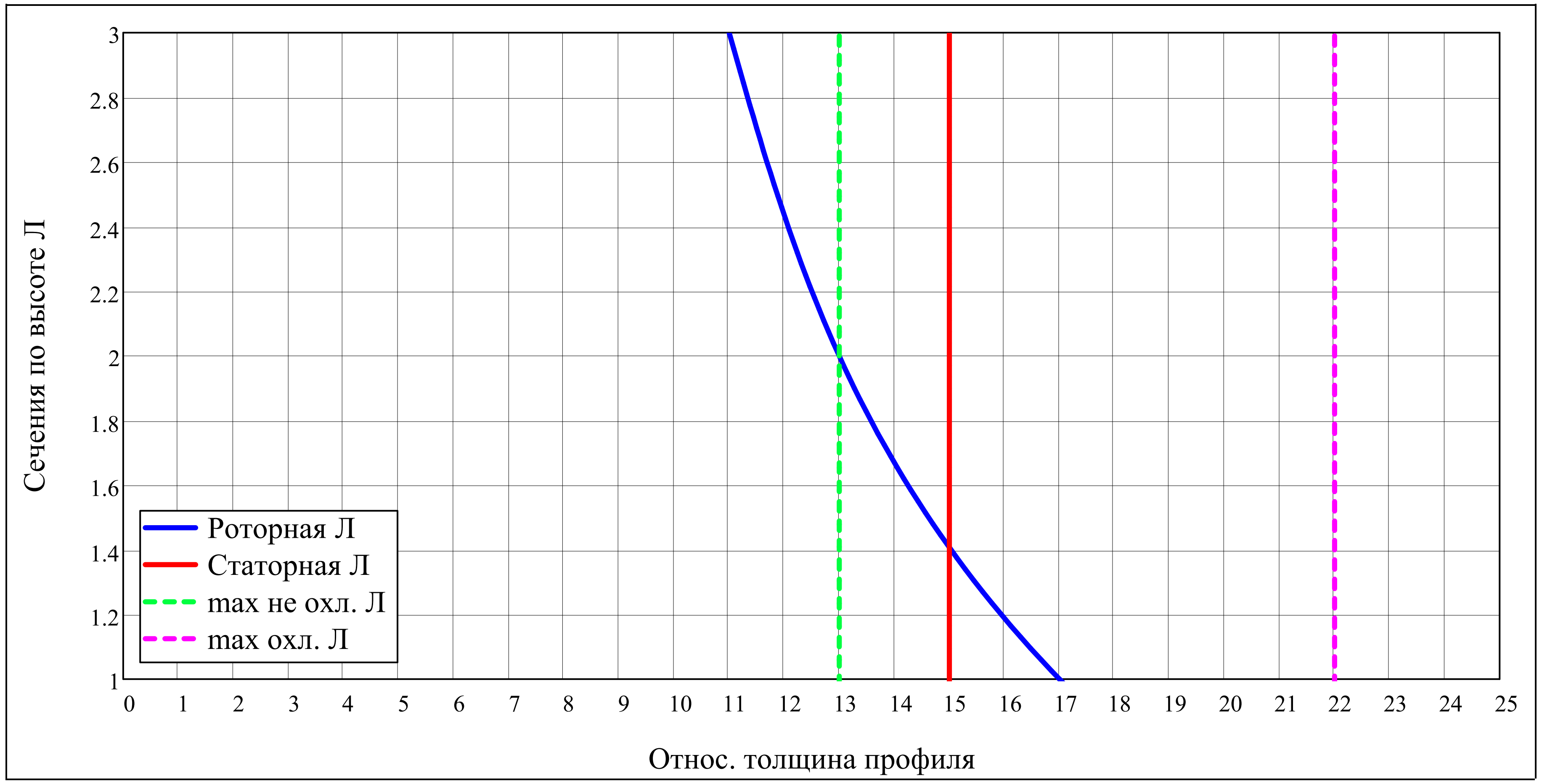
▲ Определение проточной части ОТ

Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

$$\bar{c}_{stator.}(r) = \left| \begin{array}{ll} \text{interp}\left[\text{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}15\\ 15\\ 15\end{pmatrix}\%\right], \begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}15\\ 15\\ 15\end{pmatrix}\%, r\right] & \text{if } T_{Л.доп} < T^*_{г} \\ \text{interp}\left[\text{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}7\\ 9\\ 11\end{pmatrix}\%\right], \begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}7\\ 9\\ 11\end{pmatrix}\%, r\right] & \text{otherwise} \end{array}\right.$$

$$\bar{c}_{rotor.}(r) = \left| \begin{array}{ll} \text{interp}\left[\text{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}17\\ 13\\ 11\end{pmatrix}\%\right], \begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}17\\ 13\\ 11\end{pmatrix}\%, r\right] & \text{if } T_{Л.доп} < T^*_{г} \\ \text{interp}\left[\text{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}14\\ 9\\ 7\end{pmatrix}\%\right], \begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}14\\ 9\\ 7\end{pmatrix}\%, r\right] & \text{otherwise} \end{array}\right.$$



$$\begin{pmatrix}\bar{c}_{stator}\\ \bar{c}_{rotor}\end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } r \in 1..N_r \\ \qquad \begin{pmatrix}\bar{c}_{stator_{i,r}}\\ \bar{c}_{rotor_{i,r}}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\bar{c}_{stator.}(r)\\ \bar{c}_{rotor.}(r)\end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix}\bar{c}_{stator}\\ \bar{c}_{rotor}\end{pmatrix} \end{array}\right.$$

$\bar{c}_{stator}{}^{T} =$

	1
1	15.00
2	15.00
3	15.00

$\cdot\%$

$\bar{c}_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	17.00
2	13.00
3	11.00

$\cdot\%$

$$\begin{pmatrix} \bar{r}\_inlet_{rotor} & \bar{r}\_inlet_{stator} \\ \bar{r}\_outlet_{rotor} & \bar{r}\_outlet_{stator} \end{pmatrix} =$$

```
for  $i \in 1..Z$
    for  $r \in 1..N_r$
        $\begin{pmatrix} \bar{r}\_inlet_{stator_{i,r}} \\ \bar{r}\_outlet_{stator_{i,r}} \end{pmatrix} = \bar{c}_{stator.}(r) \cdot \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix}$
        $\begin{pmatrix} \bar{r}\_inlet_{rotor_{i,r}} \\ \bar{r}\_outlet_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \bar{c}_{rotor.}(r) \cdot \begin{pmatrix} 0.35 \\ 0.15 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} \bar{r}\_inlet_{rotor} & \bar{r}\_inlet_{stator} \\ \bar{r}\_outlet_{rotor} & \bar{r}\_outlet_{stator} \end{pmatrix}$
```

$\bar{r}\_inlet_{stator}^{T} =$

	1
1	6.000
2	6.000
3	6.000

$\cdot\%$

$\bar{r}\_inlet_{rotor}^{T} =$

	1
1	5.950
2	4.550
3	3.850

$\cdot\%$

$\bar{r}\_outlet_{stator}^{T} =$

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

$\bar{r}\_outlet_{rotor}^{T} =$

	1
1	2.550
2	1.950
3	1.650

$\cdot\%$

▲ Относ. толщины и радиусы профилей

▶ Вывод результатов поступенчатого расчета продольной геометрии ОТ в EXCEL:

$$R_{L.cp} = \left(\begin{array}{l} 0.16 \;\; \text{if } \; turbine = \text{"ТВД"} \\ 0.13 \;\; \text{otherwise} \end{array} \quad 0.15 \quad 0.18 \quad 0.185 \quad 0.5 \quad 0.5 \right)^{T}$$

Поступенчатый расчет ОТ

$$\begin{pmatrix} iteration_{CA} & iteration_{PK} \\ k & R_{L} \\ H^{*}_{ст} & H_{ст} \\ H_{stator} & H_{rotor} \\ c_{ад} & w_{ад} \\ P^{*} & P \\ T^{*} & T \\ G & v \\ \rho^{*} & \rho \\ \alpha_{ox} & \alpha_{ox} \\ \alpha & \beta \\ \varepsilon_{stator} & \varepsilon_{rotor} \\ \theta_{CA} & \theta_{PK} \\ g_{охлCA} & g_{охлPK} \\ a^{*}_{c} & a^{*}_{w} \\ T_{ад} & T_{ад} \\ P^{*}_{w} & T^{*}_{w} \\ a_{зв} & a_{зв} \\ u & u \\ c & c \\ c_{a} & c_{u} \\ w & w \\ w_{a} & w_{u} \\ \lambda_{c} & M_{c} \\ \lambda_{w} & M_{w} \\ \upsilon_{stator} & \upsilon_{rotor} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} r = av(N_{r}) \\ \text{for } \; i \in 1..Z \\ \quad \left| \; trace(concat(\text{"ступень i = "}, num2str(i))) \right. \end{array} \right.$$

$$\begin{pmatrix} \text{chord}_{stator} & \text{chord}_{rotor} \\ \bar{t}_{\text{оптСА}} & \bar{t}_{\text{оптРК}} \\ t_{stator} & t_{rotor} \\ Z_{stator} & Z_{rotor} \\ \bar{\upsilon}_{stator} & \bar{\upsilon}_{rotor} \\ \xi_{\text{трСА}} & \xi_{\text{трРК}} \\ \xi_{\text{крСА}} & \xi_{\text{крРК}} \\ \xi_{\text{ReСА}} & \xi_{\text{ReРК}} \\ \xi_{\lambda\text{СА}} & \xi_{\lambda\text{РК}} \\ \xi_{\text{прСА}} & \xi_{\text{прРК}} \\ \xi_{\text{втСА}} & \xi_{\text{втРК}} \\ \xi_{\text{тдСА}} & \xi_{\text{тдРК}} \\ \xi_{\text{смСА}} & \xi_{\text{смРК}} \\ \xi_{\Delta r} & \xi_{\text{вых}} \\ \xi_{\text{тр.в}} & \xi_{\text{тр.в}} \\ L_{\text{ст}} & Lu_{\text{ст}} \\ \eta_{\text{мощь}} & \eta_{\text{лоп}} \\ \eta^*_{\text{ст}} & \eta^*_{\text{ст}} \\ \eta_{u1} & \eta_{u2} \\ \xi_{\text{СА}} & \xi_{\text{РК}} \\ Lu_{\text{нагрузка}} & Lu_{\text{нагрузка}} \end{pmatrix}$$

```
if i = 1
    $\alpha_{ox_{st(i,1)}} = \alpha_{ox}$
    $k_{st(i,1),r} = k_{\text{г}}$
    $P^*_{st(i,1),r} = P^*_{\text{г}}$
    $P^*_{w_{st(i,1),r}} = 0$
    $P_{st(i,1),r} = P_{\text{г}}$
    $T^*_{st(i,1),r} = T^*_{\text{г}}$
    $T^*_{w_{st(i,1),r}} = 0$
    $T_{st(i,1),r} = T_{\text{г}}$
    $v_{st(i,1),r} = \frac{R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, Fuel\right) \cdot T_{st(i,1),r}}{P_{st(i,1),r}}$
    $G_{st(i,1)} = G_{\text{г}}$
    $c_{st(i,1),r} = c_{\text{г}}$
    $\alpha_{st(i,1),r} = \alpha_{\text{г}}$
    $\begin{pmatrix} c_{u_{st(i,1),r}} \\ c_{a_{st(i,1),r}} \end{pmatrix} = c_{st(i,1),r} \cdot \begin{pmatrix} \cos\left(\alpha_{st(i,1),r}\right) \\ \sin\left(\alpha_{st(i,1),r}\right) \end{pmatrix}$
    $w_{st(i,1),r} = 0$
    $\begin{pmatrix} a_{\text{зв}_{st(i,1),r}} \\ a^*_{c_{st(i,1),r}} \\ a^*_{w_{st(i,1),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{k_{st(i,1),r} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, Fuel\right) \cdot T_{st(i,1),r}} \\ \sqrt{\frac{2 \cdot k_{st(i,1),r}}{1 + k_{st(i,1),r}} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, Fuel\right) \cdot T^*_{st(i,1),r}} \\ \sqrt{\frac{2 \cdot k_{st(i,1),r}}{1 + k_{st(i,1),r}} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, Fuel\right) \cdot T^*_{w_{st(i,1),r}}} \end{pmatrix}$
    $\begin{pmatrix} \lambda_{c_{st(i,1),r}} \\ \lambda_{w_{st(i,1),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{c_{st(i,1),r}}{a^*_{c_{st(i,1),r}}} \\ 0 \end{pmatrix}$
    $\begin{pmatrix} M_{c_{st(i,1),r}} \\ M_{w_{st(i,1),r}} \end{pmatrix} = \frac{1}{a_{\text{зв}_{st(i,1),r}}} \cdot \begin{pmatrix} c_{st(i,1),r} \\ w_{st(i,1),r} \end{pmatrix}$
$\text{iteration}_{\text{ст}_i} = 0$
while $1 > 0$
    $\text{iteration}_{\text{ст}_i} = \text{iteration}_{\text{ст}_i} + 1$
```

```
trace(concat("    iteration.ст = ", num2str($iteration_{ст_i}$)))
$H_{ст_i} = N_{ст_i} \cdot$ | $\frac{1}{G_{st(i,1)} \cdot 0.9}$ if $(iteration_{ст_i} = 1)$
                  | $\frac{1}{mean(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}) \cdot \eta_{мощь_i}}$ otherwise
$R_{L_{i,r}} = R_{L.cp_i}$
$c_{ад_{st(i,1),r}} = \sqrt{2 \cdot H_{ст_i}}$
$H_{stator_i} = H_{ст_i} \cdot (1 - R_{L_{i,r}})$
$c_{ад_{st(i,2),r}} = \sqrt{2 \cdot H_{stator_i}}$
$\overline{\upsilon}_{stator_i} = 1$
$iteration_{CA_i} = 0$
while $1 > 0$
    $iteration_{CA_i} = iteration_{CA_i} + 1$
    trace(concat("        iteration.CA = ", num2str($iteration_{CA_i}$)))
    $c_{st(i,2),r} = \overline{\upsilon}_{stator_i} \cdot c_{ад_{st(i,2),r}}$
    $\theta_{CA_i} = \theta_{глубина}(T^*_{st(i,1),r}, T^*_{cooling}, T_{Л.доп})$
    $g_{охлCA_i} =$ | $\frac{0.035 \cdot \theta_{CA_i}}{1 - \theta_{CA_i}}$ if $\frac{0.035 \cdot \theta_{CA_i}}{1 - \theta_{CA_i}} \ge 0$
               | 0 otherwise
    $G_{st(i,2)} = G_{st(i,1)} \cdot (1 + g_{охлCA_i})$
    $\alpha_{ox_{st(i,2)}} = \alpha_{ox_{st(i,1)}} + g_{охлCA_i}$
    $\alpha_{окCA_i} = mean(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,2)}})$
    $k_{st(i,2),r} = k_{st(i,1),r}$
    while $1 > 0$
        $k_{CA_i} = mean(k_{st(i,1),r}, k_{st(i,2),r})$
        $T_{ад_{st(i,2),r}} = T^*_{st(i,1),r} - \frac{H_{stator_i}}{\frac{k_{CA_i}}{k_{CA_i} - 1} \cdot R_{газ.cp}(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel)}$
        $k_{CA}$
```

```
        $P_{st(i,2),r} = P*_{st(i,1),r} \cdot \left( \frac{Tад_{st(i,2),r}}{T*_{st(i,1),r}} \right)^{\frac{CA_i}{k_{CA_i}-1}}$
        $T_{st(i,2),r} = T*_{st(i,1),r} - \frac{H_{stator_i} \cdot \left( \overline{\upsilon}_{stator_i} \right)^2}{\frac{k_{CA_i}}{k_{CA_i} - 1} \cdot R_{газ.ср}\left( \alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right)}$
        $Cp_2 = Cp_{газ}\left( P_{st(i,2),r}, T_{st(i,2),r}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right)$
        $k' = k_{ад}\left( Cp_2, R_{газ}\left( \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right) \right)$
        if $\left| eps\left( "rel", k_{st(i,2),r}, k' \right) \right| \le epsilon$
            $k_{st(i,2),r} = k'$
            break
        $k_{st(i,2),r} = k'$
    $T*ад_{st(i,2),r} = T_{st(i,2),r} + \frac{\left( c_{st(i,2),r} \right)^2}{2 \cdot Cp_{газ}\left( P_{st(i,2),r}, T_{st(i,2),r}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right)}$
    $P*ад_{st(i,2),r} = P_{st(i,2),r} \cdot \left( \frac{T*ад_{st(i,2),r}}{T_{st(i,2),r}} \right)^{\frac{k_{st(i,2),r}}{k_{st(i,2),r}-1}}$
    $\begin{pmatrix} T*см_{st(i,2),r} \\ P*см_{st(i,2),r} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{смешение}\left[ P*ад_{st(i,2),r}, T*ад_{st(i,2),r}, G_{st(i,1)}, \alpha_{ox_{st(i,1)}}, P*_{cooling}, T*_{cooling}, \left( g_{охлCA_i} \cdot G_{st(i,1)} \right), \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right] \\ P_{смешение}\left[ P*ад_{st(i,2),r}, G_{st(i,1)}, P*_{cooling}, \left( g_{охлCA_i} \cdot G_{st(i,1)} \right) \right] \end{bmatrix}$
    $\begin{pmatrix} T*_{st(i,2),r} \\ P*_{st(i,2),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T*см_{st(i,2),r} \\ P*см_{st(i,2),r} \end{pmatrix}$
    $T_{st(i,2),r} = T*_{st(i,2),r} - \frac{\left( c_{st(i,2),r} \right)^2}{2 \cdot Cp_{газ}\left( P_{st(i,2),r}, T_{st(i,2),r}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right)}$
    $P_{st(i,2),r} = P*_{st(i,2),r} \cdot \left( \frac{T_{st(i,2),r}}{T*_{st(i,2),r}} \right)^{\frac{k_{st(i,2),r}}{k_{st(i,2),r}-1}}$
    $k_{st(i,2),r} = k_{ад}\left( Cp_{газ}\left( P_{st(i,2),r}, T_{st(i,2),r}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right), R_{газ}\left( \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right) \right)$
    $v_{st(i,2),r} = \frac{R_{газ}\left( \alpha_{ox_{st(i,2)}}, Fuel \right) \cdot T_{st(i,2),r}}{P_{st(i,2),r}}$
    $\alpha_{st(i,2),r} = asin\left( \frac{G_{st(i,2)} \cdot v_{st(i,2),r}}{}$
```

$$\left(F_{st(i,2)}\cdot c_{st(i,2),r}\right)$$

$$\begin{pmatrix} c_{u_{st(i,2),r}} \\ c_{a_{st(i,2),r}} \end{pmatrix} = c_{st(i,2),r}\cdot\begin{pmatrix} \cos\left(\alpha_{st(i,2),r}\right) \\ \sin\left(\alpha_{st(i,2),r}\right) \end{pmatrix}$$

$$\beta_{st(i,2),r} = \mathrm{triangle}\left(c_{a_{st(i,2),r}}, c_{u_{st(i,2),r}} - u_{st(i,2),r}\right)$$

$$w_{st(i,2),r} = \sqrt{\left(c_{st(i,2),r}\right)^2 + \left(u_{st(i,2),r}\right)^2 - 2\cdot c_{st(i,2),r}\cdot u_{st(i,2),r}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),r}\right)}$$

$$\begin{pmatrix} w_{u_{st(i,2),r}} \\ w_{a_{st(i,2),r}} \end{pmatrix} = w_{st(i,2),r}\cdot\begin{pmatrix} \cos\left(\beta_{st(i,2),r}\right) \\ \sin\left(\beta_{st(i,2),r}\right) \end{pmatrix}$$

$$T^*_{w_{st(i,2),r}} = T_{st(i,2),r} + \frac{\left(w_{st(i,2),r}\right)^2}{2\cdot Cp_{газ}\left(P_{st(i,2),r}, T_{st(i,2),r}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, \mathrm{Fuel}\right)}$$

$$P^*_{w_{st(i,2),r}} = P_{st(i,2),r}\cdot\left(\frac{T^*_{w_{st(i,2),r}}}{T_{st(i,2),r}}\right)^{\frac{k_{st(i,2),r}}{k_{st(i,2),r}-1}}$$

$$\begin{pmatrix} a_{зв_{st(i,2),r}} \\ a^*_{c_{st(i,2),r}} \\ a^*_{w_{st(i,2),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{k_{st(i,2),r}\cdot R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}}, \mathrm{Fuel}\right)\cdot T_{st(i,2),r}} \\ \sqrt{\frac{2\cdot k_{st(i,2),r}}{k_{st(i,2),r}+1}\cdot R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}}, \mathrm{Fuel}\right)\cdot T^*_{st(i,2),r}} \\ \sqrt{\frac{2\cdot k_{st(i,2),r}}{k_{st(i,2),r}+1}\cdot R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}}, \mathrm{Fuel}\right)\cdot T^*_{w_{st(i,2),r}}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda_{c_{st(i,2),r}} \\ \lambda_{w_{st(i,2),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{c_{st(i,2),r}}{a^*_{c_{st(i,2),r}}} \\ \frac{w_{st(i,2),r}}{a^*_{w_{st(i,2),r}}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} M_{c_{st(i,2),r}} \\ M_{w_{st(i,2),r}} \end{pmatrix} = \frac{1}{a_{зв_{st(i,2),r}}}\cdot\begin{pmatrix} c_{st(i,2),r} \\ w_{st(i,2),r} \end{pmatrix}$$

$$\upsilon_{stator_i} = \upsilon_{установки}\left(\alpha_{st(i,1),r}, \alpha_{st(i,2),r}\right)$$

$$chord_{stator_{i,r}} = \frac{B_{CA_i}}{\sin\left(\upsilon_{stator_i}\right)}$$

$$\overline{t}_{оптCA_i} = \overline{t}_{опт}\left(\text{"CA"}, g_{охлCA_i} > 0, \alpha_{st(i,1),r}, \alpha_{st(i,2),r}, \max\left(\mathrm{submatrix}\left(\overline{c}_{stator}, i, i, 1, N_r\right)\right)\right)$$

$$Z_{stator_i} = \left| \mathrm{ceil}\left(\frac{\pi\cdot\mathrm{mean}\left(D_{st(i,1),r}, D_{st(i,2),r}\right)}{\overline{t}_{оптCA_i}\cdot chord_{stator_{i,r}}}\right) \text{ if } \bmod\left(\mathrm{ceil}\left(\frac{\pi\cdot\mathrm{mean}\left(D_{st(i,1),r}, D_{st(i,2),r}\right)}{\overline{t}_{оптCA_i}\cdot chord_{stator_{i,r}}}\right), 2\right) = 0 \right.$$

```
          $\mathrm{ceil}\left(\frac{\pi\cdot\mathrm{mean}\left(D_{st(i,1),r},D_{st(i,2),r}\right)}{\overline{t}_{оптCA_i}\cdot chord_{stator_{i,r}}}\right)+1$   otherwise
    for  $r \in 1 .. N_r$
        $t_{stator_{i,r}} = \frac{\pi\cdot\mathrm{mean}\left(D_{st(i,1),r},D_{st(i,2),r}\right)}{Z_{stator_i}}$
    $\xi_{трCA_i} = \xi_{трение}\left(\alpha_{st(i,1),r},\alpha_{st(i,2),r}\right)$
    $\xi_{крCA_i} = \xi_{кромка}\left(\overline{r\_outlet}_{stator_{i,r}}\cdot chord_{stator_{i,r}},t_{stator_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r}\right)$
    $\xi_{ReCA_i} = \xi_{Re}\left(\frac{c_{st(i,2),r}\cdot chord_{stator_{i,r}}}{\mu_{газ}\left(T_{st(i,2),r},\alpha_{ox_{st(i,2)}}\right)\cdot v_{st(i,2),r}}\right)$
    $\xi_{\lambda CA_i} = \xi_{сжимаемость}\left("CA",\lambda_{c_{st(i,2),r}}\right)$
    $\xi_{прCA_i} = \xi_{трCA_i}+\xi_{крCA_i}+\xi_{ReCA_i}+\xi_{\lambda CA_i}$
    $\xi_{втCA_i} = \xi_{вторичные}\left(\xi_{трCA_i},t_{stator_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r},h_{st(i,2)}\right)$
    $\xi_{тдCA_i} = \frac{\xi_{ТД}\left("CA",T*_{см_{st(i,2),r}},T*_{ад_{st(i,2),r}},P_{st(i,2),r},Cp_{газ}\left(P_{st(i,2),r},T_{st(i,2),r},\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right),R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right),G_{st(i,2)},F_{st(i,2)},\alpha_{st(i,2),r},0\right)}{H_{stator_i}}$
    $\xi_{смCA_i} = \xi_{смешение}\left("CA",g_{охлCA_i}\right)$
    if  $\left|eps\left("rel",\sqrt{1-\xi_{смCA_i}-\xi_{тдCA_i}-\xi_{втCA_i}-\xi_{прCA_i}},\overline{\upsilon}_{stator_i}\right)\right| \le epsilon$
        $\overline{\upsilon}_{stator_i} = \sqrt{1-\xi_{смCA_i}-\xi_{тдCA_i}-\xi_{втCA_i}-\xi_{прCA_i}}$
        break
    $\overline{\upsilon}_{stator_i} = \sqrt{1-\xi_{смCA_i}-\xi_{тдCA_i}-\xi_{втCA_i}-\xi_{прCA_i}}$
$H_{rotor_i} = H_{ст_i}\cdot R_{L_{i,av(N_r)}}\cdot\frac{T_{st(i,2),r}}{T_{ад_{st(i,2),r}}}$
$w_{ад_{st(i,3),r}} = \sqrt{\left(w_{st(i,2),r}\right)^2+2\cdot H_{rotor_i}+\left(u_{st(i,3),r}\right)^2-\left(u_{st(i,2),r}\right)^2}$
$\overline{\upsilon}_{rotor_i} = 1$
$iteration_{РК_i} = 0$
while  $1 > 0$
    $iteration_{РК_i} = iteration_{РК_i}+1$
    trace(concat("        iteration.РК = ", num2str($iteration_{РК_i}$)))
    $w_{st(i,3),r} = \overline{\upsilon}_{rotor_i}\cdot w_{ад_{st(i,3),r}}$
```

```
$\theta_{РК_i} = \theta_{глубина}\left(T^*_{w_{st(i,2),r}}, T^*_{cooling}, T_{Л.доп}\right)$
$g_{охлРК_i} = \begin{cases} \dfrac{0.035\cdot\theta_{РК_i}}{1-\theta_{РК_i}} & \text{if } \dfrac{0.035\cdot\theta_{РК_i}}{1-\theta_{РК_i}} \ge 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
$G_{st(i,3)} = G_{st(i,2)}\cdot\left(1 + g_{охлРК_i}\right)$
$\alpha_{ox_{st(i,3)}} = \alpha_{ox_{st(i,2)}} + g_{охлРК_i}$
$k_{st(i,3),r} = k_{st(i,2),r}$
while $1 > 0$
    $k_{РК_i} = mean\left(k_{st(i,2),r}, k_{st(i,3),r}\right)$
    $T_{ад_{st(i,3),r}} = T_{st(i,2),r} - \dfrac{H_{rotor_i}}{\dfrac{k_{РК_i}}{k_{РК_i}-1}\cdot R_{газ.cp}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)}$
    $P_{st(i,3),r} = P_{st(i,2),r}\cdot\left(\dfrac{T_{ад_{st(i,3),r}}}{T_{st(i,2),r}}\right)^{\frac{k_{РК_i}}{k_{РК_i}-1}}$
    $T_{st(i,3),r} = T_{st(i,2),r} - \dfrac{\left(w_{st(i,3),r}\right)^2 - \left(w_{st(i,2),r}\right)^2 - \left(u_{st(i,3),r}\right)^2 + \left(u_{st(i,2),r}\right)^2}{2\cdot\dfrac{k_{РК_i}}{k_{РК_i}-1}\cdot R_{газ.cp}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)}$
    $Cp_3 = Cp_{газ}\left(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)$
    $k' = k_{ад}\left(Cp_3, R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)\right)$
    if $\left|eps\left("rel", k_{st(i,3),r}, k'\right)\right| \le epsilon$
        $k_{st(i,3),r} = k'$
        break
    $k_{st(i,3)} = k'$
$v_{st(i,3),r} = \dfrac{R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)\cdot T_{st(i,3),r}}{P_{st(i,3),r}}$
$\beta_{st(i,3),r} = asin\left(\dfrac{G_{st(i,3)}\cdot v_{st(i,3),r}}{w_{st(i,3),r}\cdot F_{st(i,3)}}\right)$
$\begin{pmatrix} c_{u_{st(i,3),r}} \\ c_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{st(i,3),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,3),r}\right) - u_{st(i,3),r} \\ w_{st(i,3),r}\cdot\sin\left(\beta_{st(i,3),r}\right) \end{pmatrix}$
```

$$c_{st(i,3),r} = \sqrt{\left(c_{u_{st(i,3),r}}\right)^2 + \left(c_{a_{st(i,3),r}}\right)^2}$$

$$\begin{pmatrix} w_{u_{st(i,3),r}} \\ w_{a_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\left(w_{st(i,3),r}\right)^2 - \left(c_{a_{st(i,3),r}}\right)^2} \\ w_{st(i,3),r}\sin\left(\beta_{st(i,3),r}\right) \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{st(i,3),r} = \text{triangle}\left(c_{a_{st(i,3),r}}, c_{u_{st(i,3),r}}\right)$$

$$T^*_{\text{ад}_{st(i,3),r}} = T_{st(i,3),r} + \frac{\left(c_{st(i,3),r}\right)^2}{2\cdot Cp_{\text{газ}}\left(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)}$$

$$P^*_{\text{ад}_{st(i,3),r}} = P_{st(i,3),r}\cdot\left(\frac{T^*_{\text{ад}_{st(i,3),r}}}{T_{st(i,3),r}}\right)^{\frac{k_{st(i,3),r}}{k_{st(i,3),r}-1}}$$

$$\begin{pmatrix} T^*_{\text{см}_{st(i,3),r}} \\ P^*_{\text{см}_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\text{смешение}}\left[P^*_{\text{ад}_{st(i,3),r}}, T^*_{\text{ад}_{st(i,3),r}}, G_{st(i,2)}, \alpha_{\text{ох}_{st(i,2)}}, P^*_{\text{cooling}}, T^*_{\text{cooling}}, \left(g_{\text{охлРК}_i}\cdot G_{st(i,2)}\right), \alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right] \\ P_{\text{смешение}}\left[P^*_{\text{ад}_{st(i,3),r}}, G_{st(i,2)}, P^*_{\text{cooling}}, \left(g_{\text{охлРК}_i}\cdot G_{st(i,2)}\right)\right] \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T^*_{st(i,3),r} \\ P^*_{st(i,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^*_{\text{см}_{st(i,3),r}} \\ P^*_{\text{см}_{st(i,3),r}} \end{pmatrix}$$

$$T_{st(i,3),r} = T^*_{st(i,3),r} - \frac{\left(c_{st(i,3),r}\right)^2}{2\cdot Cp_{\text{газ}}\left(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)}$$

$$P_{st(i,3),r} = P^*_{st(i,3),r}\cdot\left(\frac{T_{st(i,3),r}}{T^*_{st(i,3),r}}\right)^{\frac{k_{st(i,3),r}}{k_{st(i,3),r}-1}}$$

$$k_{st(i,3),r} = k_{\text{ад}}\left(Cp_{\text{газ}}\left(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right), R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)\right)$$

$$T^*_{w_{st(i,3),r}} = T_{st(i,3),r} + \frac{\left(w_{st(i,3),r}\right)^2}{2\cdot\frac{k_{st(i,3),r}}{k_{st(i,3),r}-1}\cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)}$$

$$\begin{pmatrix} a_{\text{зв}_{st(i,3),r}} \\ a^*_{c_{st(i,3),r}} \\ a^*_{w_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{k_{st(i,3),r}\cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)\cdot T_{st(i,3),r}} \\ \sqrt{\frac{2\cdot k_{st(i,3),r}}{k_{st(i,3),r}+1}\cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)\cdot T^*_{st(i,3),r}} \\ \sqrt{\frac{2\cdot k_{st(i,3),r}}{k_{st(i,3),r}+1}\cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)\cdot T^*_{w_{st(i,3),r}}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda_{c_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{c_{st(i,3),r}}{a^*_{c_{st(i,3),r}}} \end{pmatrix}$$

```
$\begin{pmatrix} \lambda_{w_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \dfrac{w_{st(i,3),r}}{a^*_{w_{st(i,3),r}}} \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} M_{c_{st(i,3),r}} \\ M_{w_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} = \dfrac{1}{a_{зв_{st(i,3),r}}} \cdot \begin{pmatrix} c_{st(i,3),r} \\ w_{st(i,3),r} \end{pmatrix}$
$\upsilon_{rotor_i} = \upsilon_{установки}(\beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r})$
$chord_{rotor_{i,r}} = \dfrac{B_{РК_i}}{\sin(\upsilon_{rotor_i})}$
$\overline{t}_{оптРК_i} = \overline{t}_{опт}(\text{"РК"}, g_{охлРК_i} > 0, \beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}, \max(\text{submatrix}(\overline{c}_{rotor}, i, i, 1, N_r)))$
$Z_{rotor_i} =$
    $Z_{rotor_i} = \text{ceil}\left(\dfrac{\pi \cdot \text{mean}(D_{st(i,2),r}, D_{st(i,3),r})}{\overline{t}_{оптРК_i} \cdot chord_{rotor_{i,r}}}\right)$
    while $\gcd(Z_{rotor_i}, Z_{stator_i}) \neq 1$
        $Z_{rotor_i} = Z_{rotor_i} + 1$
for $r \in 1..N_r$
    $t_{rotor_{i,r}} = \dfrac{\pi \cdot \text{mean}(D_{st(i,2),r}, D_{st(i,3),r})}{Z_{rotor_i}}$
$\xi_{трРК_i} = \xi_{трение}(\beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r})$
$\xi_{крРК_i} = \xi_{кромка}(\overline{r\_outlet}_{rotor_{i,r}} \cdot chord_{rotor_{i,r}}, t_{rotor_{i,r}}, \beta_{st(i,3),r})$
$\xi_{ReРК_i} = \xi_{Re}\left(\dfrac{w_{st(i,3),r} \cdot chord_{rotor_{i,r}}}{\mu_{газ}(T_{st(i,3),r}, \alpha_{ох_{st(i,3)}}) \cdot v_{st(i,3),r}}\right)$
$\xi_{\lambda РК_i} = \xi_{сжимаемость}(\text{"РК"}, \lambda_{w_{st(i,3),r}})$
$\xi_{прРК_i} = \xi_{трРК_i} + \xi_{крРК_i} + \xi_{ReРК_i} + \xi_{\lambda РК_i}$
$\xi_{втРК_i} = \xi_{вторичные}(\xi_{трРК_i}, t_{rotor_{i,r}}, \beta_{st(i,3),r}, h_{st(i,3)})$
$\xi_{тдРК_i} = \dfrac{\xi_{ТД}(\text{"РК"}, T^*_{см_{st(i,3),r}}, T^*_{ад_{st(i,3),r}}, P_{st(i,3),r}, Cp_{газ}(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ох_{st(i,3)}}, Fuel), R_{газ}(\alpha_{ох_{st(i,3)}}, Fuel), G_{st(i,3)}, F_{st(i,3)}, \beta_{st(i,3),r}, u_{st(i,3),r})}{H_{rotor_i}}$
$\xi_{смРК_i} = \xi_{смешение}(\text{"РК"}, g_{охлРК_i})$
if $\left|\text{eps}\left(\text{"rel"}, \sqrt{1 - \xi_{смРК_i} - \xi_{тдРК_i} - \xi_{втРК_i} - \xi_{прРК_i}}, \overline{\upsilon}_{rotor_i}\right)\right| \le \text{epsilon}$
    $\overline{\upsilon}_{rotor_i} = \sqrt{1 - \xi_{смРК_i} - \xi_{тдРК_i} - \xi_{втРК_i} - \xi_{прРК_i}}$
    break
```

$$\overline{\upsilon}_{rotor_i} = \sqrt{1 - \xi_{\text{смРК}_i} - \xi_{\text{тдРК}_i} - \xi_{\text{втРК}_i} - \xi_{\text{прРК}_i}}$$

$$Lu_{\text{ст}_i} = c_{u_{st(i,2),r}} \cdot u_{st(i,2),r} + c_{u_{st(i,3),r}} \cdot u_{st(i,3),r}$$

$$\begin{pmatrix} \xi_{\text{СА}_i} \\ \xi_{\text{РК}_i} \\ \xi_{\text{САиРК}_i} \end{pmatrix} = \frac{1}{H_{\text{ст}_i}} \cdot \begin{pmatrix} \xi_{\text{Л}}\left(\overline{\upsilon}_{stator_i}, c_{st(i,2),r}\right) \\ \xi_{\text{Л}}\left(\overline{\upsilon}_{rotor_i}, w_{st(i,3),r}\right) \\ \xi_{\text{Л}}\left(\overline{\upsilon}_{stator_i}, c_{st(i,2),r}\right) \cdot \dfrac{T_{\text{ад}_{st(i,3),r}}}{T_{st(i,2),r}} \end{pmatrix}$$

$$\xi_{\text{вых}_i} = \frac{\xi_{\text{выход}}\left(c_{st(i,3),r}\right)}{H_{\text{ст}_i}}$$

$$\xi_{\Delta r_i} = \frac{\xi_{\text{г.зазор}}\left(\Delta_{r_i}, h_{st(i,3)}, D_{st(i,3),r}, R_{L_{i,r}}, Lu_{\text{ст}_i}\right)}{H_{\text{ст}_i}}$$

$$\xi_{\text{тр.в}_i} = \frac{\xi_{\text{трениеИвентиляция}}\left[D_{st(i,3),r}, h_{st(i,3)}, u_{st(i,3),r}, \left(\dfrac{v_{st(i,2),r} + v_{st(i,3),r}}{2 \cdot v_{st(i,2),r} \cdot v_{st(i,3),r}}\right), \text{mean}\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)\right]}{H_{\text{ст}_i}}$$

$$\eta_{u1_i} = \frac{Lu_{\text{ст}_i}}{H_{\text{ст}_i}}$$

$$\eta_{\text{лоп}_i} = 1 - \xi_{\text{САиРК}_i} - \xi_{\text{РК}_i} - \xi_{\Delta r_i} - \xi_{\text{тр.в}_i}$$

$$\eta_{u2_i} = 1 - \xi_{\text{САиРК}_i} - \xi_{\text{РК}_i} - \xi_{\text{вых}_i}$$

$$\eta_{\text{мощь}_i} = 1 - \xi_{\text{САиРК}_i} - \xi_{\text{РК}_i} - \xi_{\text{вых}_i} - \xi_{\Delta r_i} - \xi_{\text{тр.в}_i}$$

$$L_{\text{ст}_i} = H_{\text{ст}_i} \cdot \eta_{\text{мощь}_i}$$

$$\text{trace}\left(\text{concat}\left(\text{"eps(N) = "}, \text{num2str}\left(\text{eps}\left(\text{"rel"}, N_{\text{ст}_i}, L_{\text{ст}_i} \cdot \text{mean}\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)\right)\right)\right)\right)$$

$$\text{break if } \left(\left|\text{eps}\left(\text{"rel"}, N_{\text{ст}_i}, L_{\text{ст}_i} \cdot \text{mean}\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)\right)\right| \le \text{epsilon}\right) \wedge \left(\text{iteration}_{\text{ст}_i} = 0\right)$$

$$\text{iteration}_{\text{ст}_i} = -1 \text{ if } \left|\text{eps}\left(\text{"rel"}, N_{\text{ст}_i}, L_{\text{ст}_i} \cdot \text{mean}\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)\right)\right| \le \text{epsilon}$$

$$Lu_{\text{нагрузка}_i} = \frac{Lu_{\text{ст}_i}}{\left(\text{mean}\left(u_{st(i,2),r}, u_{st(i,3),r}\right)\right)^2}$$

$$\begin{pmatrix} \pi^*_{\text{ст}_i} \\ \pi_{\text{ст}_i} \end{pmatrix} = P^*_{st(i,1),r} \cdot \begin{bmatrix} \left(P^*_{st(i,3),r}\right)^{-1} \\ \left(P_{st(i,3),r}\right)^{-1} \end{bmatrix}$$

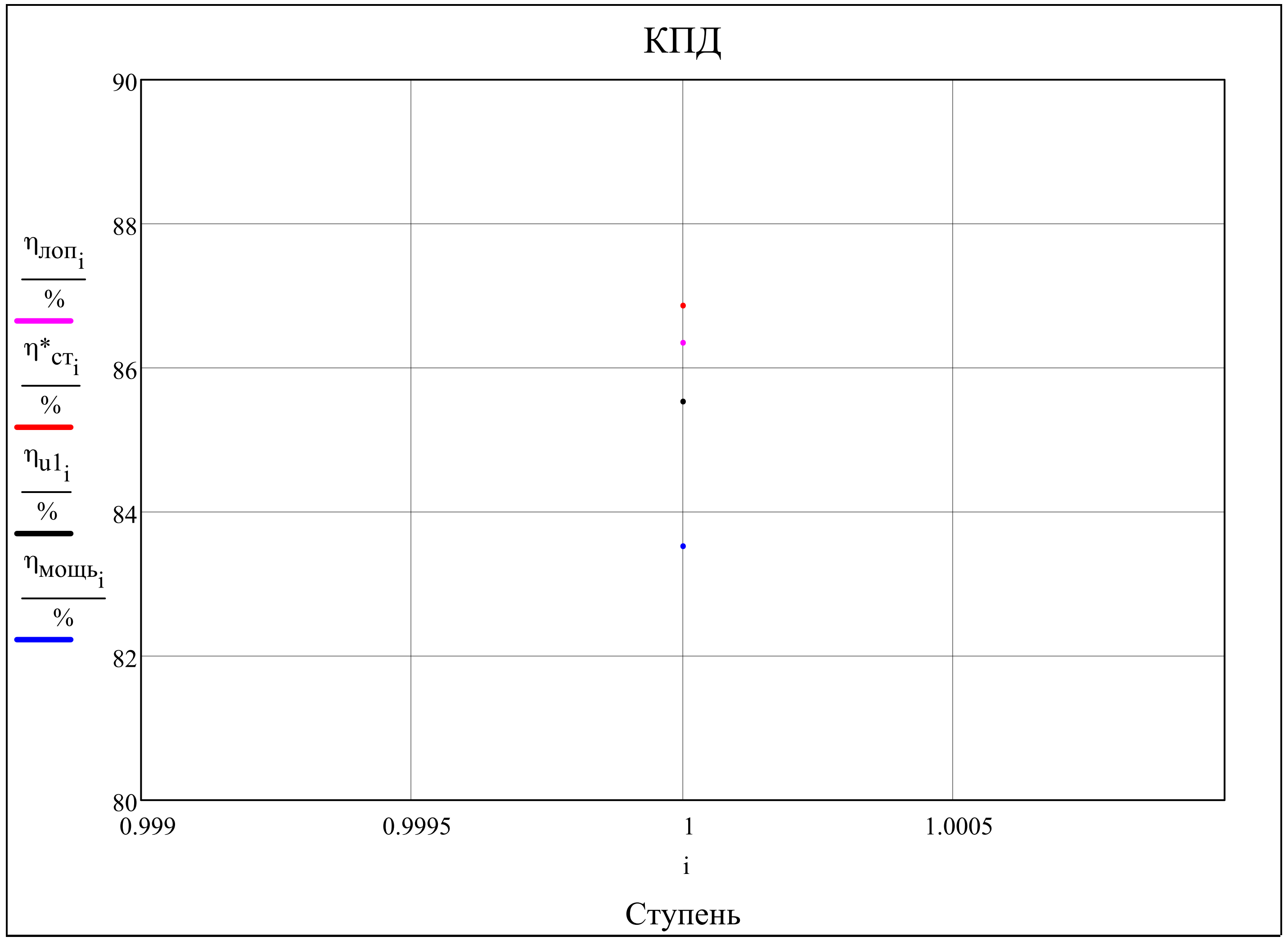
$$k_{\text{ср}} = k_{\text{ад}}\left(Cp_{\text{газ.ср}}\left(P_{st(i,1),r}, P_{st(i,3),r}, T_{st(i,1),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right), R_{\text{газ.ср}}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)\right)$$

```
    $H^*_{ст_i} = Cp_{газ.ср}\left(P_{st(i,1),r}, P_{st(i,3),r}, T_{st(i,1),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right) \cdot T^*_{st(i,1),r} \cdot \left[1 - \left(\pi^*_{ст_i}\right)^{\frac{\qquad _{cp}}{k_{cp}}}\right]$
    $\eta^*_{ст_i} = \dfrac{L_{ст_i}}{H^*_{ст_i}}$
for $i \in 1..Z$
  for $j \in 1..3$
    $\rho^*_{st(i,j),r} = \dfrac{P^*_{st(i,j),r}}{R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,j)}}, Fuel\right) \cdot T^*_{st(i,j),r}}$
    $\rho_{st(i,j),r} = \left(v_{st(i,j),r}\right)^{-1}$
    $\begin{pmatrix} \varepsilon_{stator_{i,av(N_r)}} \\ \varepsilon_{rotor_{i,av(N_r)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{st(i,2),av(N_r)} - \alpha_{st(i,1),av(N_r)} \\ \beta_{st(i,3),av(N_r)} - \beta_{st(i,2),av(N_r)} \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} iteration_{CA} & iteration_{PK} \\ k & R_L \\ H^*_{ст} & H_{ст} \\ H_{stator} & H_{rotor} \\ c_{ад} & w_{ад} \\ P^* & P \\ T^* & T \\ G & v \\ \rho^* & \rho \\ \alpha_{ox} & \alpha_{ox} \\ \alpha & \beta \\ \varepsilon_{stator} & \varepsilon_{rotor} \\ \theta_{CA} & \theta_{PK} \\ g_{охлCA} & g_{охлPK} \\ a^*_c & a^*_w \\ T_{ад} & T_{ад} \\ P^*_w & T^*_w \\ a_{зв} & a_{зв} \\ u & u \\ c & c \\ c_a & c_u \end{pmatrix}$
```

$$\begin{matrix}
w & w \\
w_a & w_u \\
\lambda_c & M_c \\
\lambda_w & M_w \\
\upsilon_{stator} & \upsilon_{rotor} \\
chord_{stator} & chord_{rotor} \\
\bar{t}_{\text{оптСА}} & \bar{t}_{\text{оптРК}} \\
t_{stator} & t_{rotor} \\
Z_{stator} & Z_{rotor} \\
\bar{\upsilon}_{stator} & \bar{\upsilon}_{rotor} \\
\xi_{\text{трСА}} & \xi_{\text{трРК}} \\
\xi_{\text{крСА}} & \xi_{\text{крРК}} \\
\xi_{\text{ReCA}} & \xi_{\text{ReРК}} \\
\xi_{\lambda \text{CA}} & \xi_{\lambda \text{РК}} \\
\xi_{\text{прСА}} & \xi_{\text{прРК}} \\
\xi_{\text{втСА}} & \xi_{\text{втРК}} \\
\xi_{\text{тдСА}} & \xi_{\text{тдРК}} \\
\xi_{\text{смСА}} & \xi_{\text{смРК}} \\
\xi_{\Delta r} & \xi_{\text{вых}} \\
\xi_{\text{тр.в}} & \xi_{\text{тр.в}} \\
L_{\text{ст}} & Lu_{\text{ст}} \\
\eta_{\text{мощь}} & \eta_{\text{лоп}} \\
\eta^*_{\text{ст}} & \eta^*_{\text{ст}} \\
\eta_{u1} & \eta_{u2} \\
\xi_{\text{CA}} & \xi_{\text{РК}} \\
Lu_{\text{нагрузка}} & Lu_{\text{нагрузка}}
\end{matrix}\Bigg)$$

▲ Поступенчатый расчет ОТ

Параметры турбины



$$\eta_{лоп}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 86.35 \end{array} \cdot\%$$

$$\eta^*{}_{ст}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 86.87 \end{array} \cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\eta_{u1}^{T}, \eta_{u2}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 85.54 \\ 2 & 86.83 \end{array} \cdot\%$$

$$\eta_{мощь}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 83.53 \end{array} \cdot\%$$

$$\eta_{мощь_i} \le \eta_{u1_i} \le \eta^*_{ст_i} \le \eta_{лоп_i} = \boxed{0}$$

Степень понижения полного давления Т:
Степень понижения давления Т:

$$\begin{pmatrix} \pi^*_{Т} \\ \pi_{Т} \end{pmatrix} = P^*_{st(1,1),av(N_r)} \cdot \begin{bmatrix} \left(P^*_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{-1} \\ \left(P_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{-1} \end{bmatrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 3.14 \\ \hline 2 & 3.26 \\ \hline \end{array}$$

Теплоперепад по параметрам торможения (Дж/кг):
Располагаемый теплоперепад (Дж/кг):

$$\begin{pmatrix} H^*_{Т} \\ H_{Т} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{Z} H^*_{ст_i} \\ \sum_{i=1}^{Z} H_{ст_i} \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 516.1 \\ \hline 2 & 536.7 \\ \hline \end{array} \cdot 10^3$$

Мощность Т (Вт): $\sum_{i=1}^{Z} N_{ст_i} = 14.89 \cdot 10^6$ $\quad eps\left("rel", N_{Т}, \sum_{i=1}^{Z} N_{ст_i}\right) = 0.000 \cdot \%$

Удельная поступенчатая работа Т [Дж/кг]: $L_{Т} = \sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} = 448.6 \cdot 10^3$

Лопаточный КПД Т: $\eta_{Тлоп} = \dfrac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} + \frac{\left(c_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^2}{2}}{H_{Т}} = 86.4 \cdot \%$

$$k_{Т.ср} = k_{ад}\left(Cp_{газ.ср}\left(P_{st(1,1),av(N_r)}, P_{st(Z,3),av(N_r)}, T_{st(1,1),av(N_r)}, T_{st(Z,3),av(N_r)}, \alpha ox_{st(1,1)}, \alpha ox_{st(Z,3)}, Fuel\right), R_{газ.ср}\left(\alpha ox_{st(1,1)}, \alpha ox_{st(Z,3)}, Fuel\right)\right) = 1.289$$

Адиабатный КПД Т: $\eta^*_{Т} = \dfrac{L_{Т}}{H^*_{Т}} = 86.92 \cdot \%$

Политропический КПД Т: $\eta^*_{Т.п} = \eta^*_{п}\left("расширение", \eta^*_{Т}, \pi^*_{Т}, k_{Т.ср}\right) = 85.37 \cdot \%$

Мощностной КПД Т: $\eta_{Тмощь} = \dfrac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)}}{H_{Т}} = 83.58 \cdot \%$

$$L_{ст}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 448.3 \end{array} \cdot 10^{3}$$

$$N_{ст}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 14.89 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$Lu_{ст}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 459.1 \end{array} \cdot 10^{3}$$

$$Lu_{нагрузка}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1.7 \end{array}$$

$$H_{ст}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 536.7 \end{array} \cdot 10^{3}$$

$$\mathrm{stack}\left(H_{stator}{}^{T}, H_{rotor}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 450.9 \\ 2 & 87.0 \end{array} \cdot 10^{3}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(R_{L}{}^{T}, \mathrm{av}\left(N_{r}\right), \mathrm{av}\left(N_{r}\right), 1, Z\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.2 \end{array}$$

$$G^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 32.193 & 33.050 & 33.350 \end{array}$$

$$\alpha_{ox}{}^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2.267 & 2.294 & 2.303 \end{array}$$

$$\mathrm{stack}\left(\theta_{CA}{}^{T}, \theta_{PK}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.432 \\ 2 & 0.206 \end{array}$$

$$\mathrm{stack}\left(g_{охлCA}{}^{T}, g_{охлPK}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 26.61 \\ 2 & 9.09 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$G_{охлCA_{i}} = g_{охлCA_{i}} \cdot G_{st(i,1)}$$

$$G_{охлPK_{i}} = g_{охлPK_{i}} \cdot G_{st(i,2)}$$

$$\mathrm{stack}\left(G_{охлCA}{}^{T}, G_{охлPK}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.9 \\ 2 & 0.3 \end{array}$$

$$G_{cooling} = 3.2$$

$$\sum_{i=1}^{Z} G_{охлCA_{i}} + \sum_{i=1}^{Z} G_{охлCA_{i}} \le G_{cooling} = 1$$

$\mathrm{stack}\left(\mathrm{iteration}_{CA}{}^{T},\mathrm{iteration}_{PK}{}^{T}\right) =$

	1
1	2
2	2

$\mathrm{submatrix}\left(k^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	1.283	1.293	1.295

$\mathrm{submatrix}\left(P{*}^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	2731.8	2413.7	870.5

$\cdot 10^{3}$

$\mathrm{submatrix}\left(P^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	2705.2	1017.3	838.1

$\cdot 10^{3}$

$\mathrm{submatrix}\left(T{*}^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1773.0	1759.0	1394.2						

$\mathrm{submatrix}\left(T^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1769.2	1447.0	1382.2						

$\mathrm{submatrix}\left(T{*}_{w}{}^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	1509.6	1500.0						

$\mathrm{submatrix}\left(T_{\text{ад}}{}^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	1428.5	1378.7						

$\mathrm{submatrix}\left(v^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

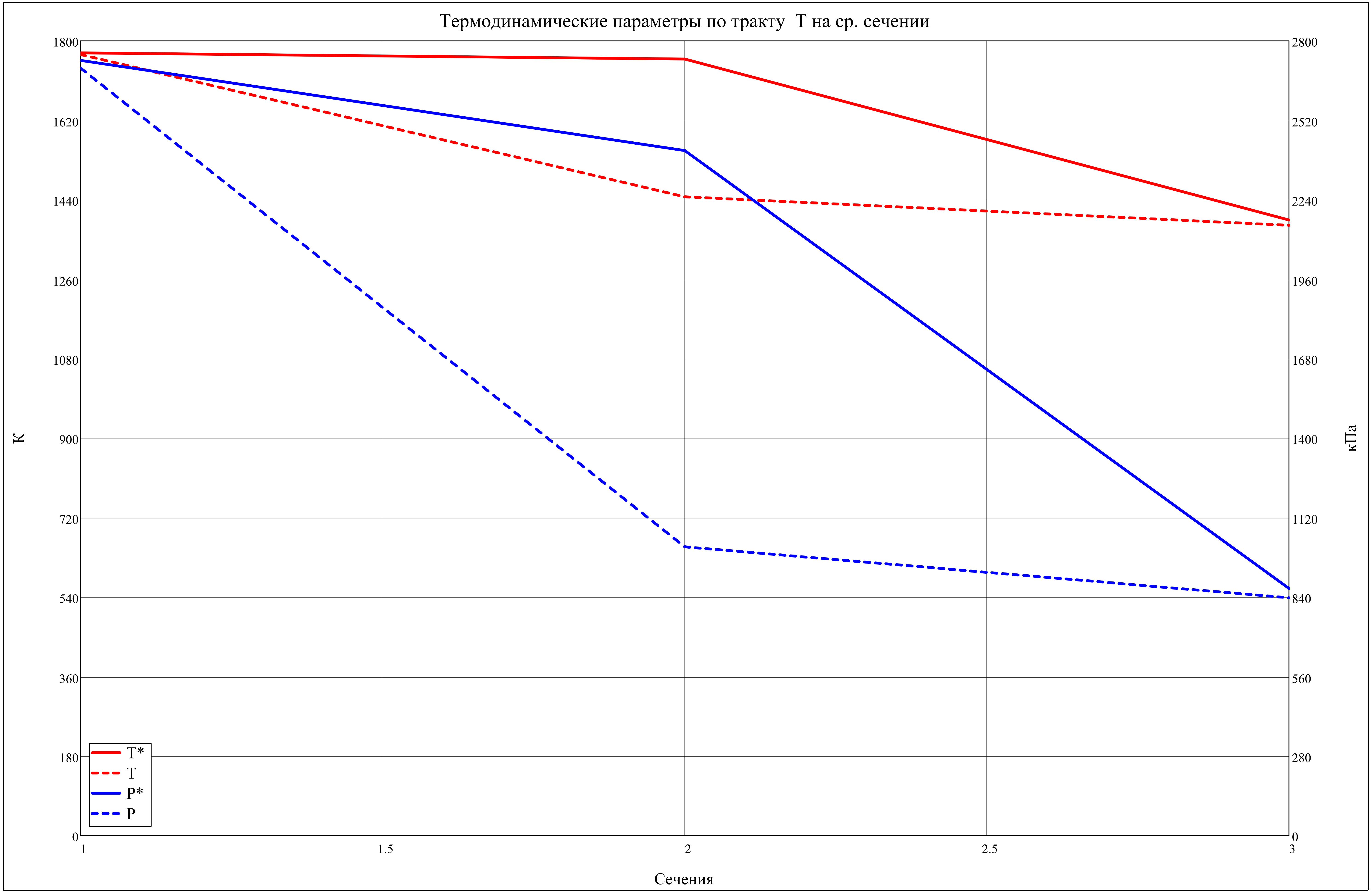
	1	2	3
1	0.189	0.410	0.487

$\mathrm{submatrix}\left(\rho{*}^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	5.341	4.756	2.164

$\mathrm{submatrix}\left(\rho^{T},\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	5.300	2.437	2.053



Термодинамические параметры по тракту Т на ср. сечении

$\mathrm{submatrix}\left(a_{зв}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	809.2	734.6	718.7

$\mathrm{submatrix}\left(a*_{c}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	758.2	756.5	673.8

$\mathrm{submatrix}\left(a*_{w}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	0.0	700.8	698.9

$\mathrm{submatrix}\left(c^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	100.0	892.5	174.1

$\mathrm{submatrix}\left(c_{u}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	0.0	864.2	-2.7

$\mathrm{submatrix}\left(c_{a}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	100.0	223.3	174.0

$\mathrm{submatrix}\left(w^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	0.0	399.5	545.8

$\mathrm{submatrix}\left(w_{u}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	0.0	331.3	517.3

$\mathrm{submatrix}\left(w_{a}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	0.0	223.3	174.0

$\mathrm{submatrix}\left(c_{ад}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z\right) =$

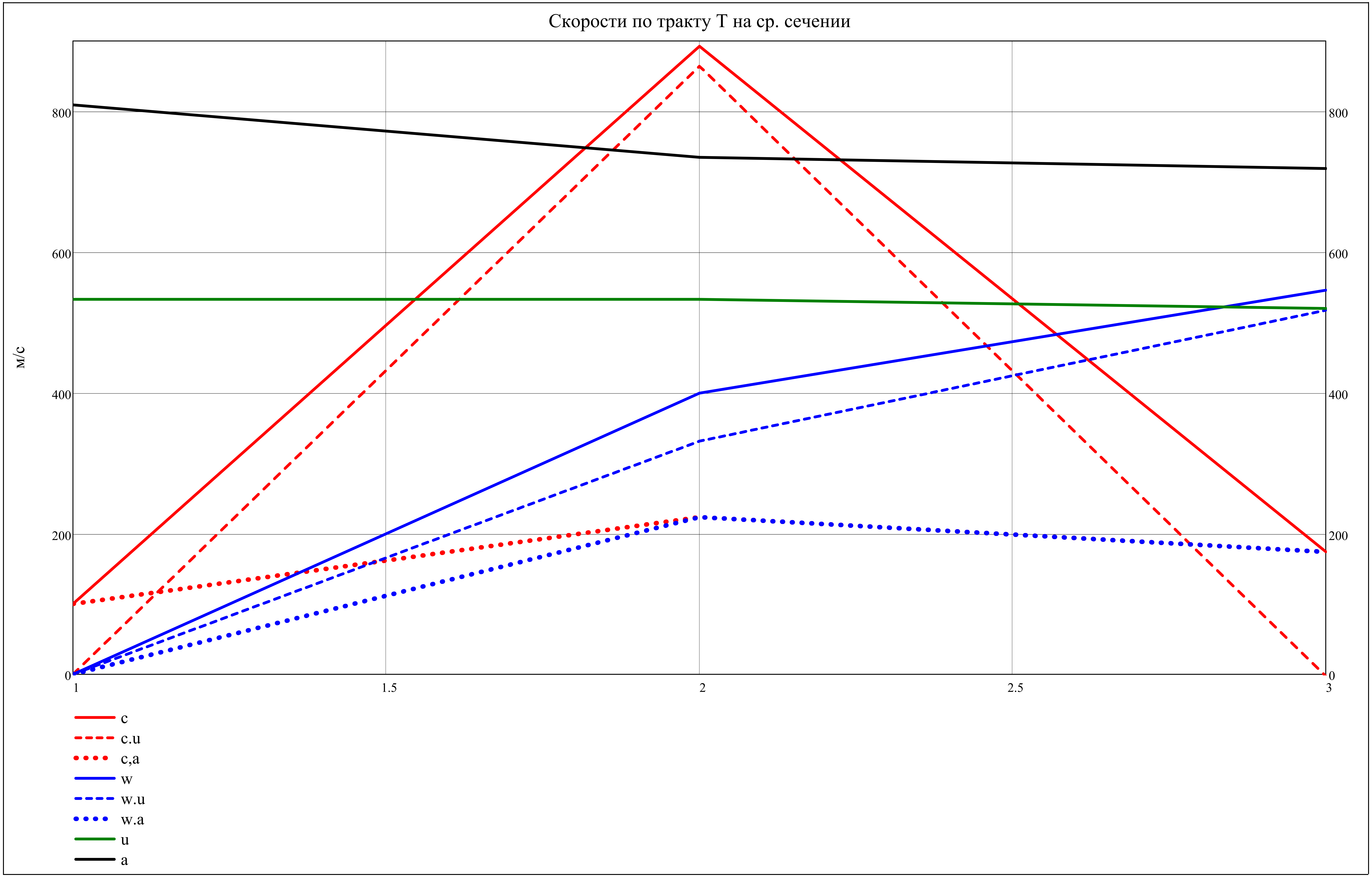
	1	2
1	1036.1	949.6

$\mathrm{submatrix}\left(w_{ад}{}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, 2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	0.0	0.0	565.7

$u^{T} =$

	1	2	3
1	510.5	510.5	484.8
2	532.9	532.9	520.0
3	555.2	555.2	555.2



Скорости по тракту Т на ср. сечении

$\mathrm{submatrix}\left(\alpha,1,2\cdot Z+1,\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.00	14.49	90.87						

$\cdot °$

$\mathrm{submatrix}\left(\alpha,1,2\cdot Z+1,\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T \geq 11\cdot ° =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1						

$\mathrm{submatrix}\left(\beta,1,2\cdot Z+1,\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.00	33.98	18.59									

$\cdot °$

$\mathrm{submatrix}\left(\varepsilon_{stator},1,Z,\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T =$

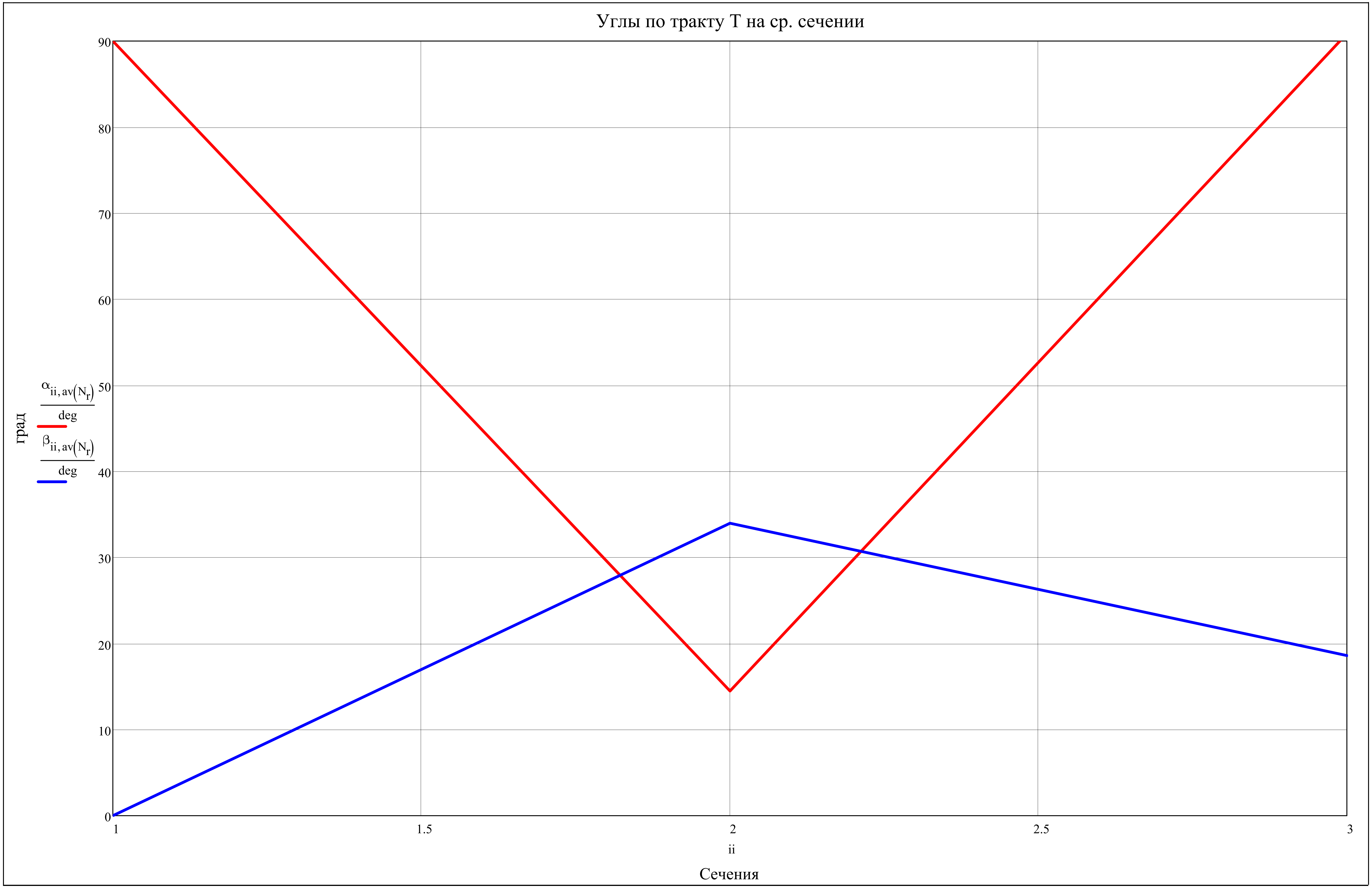
	1	2	3	4	5	6
1	-75.51					

$\cdot °$

$\mathrm{submatrix}\left(\varepsilon_{rotor},1,Z,\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T =$

	1	2	3	4	5	6
1	-15.39					

$\cdot °$


Углы по тракту Т на ср. сечении
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
град
$\frac{\alpha_{ii,av(N_r)}}{deg}$
$\frac{\beta_{ii,av(N_r)}}{deg}$
1
1.5
2
2.5
3
ii
Сечения

$$\mathrm{submatrix}\left(\lambda_c, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{c|c|c|c} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.1319 & 1.1799 & 0.2583 \end{array}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(\lambda_w, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{c|c|c|c} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.0000 & 0.5701 & 0.7810 \end{array}$$

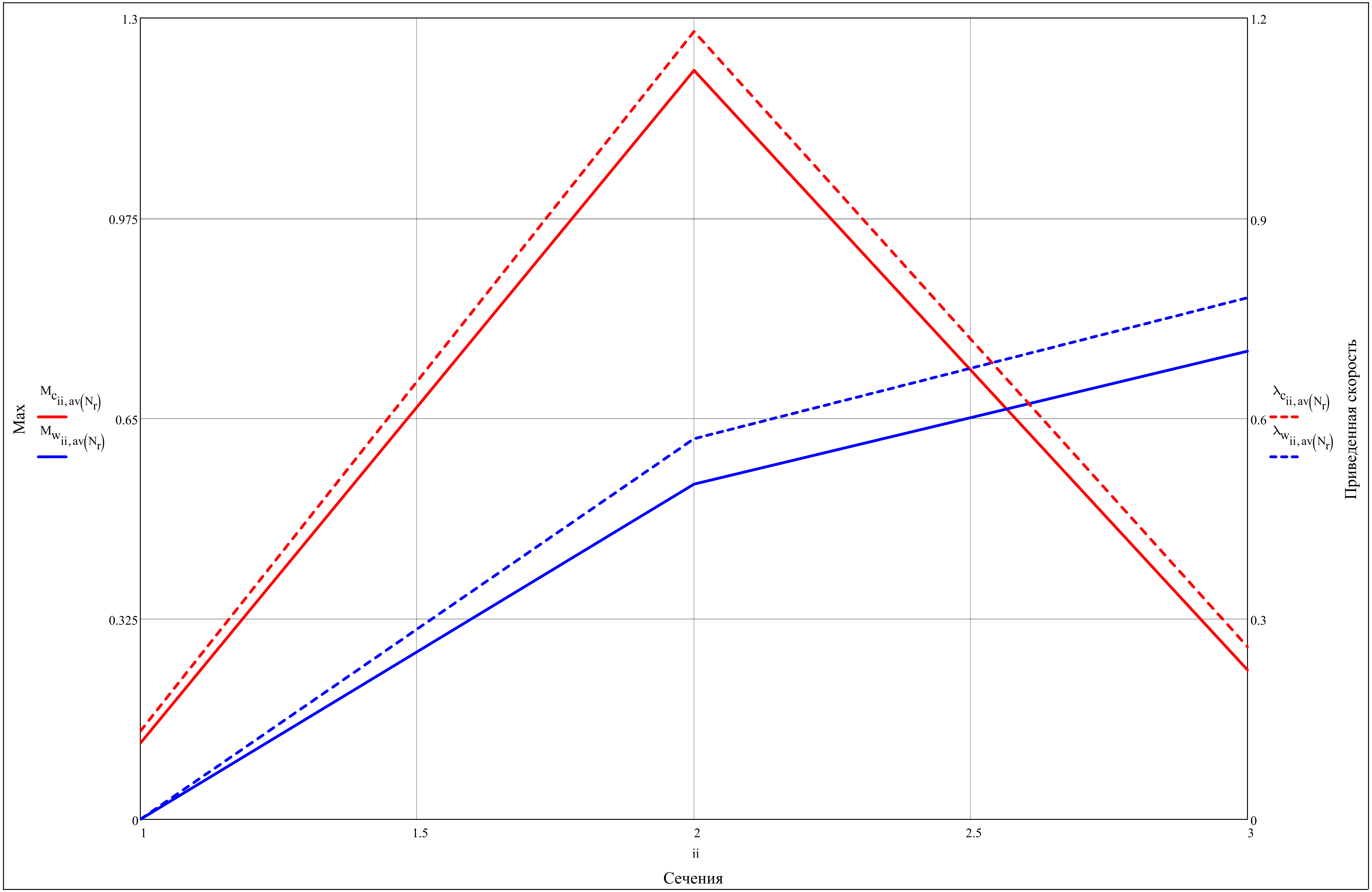
$$\mathrm{submatrix}\left(M_c, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{c|c|c|c} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.1236 & 1.2150 & 0.2422 \end{array}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(M_c, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T \le 1 = \begin{array}{c|c|c|c} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 1 \end{array}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(M_w, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{c|c|c|c} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.0000 & 0.5438 & 0.7594 \end{array}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(M_w, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T \le 1 = \begin{array}{c|c|c|c} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

$$\mathrm{stack}\left(\upsilon_{stator}{}^T, \upsilon_{rotor}{}^T\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 37.03 \\ 2 & 67.08 \end{array} \cdot ^\circ$$


1.3
0.975
0.65
0.325
0
1.2
0.9
0.6
0.3
0
1
1.5
2
2.5
3
ii
Сечения
Мах
Приведенная скорость
$M_{c_{ii,av}(N_r)}$
$M_{w_{ii,av}(N_r)}$
$\lambda_{c_{ii,av}(N_r)}$
$\lambda_{w_{ii,av}(N_r)}$

$$t_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 56.7 \\ 2 & 59.2 \\ 3 & 61.7 \end{array} \cdot 10^{-3} \qquad t_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 22.4 \\ 2 & 23.7 \\ 3 & 25.0 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(chord_{stator}{}^{T}, av(N_r), av(N_r), 1, Z\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 68.0 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(chord_{rotor}{}^{T}, av(N_r), av(N_r), 1, Z\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 32.7 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{stack}\left(Z_{stator}{}^{T}, Z_{rotor}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 36 \\ 2 & 89 \end{array}$$

$$\mathrm{stack}\left(\overline{t}_{\text{оптCA}}{}^{T}, \overline{t}_{\text{оптPK}}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.872 \\ 2 & 0.724 \end{array}$$

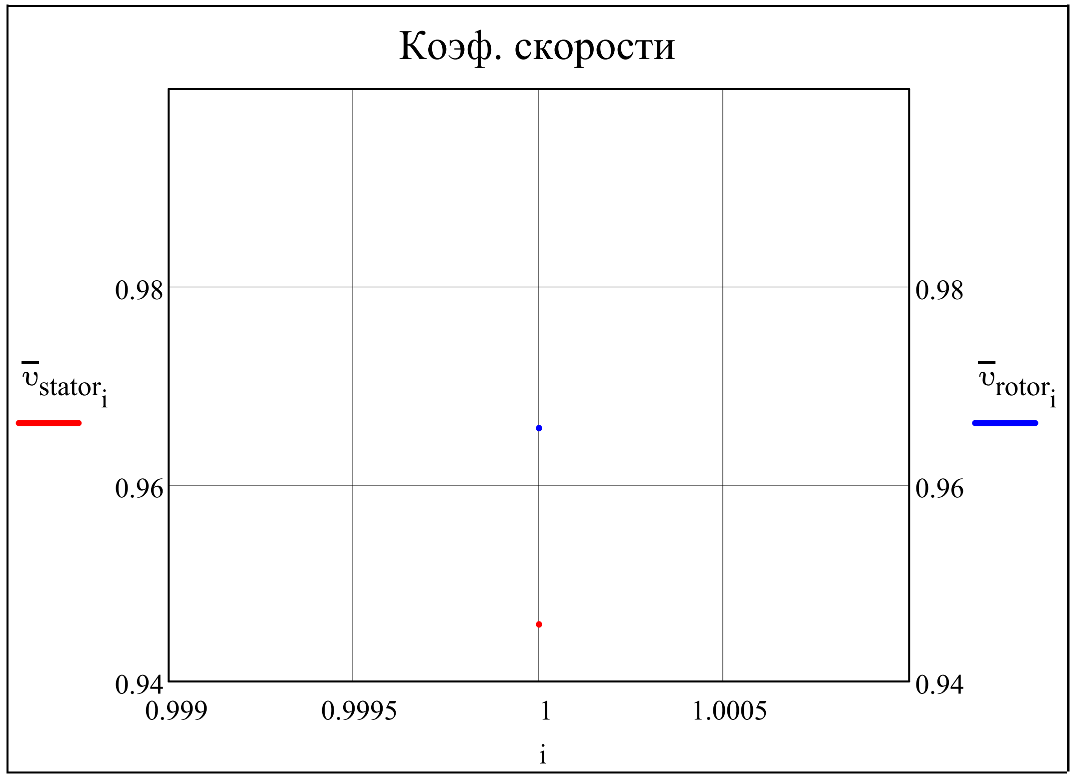
$$\frac{t_{stator_{i,av(N_r)}}}{chord_{stator_{i,av(N_r)}}} = \boxed{0.871}$$

$$0.7 \le \frac{t_{stator_{i,av(N_r)}}}{chord_{stator_{i,av(N_r)}}} \le 1 = \boxed{1}$$

$$\frac{t_{rotor_{i,av(N_r)}}}{chord_{rotor_{i,av(N_r)}}} = \boxed{0.724}$$

$$0.7 \le \frac{t_{rotor_{i,av(N_r)}}}{chord_{rotor_{i,av(N_r)}}} \le 1 = \boxed{1}$$

$$\text{stack}\left(\overline{\upsilon}_{stator}{}^{T}, \overline{\upsilon}_{rotor}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.9458 \\ 2 & 0.9657 \end{array}$$



$\mathrm{stack}\left(\xi_{трСА}{}^{T}, \xi_{трРК}{}^{T}\right) =$

	1
1	1.398
2	2.620

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{крСА}{}^{T}, \xi_{крРК}{}^{T}\right) =$

	1
1	2.753
2	1.689

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{ReСА}{}^{T}, \xi_{ReРК}{}^{T}\right) =$

	1
1	-0.135
2	0.085

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{\lambda СА}{}^{T}, \xi_{\lambda РК}{}^{T}\right) =$

	1
1	2.434
2	0.024

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{втСА}{}^{T}, \xi_{втРК}{}^{T}\right) =$

	1
1	1.453
2	0.881

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{тдСА}{}^{T}, \xi_{тдРК}{}^{T}\right) =$

	1
1	1.856
2	1.200

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{смСА}{}^{T}, \xi_{смРК}{}^{T}\right) =$

	1
1	0.784
2	0.248

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{СА}{}^{T}, \xi_{РК}{}^{T}\right) =$

	1
1	8.748
2	2.008

$\cdot\%$

$\xi_{вых}{}^{T} =$

	1
1	2.822

$\cdot\%$

$\xi_{\Delta r}{}^{T} =$

	1
1	2.476

$\cdot\%$

$\xi_{тр.в}{}^{T} =$

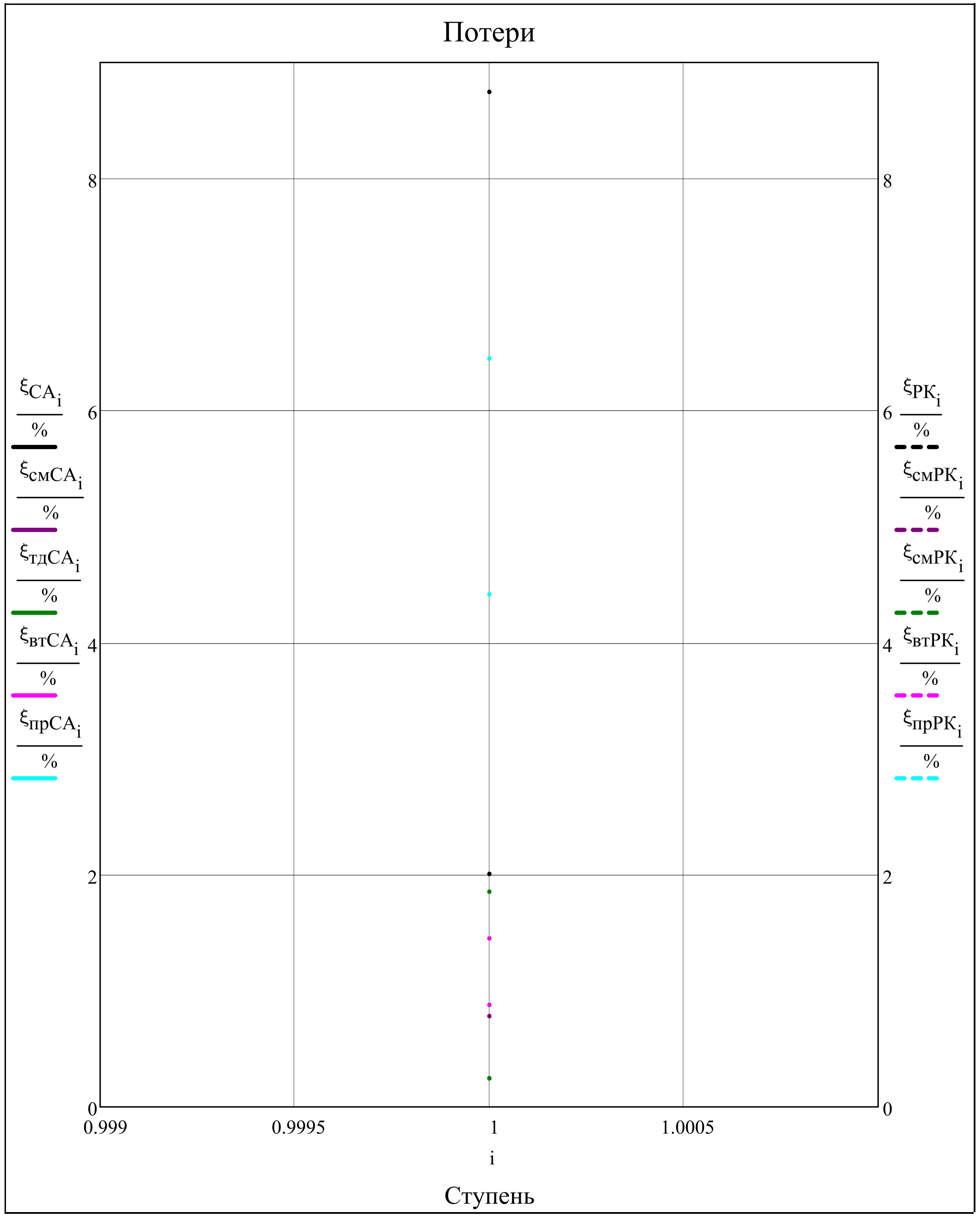
	1
1	0.831

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{прСА}{}^{T}, \xi_{прРК}{}^{T}\right) =$

	1
1	6.451
2	4.418

$\cdot\%$



▲ Параметры турбины

Вывод результатов поступенчатого расчета по ср. сечению ОТ в EXCEL:

▼ Выбор закона профилирования Л по высоте

$$m = \begin{pmatrix} \left| \begin{array}{ll} \overline{\upsilon}_{stator_1}\cdot\cos\left(\alpha_{st(1,2),av\left(N_r\right)}\right)^2 & \text{if } Z = 1 \\ -0.5 & \text{otherwise} \end{array} \right. \\ -0.25 \\ 0 \\ 0.25 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \text{"}\alpha\text{.2=const"} \\ \text{"}\Gamma\text{=const"} \\ \text{"m=const"} \\ \text{"R=const"} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\alpha_{st(i,2),av\left(N_r\right)}\right)^2\cdot\overline{\upsilon}_{stator_i} \\ 1\cdot\overline{\upsilon}_{stator_i} \\ 0.2 \\ -1\cdot\overline{\upsilon}_{stator_i} \end{pmatrix}$$

$m^T =$

	1	2	3	4	5	6
1	0.8866	-0.2500	0.0000	0.2500	1.0000	1.0000

▲ Выбор закона профилирования Л по высоте

Расчет Л по высоте

$$\begin{pmatrix} P^* & P \\ T^* & T^*_w \\ T & T \\ \rho^* & \rho \\ k & R_L \\ a^*_c & a^*_w \\ a_{зв} & a_{зв} \\ c & w \\ c_u & w_u \\ c_a & w_a \\ \Delta c_a & \Delta c_a \\ \alpha & \beta \\ \lambda_c & M_c \\ \lambda_w & M_w \\ \varepsilon_{stator} & \varepsilon_{rotor} \end{pmatrix} =$$

```
for $i \in 1..Z$
  for $a \in 2..3$
    for $r \in 1..N_r$
      $A_{st(i,a)} = \left(1 - R_{L_{i,av(N_r)}}\right)\cdot\omega\cdot\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{m_i+1}$
      $B_{st(i,a)} = \dfrac{Lu_{cт_i}}{2\cdot\omega}$
      $c_{u_{st(i,a),r}} =$
        if $m_i = \overline{\upsilon}_{stator_i}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^2$
          $c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot\left(\dfrac{R_{st(i,a),av(N_r)}}{R_{st(i,a),r}}\right)^{m_i}$   if $a = 2$
          $\dfrac{u_{st(i,a-1),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}} + u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}} - u_{st(i,a-1),r}\cdot c_{u_{st(i,a-1),r}}}{u_{st(i,a),r}}$   otherwise
        otherwise
          $\dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)}$   if $a = 2$
          $-\dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)}$   otherwise
      $c_{a_{st(i,a),r}} =$
        $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] + 4\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}\cdot\left|\begin{matrix} -1 \text{ if } a = 2 \\ 1 \text{ otherwise}\end{matrix}\right.$   if $m_i = -1$
        $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right) - 2\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\left(\dfrac{1}{R_{st(i,a),r}} - \dfrac{1}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}\cdot\left|\begin{matrix} -1 \text{ if } a = 2 \\ 1 \text{ otherwise}\end{matrix}\right.$   if $m_i = 0$
```

```
if $m_i = \bar{\upsilon}_{stator_i}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^2$
    $c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot\sqrt{1+\dfrac{\left(1-\dfrac{\bar{\upsilon}_{stator_i}}{m_i}\right)\cdot\left[1-\dfrac{1}{\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{2\cdot m_i}}\right]}{\tan\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^2}}$ if a = 2
    $\sqrt{\begin{aligned}&\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 \dots\\&+\left[1-\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[\left(u_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\cdot\left[1-\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2\right]-2\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot\left[1-\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{1-m_i}\right]\right]\dots\\&+\left[1-\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[1-\dfrac{1}{\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2}\right]\cdot\left(c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}+c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2\dots\\&+-2\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}\cdot\left(c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}+c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\right)\cdot\left[1-\dfrac{2}{m_i+1}\cdot\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[1-\dfrac{1}{\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{m_i+1}}\right]\dots\\&+\left(c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}\right)^2\cdot\left[1-\dfrac{\left(\bar{\upsilon}_{stator_i}\right)^2\cdot\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2}{m_i}\right]\cdot\left[1-\dfrac{1}{\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{2\cdot m_i}}\right]\end{aligned}}$ otherwise
$\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2+\dfrac{A_{st(i,a)}\cdot(m_i-1)\cdot\left[\begin{aligned}&-A_{st(i,a)}\cdot(m_i+1)\cdot\left[\dfrac{1}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{2\cdot m_i}}-\dfrac{1}{\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{2\cdot m_i}}\right]\dots\\&+2\cdot B_{st(i,a)}\cdot m_i\cdot\left[\dfrac{1}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i+1}}-\dfrac{1}{\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{m_i+1}}\right]\cdot\begin{cases}-1 & \text{if } a=2\\ 1 & \text{otherwise}\end{cases}\end{aligned}\right]}{m_i\cdot(m_i+1)}}$ otherwise
for $i\in 1..2\cdot Z+1$
    for $r\in 1..N_r$
        $\begin{pmatrix}c_{u_{i,r}}\\ c_{a_{i,r}}\end{pmatrix} = c_{i,av(N_r)}\cdot\begin{pmatrix}\cos\left(\alpha_{i,av(N_r)}\right)\\ \sin\left(\alpha_{i,av(N_r)}\right)\end{pmatrix}$ if (i = 1)
        $P^*_{i,r} = P^*_{i,av(N_r)}$
        $T^*_{i,r} = T^*_{i,av(N_r)}$
        $\rho^*_{i,r} = \dfrac{P^*_{i,r}}{R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_i},Fuel\right)\cdot T^*_{i,r}}$
```

$$k_{i,r} = k_{\text{ад}}\left(Cp_{\text{воздух}}\left(P*_{i,r}, T*_{i,r}\right), R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_i}, \text{Fuel}\right)\right)$$

$$a*_{c_{i,r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_{i,r}}{k_{i,r}+1} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_i}, \text{Fuel}\right) \cdot T*_{i,r}}$$

$$\alpha_{i,r} = \text{triangle}\left(c_{a_{i,r}}, c_{u_{i,r}}\right)$$

$$c_{i,r} = \frac{c_{a_{i,r}}}{\sin\left(\alpha_{i,r}\right)}$$

$$\lambda_{c_{i,r}} = \frac{c_{i,r}}{a*_{c_{i,r}}}$$

$$\begin{pmatrix} T_{i,r} \\ P_{i,r} \\ \rho_{i,r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T*_{i,r} \cdot \text{ГДФ}\left(\text{"T"}, \lambda_{c_{i,r}}, k_{i,r}\right) \\ P*_{i,r} \cdot \text{ГДФ}\left(\text{"P"}, \lambda_{c_{i,r}}, k_{i,r}\right) \\ \rho*_{i,r} \cdot \text{ГДФ}\left(\text{"}\rho\text{"}, \lambda_{c_{i,r}}, k_{i,r}\right) \end{pmatrix}$$

$$a_{\text{зв}_{i,r}} = \sqrt{k_{i,r} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_i}, \text{Fuel}\right) \cdot T_{i,r}}$$

$$M_{c_{i,r}} = \frac{c_{i,r}}{a_{\text{зв}_{i,r}}}$$

$$\beta_{i,r} = \text{triangle}\left(c_{a_{i,r}}, u_{i,r} - c_{u_{i,r}}\right)$$

$$w_{i,r} = \frac{c_{a_{i,r}}}{\sin\left(\beta_{i,r}\right)}$$

$$\begin{pmatrix} w_{u_{i,r}} \\ w_{a_{i,r}} \end{pmatrix} = w_{i,r} \cdot \begin{pmatrix} \cos\left(\beta_{i,r}\right) \\ \sin\left(\beta_{i,r}\right) \end{pmatrix}$$

$$T*_{w_{i,r}} = T*_{i,r} - \frac{\left(c_{i,r}\right)^2 - \left(w_{i,r}\right)^2}{2 \cdot \frac{k_{i,r}}{k_{i,r}-1} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_i}, \text{Fuel}\right)}$$

$$a*_{w_{i,r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_{i,r}}{k_{i,r}+1} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_i}, \text{Fuel}\right) \cdot T*_{w_{i,r}}}$$

$$\lambda_{w_{i,r}} = \frac{w_{i,r}}{a*_{w_{i,r}}}$$

$$M_{w_{i,r}} = \frac{w_{i,r}}{a_{\text{зв}_{i,r}}}$$

for $i \in 1..Z$

for $r \in 1..N_r$

$$\begin{pmatrix}\Delta c_{a_{st(i,1),r}}\\ \Delta c_{a_{st(i,2),r}}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}c_{a_{st(i,2),r}} - c_{a_{st(i,1),r}}\\ c_{a_{st(i,3),r}} - c_{a_{st(i,2),r}}\end{pmatrix}$$

$$R_{L_{i,r}} = 1 - \frac{c_{u_{st(i,2),r}} - c_{u_{st(i,3),r}}}{u_{st(i,2),r} + u_{st(i,3),r}}$$

$$\varepsilon_{stator_{i,r}} = \left|\begin{array}{ll}\alpha_{st(i,2),r} - \alpha_{st(i,1),r} & \text{if } \alpha_{st(i,2),r} \ge \frac{\pi}{2}\\ \alpha_{st(i,1),r} - \alpha_{st(i,2),r} & \text{otherwise}\end{array}\right.$$

$$\varepsilon_{rotor_{i,r}} = \left|\begin{array}{ll}\beta_{st(i,3),r} - \beta_{st(i,2),r} & \text{if } \beta_{st(i,3),r} \ge \frac{\pi}{2}\\ \beta_{st(i,2),r} - \beta_{st(i,3),r} & \text{otherwise}\end{array}\right.$$

$$\begin{pmatrix}P^* & T^* & T & \rho^* & k & a^*_c & a_{зв} & c & c_u & c_a & \Delta c_a & \alpha & \lambda_c & \lambda_w & \varepsilon_{stator}\\ P & T^*_w & T & \rho & R_L & a^*_w & a_{зв} & w & w_u & w_a & \Delta c_a & \beta & M_c & M_w & \varepsilon_{rotor}\end{pmatrix}^T$$

▲ Расчет Л по высоте

Результаты расчета Л по высоте

$P*^T =$

	1	2	3
1	2731.8	2413.7	870.5
2	2731.8	2413.7	870.5
3	2731.8	2413.7	870.5

$\cdot 10^3$

$T*^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1773.0	1759.0	1394.2						
2	1773.0	1759.0	1394.2						
3	1773.0	1759.0	1394.2						

$T*_w{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1878.6	1493.1	1491.4						
2	1888.0	1500.7	1508.0						
3	1897.9	1508.9	1525.6						

$\rho*^T =$

	1	2	3
1	5.341	4.756	2.164
2	5.341	4.756	2.164
3	5.341	4.756	2.164

$P^T =$

	1	2	3
1	2705.2	939.2	847.2
2	2705.2	1014.0	838.1
3	2705.2	1084.4	831.3

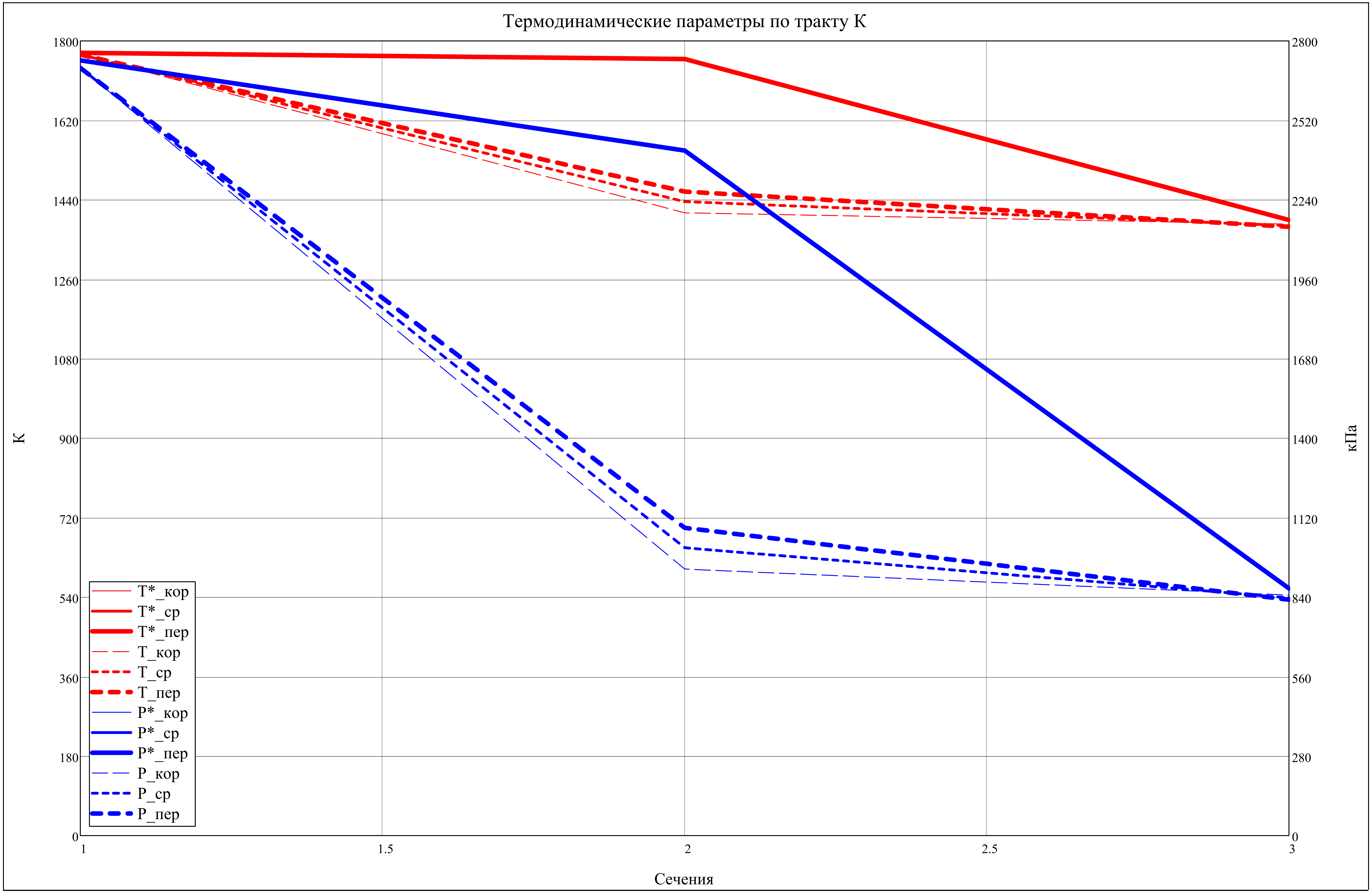
$\cdot 10^3$

$T^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1768.9	1410.5	1385.1						
2	1768.9	1436.0	1381.6						
3	1768.9	1458.8	1378.9						

$\rho^T =$

	1	2	3
1	5.301	2.308	2.120
2	5.301	2.448	2.103
3	5.301	2.577	2.090


Термодинамические параметры по тракту К
1800
1620
1440
1260
1080
900
720
540
360
180
0
К
2800
2520
2240
1960
1680
1400
1120
840
560
280
0
кПа
1
1.5
2
2.5
3
Сечения
T*_кор
T*_ср
T*_пер
T_кор
T_ср
T_пер
P*_кор
P*_ср
P*_пер
P_кор
P_ср
P_пер

$$k^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1.305 & 1.305 & 1.316 \\ 2 & 1.305 & 1.305 & 1.316 \\ 3 & 1.305 & 1.305 & 1.316 \end{array}$$

$$R_{L}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.0998 \\ 2 & 0.1767 \\ 3 & 0.2440 \end{array}$$

$$R_{L}^{T} \geq 0.05 = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ 2 & 1 \\ 3 & 1 \end{array}$$

$a^{*}{}_{c}^{T} =$

	1	2	3
1	761.0	758.1	676.1
2	761.0	758.1	676.1
3	761.0	758.1	676.1

$u^{T} =$

	1	2	3
1	510.5	510.5	484.8
2	532.9	532.9	520.0
3	555.2	555.2	555.2

$c^{T} =$

	1	2	3
1	100.0	927.2	147.3
2	100.0	892.5	174.1
3	100.0	860.6	191.8

$c_{u}^{T} =$

	1	2	3
1	0.0	897.7	1.8
2	0.0	864.2	-2.7
3	0.0	833.2	-6.4

$c_{a}^{T} =$

	1	2	3
1	100.0	231.9	147.3
2	100.0	223.3	174.0
3	100.0	215.3	191.7

$\Delta c_{a}^{T} =$

	1	2
1	131.9	-84.7
2	123.3	-49.3
3	115.3	-23.6

$a^{*}{}_{w}^{T} =$

	1	2	3
1	783.4	698.4	699.3
2	785.3	700.2	703.2
3	787.4	702.1	707.3

$a_{зв}^{T} =$

	1	2	3
1	816.1	728.8	725.3
2	816.1	735.4	724.4
3	816.1	741.2	723.7

$w^{T} =$

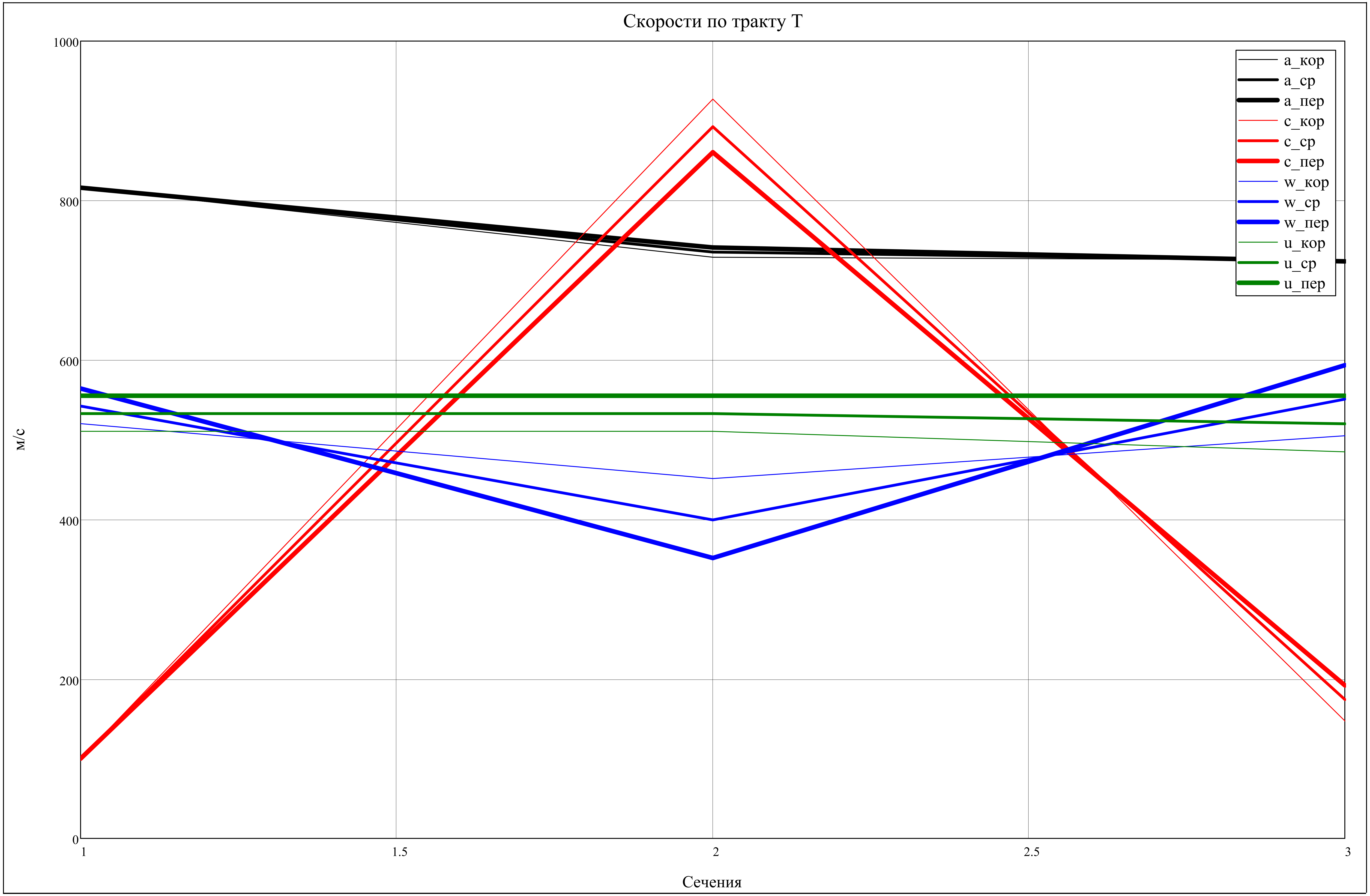
	1	2	3
1	520.2	451.4	504.9
2	542.2	399.5	550.9
3	564.2	351.6	593.4

$w_{u}^{T} =$

	1	2	3
1	510.5	-387.2	483.0
2	532.9	-331.3	522.7
3	555.2	-278.0	561.6

$w_{a}^{T} =$

	1	2	3
1	100.0	231.9	147.3
2	100.0	223.3	174.0
3	100.0	215.3	191.7


Скорости по тракту Т
1000
800
600
400
200
0
м/с
1
1.5
2
2.5
3
Сечения
a_кор
a_ср
a_пер
c_кор
c_ср
c_пер
w_кор
w_ср
w_пер
u_кор
u_ср
u_пер

$\alpha^T =$

	1	2	3
1	90.00	14.49	89.31
2	90.00	14.49	90.87
3	90.00	14.49	91.90

$\cdot °$

$\beta^T =$

	1	2	3
1	11.08	149.08	16.96
2	10.63	146.02	18.42
3	10.21	142.24	18.85

$\cdot °$

$80 \cdot ° \le \alpha^T =$

	1	2	3
1	1	0	1
2	1	0	1
3	1	0	1

[1, c.78]

Угол поворота потока:

$\varepsilon_{stator}{}^T =$

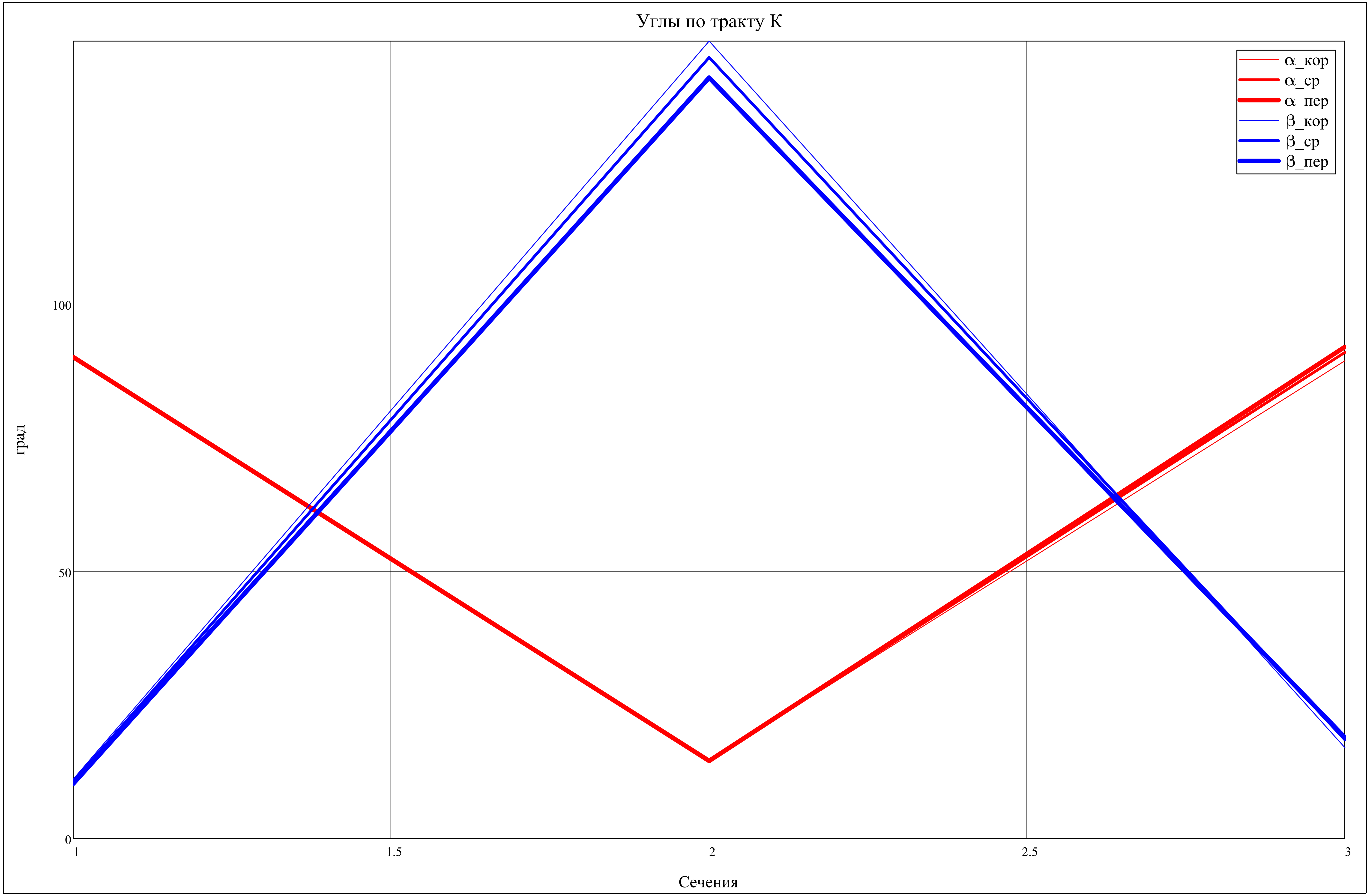
	1
1	75.51
2	75.51
3	75.51

$\cdot °$

$\varepsilon_{rotor}{}^T =$

	1
1	132.12
2	127.61
3	123.40

$\cdot °$


Углы по тракту К
α_кор
α_ср
α_пер
β_кор
β_ср
β_пер
град
100
50
0
1
1.5
2
2.5
3
Сечения

$\lambda_c{}^T =$

	1	2	3
1	0.131	1.223	0.218
2	0.131	1.177	0.257
3	0.131	1.135	0.284

$M_c{}^T =$

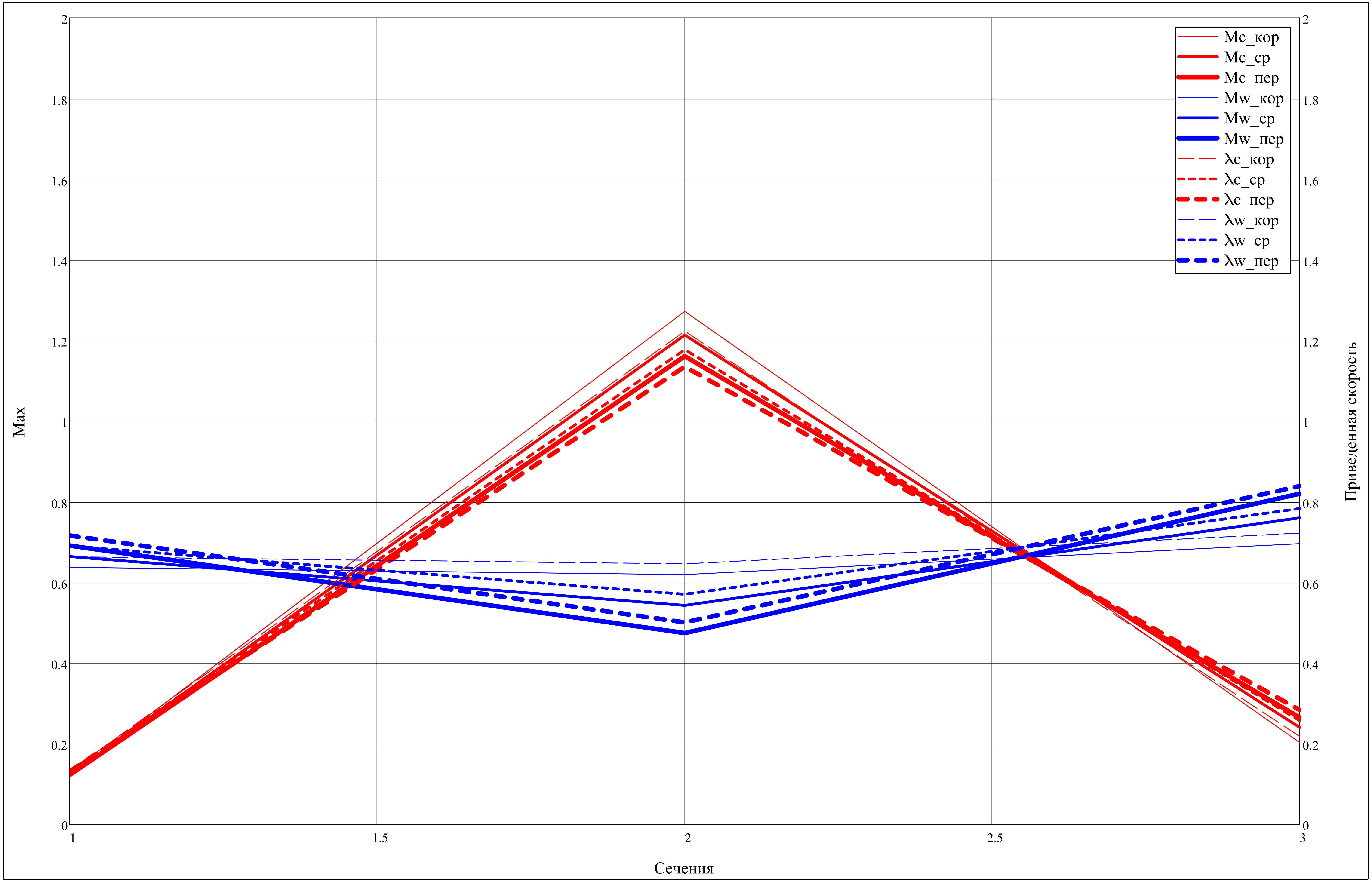
	1	2	3
1	0.123	1.272	0.203
2	0.123	1.214	0.240
3	0.123	1.161	0.265

$\lambda_W{}^T =$

	1	2	3
1	0.664	0.646	0.722
2	0.690	0.571	0.783
3	0.717	0.501	0.839

$M_W{}^T =$

	1	2	3
1	0.637	0.619	0.696
2	0.664	0.543	0.760
3	0.691	0.474	0.820


Mc_кор
Mc_ср
Mc_пер
Mw_кор
Mw_ср
Mw_пер
λc_кор
λc_ср
λc_пер
λw_кор
λw_ср
λw_пер
Max
Приведенная скорость
Сечения
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
2
1
1.5
2
2.5
3

⏶ Результаты расчета Л по высоте

Вывод результатов расчета параметров потока по высоте Л

Рассматриваемая ступень: $j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{l} \text{"Такой ступени не существует!"} \quad \text{if } (j < 1) \lor (j > Z) \\ j \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$

Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

$$\Delta_c(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{l} \tan\left(\alpha_{st(i,j),r}\right)\cdot v \quad \text{if } \left(\tan\left(\alpha_{st(i,j),r}\right) \geq 0\right) \land \left(-\left|c_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,j),r}\right)\right| \leq v \leq 0\right) \\ \tan\left(\alpha_{st(i,j),r}\right)\cdot v \quad \text{if } \left(\tan\left(\alpha_{st(i,j),r}\right) < 0\right) \land \left(0 \leq v \leq \left|c_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,j),r}\right)\right|\right) \end{array} \right.$$

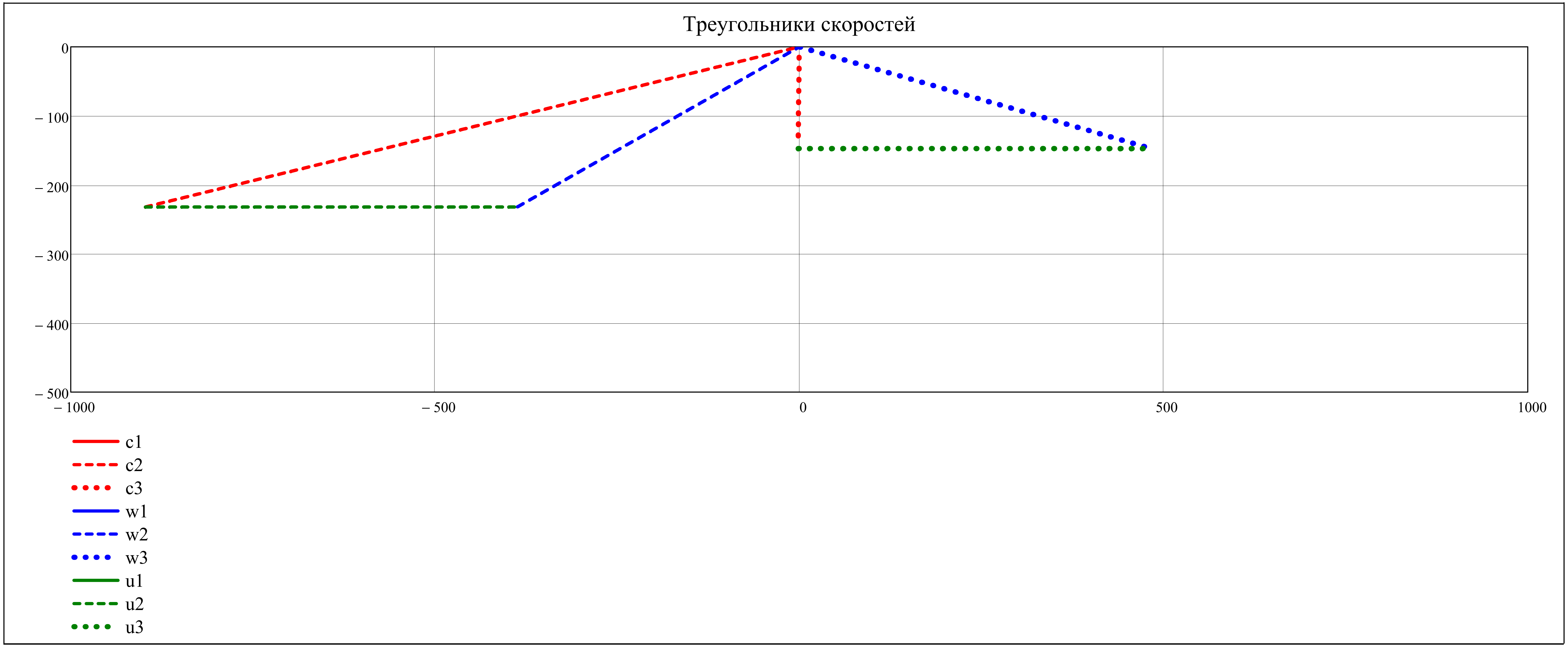
$$\Delta_w(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{l} -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \quad \text{if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) \geq 0\right) \land \left(-\left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right| \leq v \leq 0\right) \land (j \neq 1) \\ -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \quad \text{if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) < 0\right) \land \left(0 \leq v \leq \left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right|\right) \land (j \neq 1) \end{array} \right.$$

$$\Delta_u(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{l} -c_{a_{st(i,j),r}} \quad \text{if } \left(-c_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,j),r}\right) \leq v \leq w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right) \land (j \neq 1) \\ \text{NaN} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

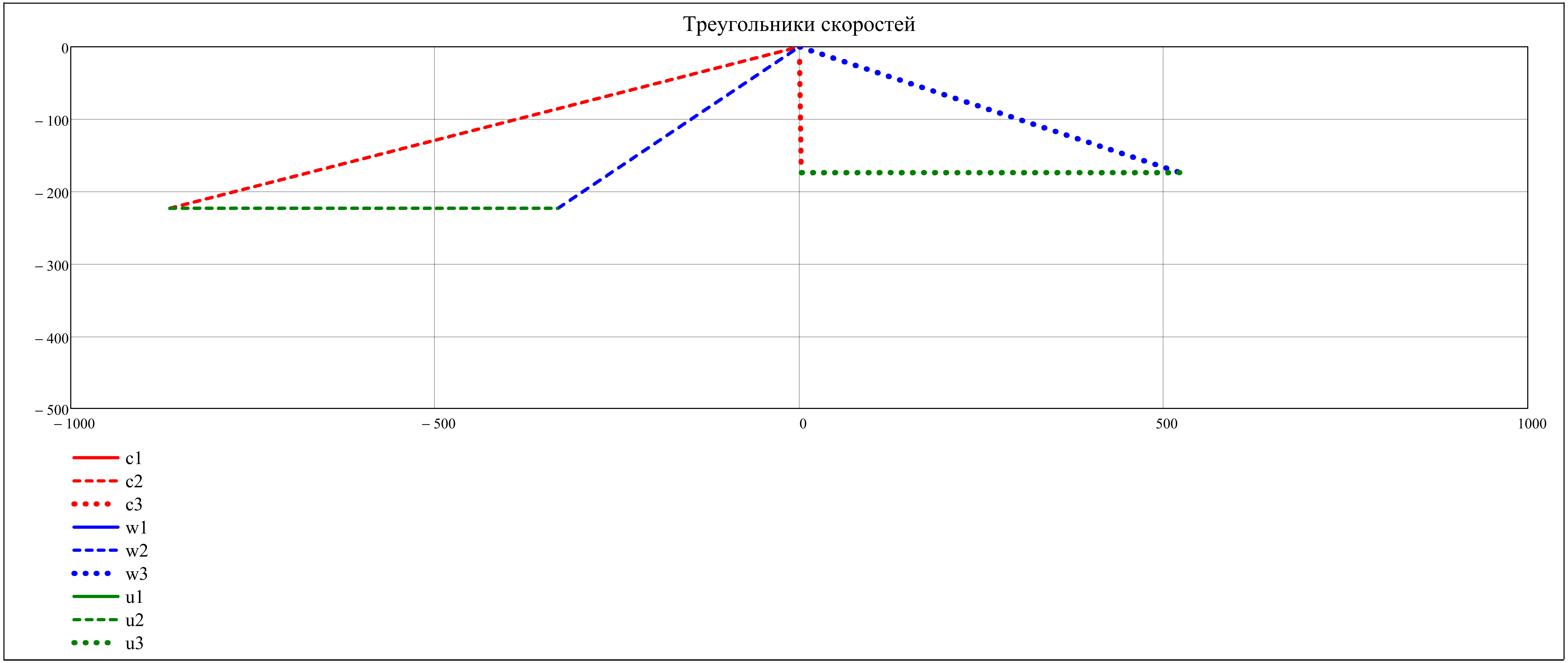
$$v_{lim} = \operatorname{ceil}\left(\frac{\max(c,w,u)}{10^2}\right)\cdot 10^2 = 1000.0$$

$$v = -\max(c,w,u), -\max(c,w,u) + \frac{\max(c,w,u)}{3000} .. \max(c,w,u)$$

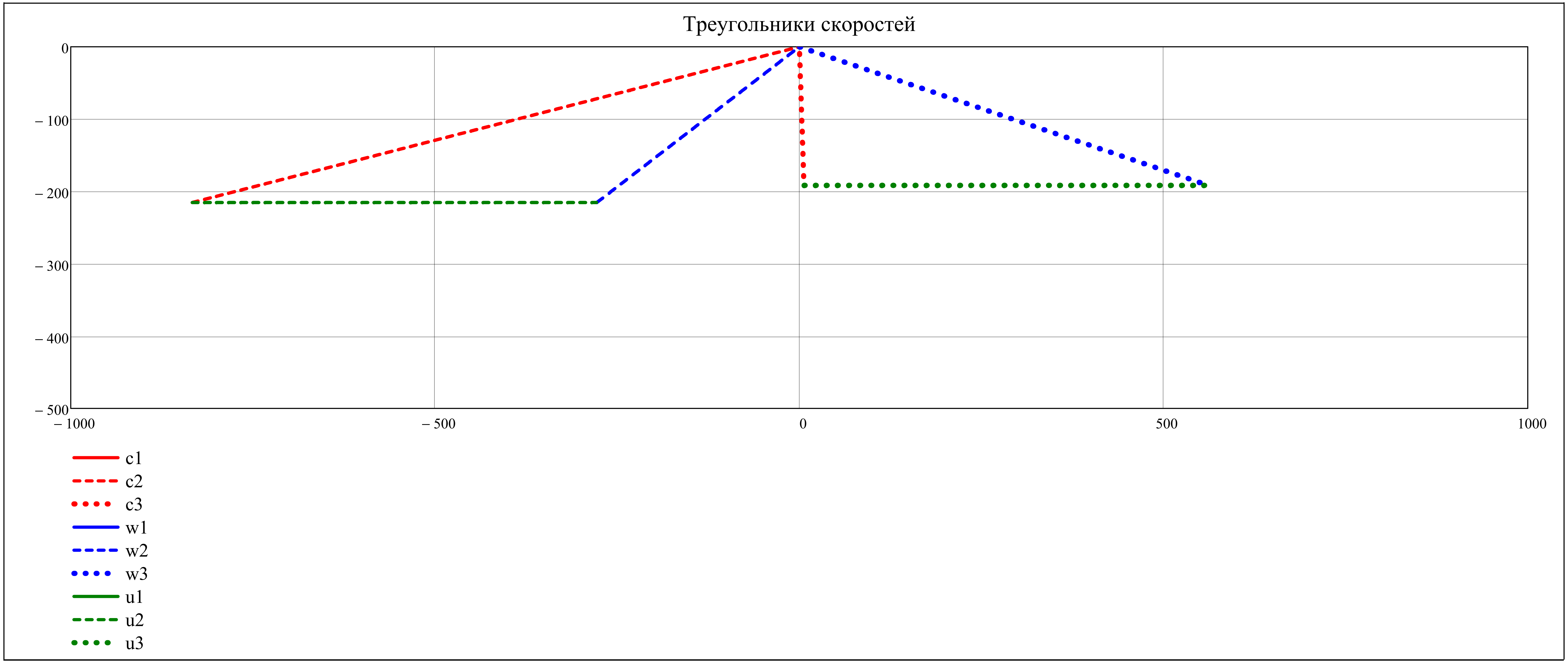
r = 1


Треугольники скоростей
0
– 100
– 200
– 300
– 400
– 500
– 1000
– 500
0
500
1000
c1
c2
c3
w1
w2
w3
u1
u2
u3

$r = av(N_r)$


Треугольники скоростей
0
– 100
– 200
– 300
– 400
– 500
– 1000
– 500
0
500
1000
c1
c2
c3
w1
w2
w3
u1
u2
u3

$r = N_r$



Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

Парусность: $\begin{pmatrix} sail_{stator} \\ sail_{rotor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.85 \end{pmatrix}$

Расчет хорд Л по парусности

$\begin{pmatrix} chord_{stator} \\ chord_{rotor} \end{pmatrix} =$

```
for $i \in 1..Z$
    $sail = \dfrac{R_{st(i,2),N_r} - R_{st(i,2),1}}{R_{st(i,2),av(N_r)} - R_{st(i,2),1}}$
    for $r \in 1..N_r$
        $b_{САкор} = \dfrac{chord_{stator_{i,av(N_r)}} \cdot sail}{sail_{stator} - 1 + sail}$
        $b_{РКкор} = \dfrac{chord_{rotor_{i,av(N_r)}} \cdot sail}{sail_{rotor} - 1 + sail}$
        $\begin{pmatrix} b_{САпер} \\ b_{РКпер} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{САкор} \cdot sail_{stator} \\ b_{РКкор} \cdot sail_{rotor} \end{pmatrix}$
        $chord_{stator.}(z) = interp\left[cspline\left[\begin{pmatrix} R_{st(i,2),1} \\ R_{st(i,2),av(N_r)} \\ R_{st(i,2),N_r} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_{САкор} \\ chord_{stator_{i,av(N_r)}} \\ b_{САпер} \end{pmatrix}\right], \begin{pmatrix} R_{st(i,2),1} \\ R_{st(i,2),av(N_r)} \\ R_{st(i,2),N_r} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_{САкор} \\ chord_{stator_{i,av(N_r)}} \\ b_{САпер} \end{pmatrix}, z\right]$
        $chord_{rotor.}(z) = interp\left[cspline\left[\begin{pmatrix} R_{st(i,2),1} \\ R_{st(i,2),av(N_r)} \\ R_{st(i,2),N_r} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_{РКкор} \\ chord_{rotor_{i,av(N_r)}} \\ b_{РКпер} \end{pmatrix}\right], \begin{pmatrix} R_{st(i,2),1} \\ R_{st(i,2),av(N_r)} \\ R_{st(i,2),N_r} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_{РКкор} \\ chord_{rotor_{i,av(N_r)}} \\ b_{РКпер} \end{pmatrix}, z\right]$
        $\begin{pmatrix} chord_{stator_{i,r}} \\ chord_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} chord_{stator.}\left(R_{st(i,2),r}\right) \\ chord_{rotor.}\left(R_{st(i,3),r}\right) \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} chord_{stator} \\ chord_{rotor} \end{pmatrix}$
```

Длины хорд РК и СА (м):

$chord_{stator}{}^{T} =$

	1
1	68.0
2	68.0
3	68.0

$\cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	38.4
2	34.2
3	31.4

$\cdot 10^{-3}$

Расчет хорд Л по парусности

Ср. линия профиля:
0.5 - дуга окружности
0.45 - парабола

$\bar{x}_f = 0.45$

Расчет параметров решетки

```
$\begin{pmatrix} t_{stator} & t_{rotor} \\ r\_inlet_{stator} & r\_inlet_{rotor} \\ r\_outlet_{stator} & r\_outlet_{rotor} \\ c_{stator} & c_{rotor} \\ \upsilon_{stator} & \upsilon_{rotor} \end{pmatrix} =$
  for $i \in 1..Z$
    for $r \in 1..N_r$
      $\begin{pmatrix} t_{stator_{i,r}} \\ t_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \pi \cdot \begin{pmatrix} \dfrac{mean\left(D_{st(i,1),r}, D_{st(i,2),r}\right)}{Z_{stator_i}} \\ \dfrac{mean\left(D_{st(i,2),r}, D_{st(i,3),r}\right)}{Z_{rotor_i}} \end{pmatrix}$
      $\begin{pmatrix} r\_inlet_{stator_{i,r}} & r\_outlet_{stator_{i,r}} \\ r\_inlet_{rotor_{i,r}} & r\_outlet_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{r}\_inlet_{stator_{i,r}} \cdot chord_{stator_{i,r}} & \bar{r}\_outlet_{stator_{i,r}} \cdot chord_{stator_{i,r}} \\ \bar{r}\_inlet_{rotor_{i,r}} \cdot chord_{rotor_{i,r}} & \bar{r}\_outlet_{rotor_{i,r}} \cdot chord_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix}$
      $\begin{pmatrix} c_{stator_{i,r}} \\ c_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{c}_{stator_{i,r}} \cdot chord_{stator_{i,r}} \\ \bar{c}_{rotor_{i,r}} \cdot chord_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix}$
      $\begin{pmatrix} \upsilon_{stator_{i,r}} \\ \upsilon_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \upsilon_{installation}\left(0.5, \alpha_{st(i,1),r}, \alpha_{st(i,2),r}\right) \\ \upsilon_{installation}\left(0.5, \beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}\right) \end{pmatrix} + \dfrac{\pi}{2}$
  $\begin{pmatrix} t_{stator} & t_{rotor} \\ r\_inlet_{stator} & r\_inlet_{rotor} \\ r\_outlet_{stator} & r\_outlet_{rotor} \\ c_{stator} & c_{rotor} \\ \upsilon_{stator} & \upsilon_{rotor} \end{pmatrix}$
```

$$\begin{pmatrix} \upsilon_{установки}\left(\alpha_{st(i,1),r}, \alpha_{st(i,2),r}\right) \\ \upsilon_{установки}\left(\beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}\right) \end{pmatrix}$$

$\frac{\pi}{2}$ добавляется в виду поворота рисунка на 90 град

Расчет параметров решетки

Результаты расчета параметров решеток

Относительные радиусы профилей ():

$\overline{r\_inlet_{stator}}^{T} =$

	1
1	6.000
2	6.000
3	6.000

$\cdot\%$

$\overline{r\_inlet_{rotor}}^{T} =$

	1
1	5.950
2	4.550
3	3.850

$\cdot\%$

$\overline{r\_outlet_{stator}}^{T} =$

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

$\overline{r\_outlet_{rotor}}^{T} =$

	1
1	2.550
2	1.950
3	1.650

$\cdot\%$

Относительная толщина профиля ():

$\overline{c_{stator}}^{T} =$

	1
1	15.00
2	15.00
3	15.00

$\cdot\%$

$\overline{c_{rotor}}^{T} =$

	1
1	17.00
2	13.00
3	11.00

$\cdot\%$

Относительный шаг решетки ():

$\left(\frac{t_{stator}}{chord_{stator}}\right)^{T} =$

	1
1	0.8345
2	0.8711
3	0.9076

$\left(\frac{t_{rotor}}{chord_{rotor}}\right)^{T} =$

	1
1	0.5829
2	0.6918
3	0.7941

Относительная густота решетки ():

$\left(\frac{chord_{stator}}{t_{stator}}\right)^{T} =$

	1
1	1.198
2	1.148
3	1.102

$\left(\frac{chord_{rotor}}{t_{rotor}}\right)^{T} =$

	1
1	1.716
2	1.445
3	1.259

Длина хорды профиля [м]:

$chord_{stator}^{T} =$

	1
1	68.0
2	68.0
3	68.0

$\cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}^{T} =$

	1
1	38.4
2	34.2
3	31.4

$\cdot 10^{-3}$

Радиусы профилей:

$r\_inlet_{stator}^{T} =$

	1
1	4.08
2	4.08
3	4.08

$\cdot 10^{-3}$

$r\_inlet_{rotor}^{T} =$

	1
1	2.28
2	1.56
3	1.21

$\cdot 10^{-3}$

$r\_outlet_{stator}^{T} =$

	1
1	2.04
2	2.04
3	2.04

$\cdot 10^{-3}$

$r\_outlet_{rotor}^{T} =$

	1
1	0.98
2	0.67
3	0.52

$\cdot 10^{-3}$

Толщина профиля [м]:

$c_{stator}^{T} =$

	1
1	10.20
2	10.20
3	10.20

$\cdot 10^{-3}$

$c_{rotor}^{T} =$

	1
1	6.52
2	4.45
3	3.46

$\cdot 10^{-3}$

Шаг решетки [м]:

$t_{stator}^{T} =$

	1
1	56.7
2	59.2
3	61.7

$\cdot 10^{-3}$

$t_{rotor}^{T} =$

	1
1	22.4
2	23.7
3	25.0

$\cdot 10^{-3}$

Угол поворота потока:

$\varepsilon_{stator}^{T} =$

	1
1	75.51
2	75.51
3	75.51

$\cdot°$

$\varepsilon_{rotor}^{T} =$

	1
1	132.12
2	127.61
3	123.40

$\cdot°$

Угол установки профиля:

$\upsilon_{stator}^{T} =$

	1
1	117.3
2	117.3
3	117.3

$\cdot°$

$\upsilon_{rotor}^{T} =$

	1
1	112.0
2	114.0
3	115.4

$\cdot°$

Угол изгиба профиля:

$\pi - \varepsilon_{stator}^{T} =$

	1
1	104.5
2	104.5
3	104.5

$\cdot°$

$\pi - \varepsilon_{rotor}^{T} =$

	1
1	47.9
2	52.4
3	56.6

$\cdot°$

Результаты расчета параметров решеток

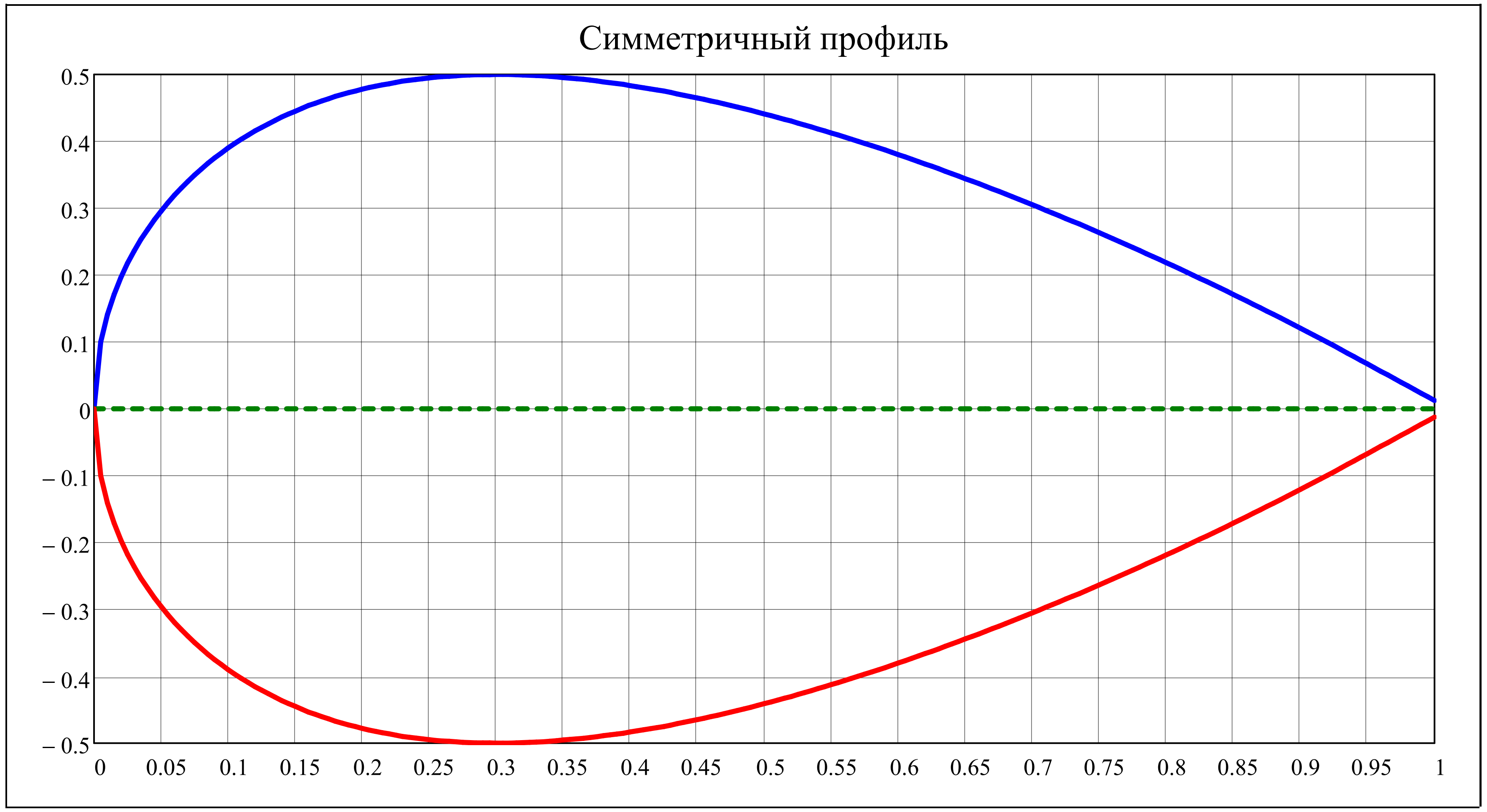
Подключение симметричного профиля

$$\begin{pmatrix} X_U & Y_U \\ X_L & Y_L \end{pmatrix} = NACA(0, 0, 100\%, 1)$$

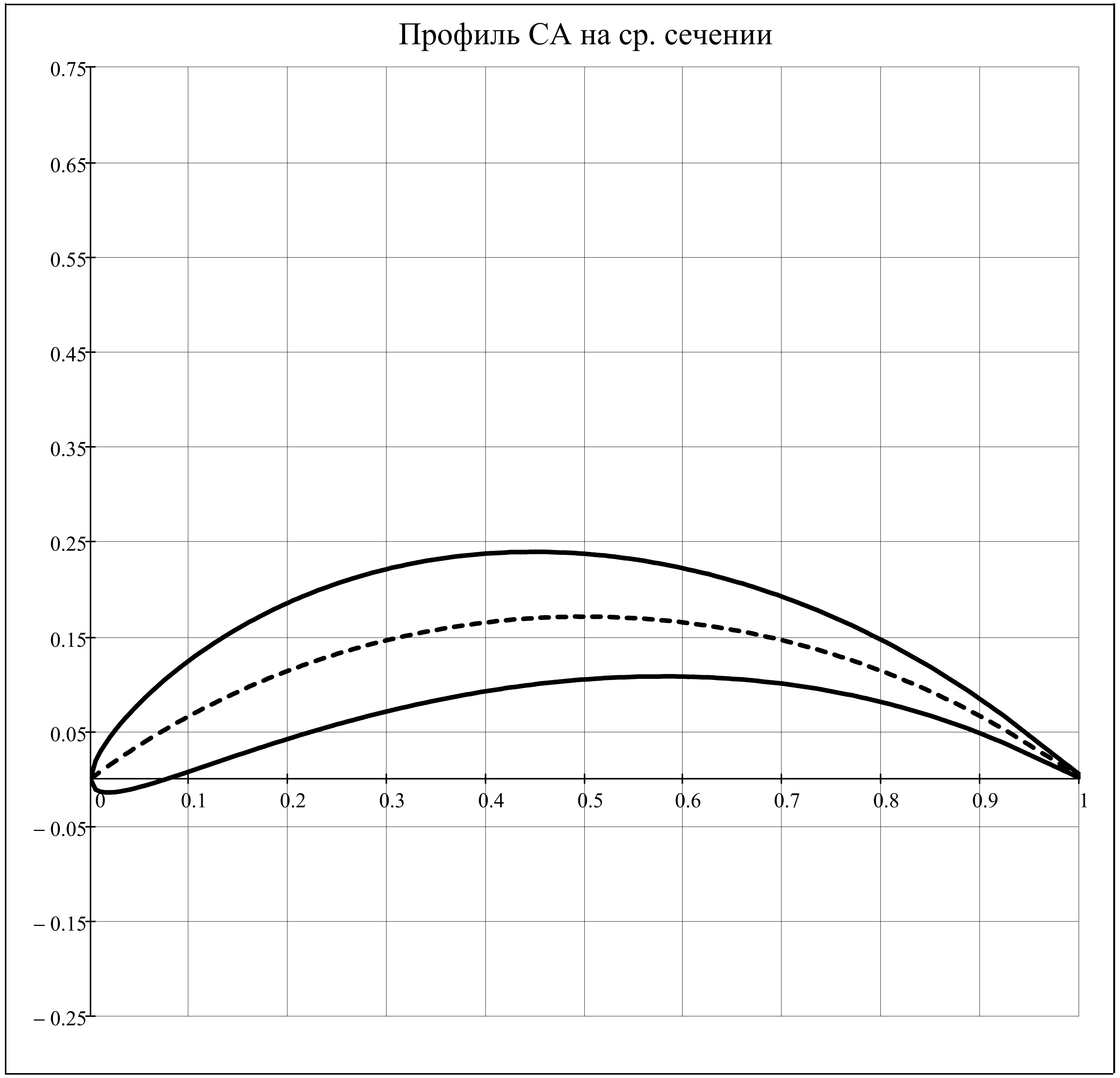
Относ. координаты профиля РК и СА:

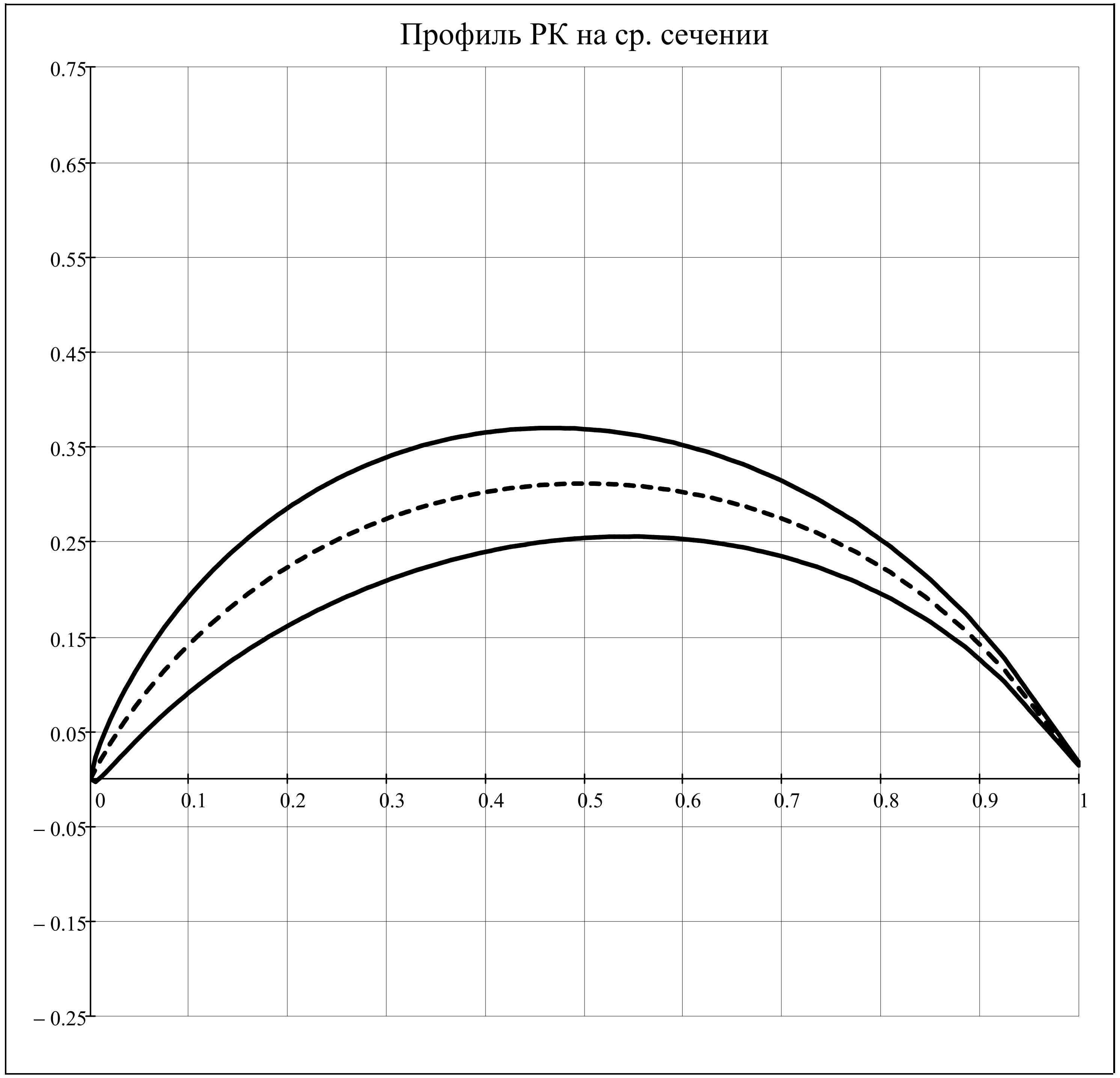
$$AIRFOIL_0\left(x, line, \overline{f}, \overline{x}_f, \overline{c}\right) = \begin{cases} \begin{cases} linterp\left(X_U, Y_U, x\right) & \text{if } line = \text{"+"} \\ \dfrac{linterp\left(X_U, Y_U, x\right) + linterp\left(X_L, Y_L, x\right)}{2} & \text{if } line = \text{"0"} \\ linterp\left(X_L, Y_L, x\right) & \text{if } line = \text{"-"} \end{cases} & \text{if } 0 \le x \le 1 \\ NaN & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$x = 0, 0.005 .. 1$$



$$\mathrm{AIRFOIL}(x,\mathrm{line},\overline{c},\theta) = \left|\begin{array}{l} \mathrm{linterp}\left(X_U, y/b_{\text{ср.л}}\left(X_U,\theta\right)+Y_U\cdot\overline{c}, x\right) \quad \text{if line = "+"} \\ \dfrac{\mathrm{linterp}\left(X_U, y/b_{\text{ср.л}}\left(X_U,\theta\right)+Y_U\cdot\overline{c}, x\right)+\mathrm{linterp}\left(X_L, y/b_{\text{ср.л}}\left(X_L,\theta\right)+Y_L\cdot\overline{c}, x\right)}{2} \quad \text{if line = "0"} \\ \mathrm{linterp}\left(X_L, y/b_{\text{ср.л}}\left(X_L,\theta\right)+Y_L\cdot\overline{c}, x\right) \quad \text{if line = "-"} \\ \mathrm{NaN} \quad \text{otherwise} \end{array}\right.$$


Профиль СА на ср. сечении


Профиль РК на ср. сечении

Подключение симметричного профиля

▶ Определение относительных геометрических характеристик сечений Л

▶ Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Определение абсолютных геометрических характеристик сечений Л

▾ Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

$$l\_upper_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 78.07 \\ 2 & 78.07 \\ 3 & 78.07 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$l\_lower_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 70.64 \\ 2 & 70.64 \\ 3 & 70.64 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$area_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 473.87 \\ 2 & 473.87 \\ 3 & 473.87 \end{array} \cdot 10^{-6}$$

$$Sx_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 4232.2 \\ 2 & 4232.2 \\ 3 & 4232.2 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$Sy_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 13563.5 \\ 2 & 13563.5 \\ 3 & 13563.5 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$x0_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 28.6 \\ 2 & 28.6 \\ 3 & 28.6 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$y0_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 8.9 \\ 2 & 8.9 \\ 3 & 8.9 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$l\_upper_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 52.01 \\ 2 & 44.78 \\ 3 & 40.21 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$l\_lower_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 44.26 \\ 2 & 39.55 \\ 3 & 36.21 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$area_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 171.14 \\ 2 & 103.96 \\ 3 & 74.28 \end{array} \cdot 10^{-6}$$

$$Sx_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1711.6 \\ 2 & 883.3 \\ 3 & 554.2 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$Sy_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 2765.3 \\ 2 & 1497.1 \\ 3 & 983.0 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$x0_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 16.2 \\ 2 & 14.4 \\ 3 & 13.2 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$y0_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 10.0 \\ 2 & 8.5 \\ 3 & 7.5 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$Jx_{stator}^{T} =$

	1
1	44264
2	44264
3	44264

$\cdot 10^{-12}$

$Jy_{stator}^{T} =$

	1
1	508717
2	508717
3	508717

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy_{stator}^{T} =$

	1
1	128548
2	128548
3	128548

$\cdot 10^{-12}$

$Jx0_{stator}^{T} =$

	1
1	6465
2	6465
3	6465

$\cdot 10^{-12}$

$Jy0_{stator}^{T} =$

	1
1	120489
2	120489
3	120489

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy0_{stator}^{T} =$

	1
1	7409
2	7409
3	7409

$\cdot 10^{-12}$

$\alpha\_major_{stator}^{T} =$

	1
1	3.70
2	3.70
3	3.70

$\cdot \circ$

$Jx_{rotor}^{T} =$

	1
1	18774
2	8184
3	4505

$\cdot 10^{-12}$

$Jy_{rotor}^{T} =$

	1
1	58548
2	28251
3	17045

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy_{rotor}^{T} =$

	1
1	29122
2	13406
3	7736

$\cdot 10^{-12}$

$Jx0_{rotor}^{T} =$

	1
1	1656
2	679
3	370

$\cdot 10^{-12}$

$Jy0_{rotor}^{T} =$

	1
1	13867
2	6691
3	4037

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy0_{rotor}^{T} =$

	1
1	1466
2	686
3	402

$\cdot 10^{-12}$

$\alpha\_major_{rotor}^{T} =$

	1
1	6.75
2	6.43
3	6.18

$\cdot \circ$

$$Ju_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 5986 \\ 2 & 5986 \\ 3 & 5986 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jv_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 120968.8 \\ 2 & 120968.8 \\ 3 & 120968.8 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Juv_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -0 \\ 2 & -0 \\ 3 & -0 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jp_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 126955 \\ 2 & 126955 \\ 3 & 126955 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Wp_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 3146.4 \\ 2 & 3146.4 \\ 3 & 3146.4 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$stiffness_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 11340.9 \\ 2 & 11340.9 \\ 3 & 11340.9 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Ju_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1482 \\ 2 & 602 \\ 3 & 326 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jv_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 14041 \\ 2 & 6769 \\ 3 & 4081 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Juv_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0 \\ 2 & 0 \\ 3 & 0 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jp_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 15522 \\ 2 & 7371 \\ 3 & 4407 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Wp_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 637.2 \\ 2 & 342.1 \\ 3 & 224.1 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$stiffness_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1676.5 \\ 2 & 473.1 \\ 3 & 204.3 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$CPx_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 23.790 \\ 2 & 23.790 \\ 3 & 23.790 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$CPy_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.0000 \\ 2 & 0.0000 \\ 3 & 0.0000 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$CPx_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 13.430 \\ 2 & 11.969 \\ 3 & 10.999 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$CPy_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.0000 \\ 2 & 0.0000 \\ 3 & 0.0000 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

▲ Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Вывод результатов расчета геометрических хар-к сечений Л

Профилирование решеток

Абс. координаты профиля:

$$\mathrm{Airfoil}(type, x, line, i, r) = \left| \begin{array}{ll} \mathrm{AIRFOIL}\left(x, line, \overline{c}_{stator_{i,r}}, \varepsilon_{stator_{i,r}}\right) & \text{if } type = \text{"stator"} \\ \mathrm{AIRFOIL}\left(x, line, \overline{c}_{rotor_{i,r}}, \varepsilon_{rotor_{i,r}}\right) & \text{if } type = \text{"rotor"} \end{array} \right.$$

Профилирование решеток

Рассматриваемая ступень: $j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$

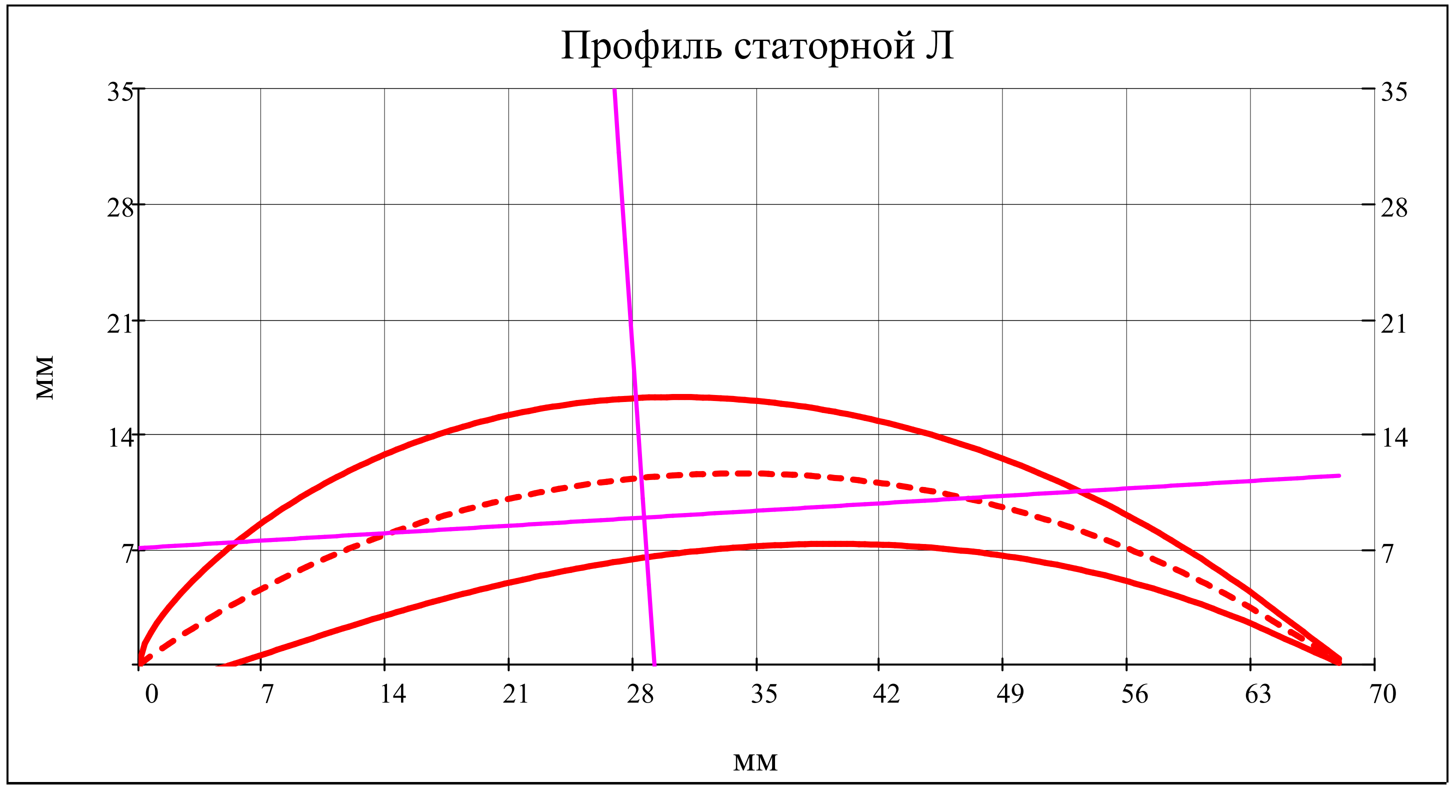
Построение профилей Л РК и НА

$$\mathrm{AXLE0}(type, x, i, r) = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } type = \text{"rotor"} \\ \dfrac{y0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{stator_{i,r}}\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}}\right) & \text{if } type = \text{"stator"} \\ \mathrm{NaN} & \text{otherwise} \end{array} \right.$$

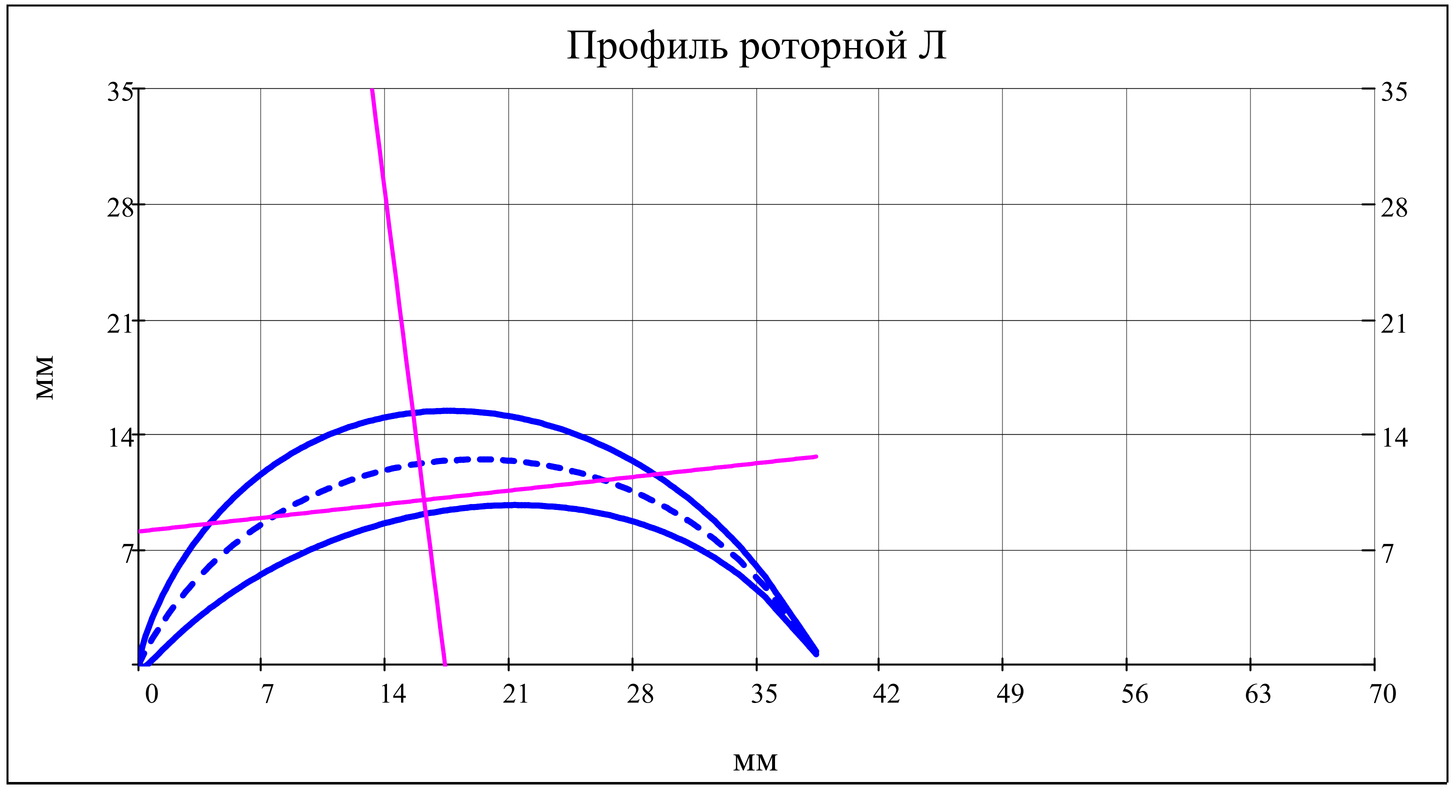
$$b_{lim} = \frac{\mathrm{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^{2}\right)}{10^{2}} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{AXLE90}(type, x, i, r) = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}} + \dfrac{\pi}{2}\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } (type = \text{"rotor"}) \wedge \left|\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right| \geq 1 \cdot ° \\ \dfrac{y0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{stator_{i,r}} + \dfrac{\pi}{2}\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}}\right) & \text{if } (type = \text{"stator"}) \wedge \left|\alpha\_major_{stator_{i,r}}\right| \geq 1 \cdot ° \\ \mathrm{NaN} & \text{otherwise} \end{array} \right.$$

$r = 1$

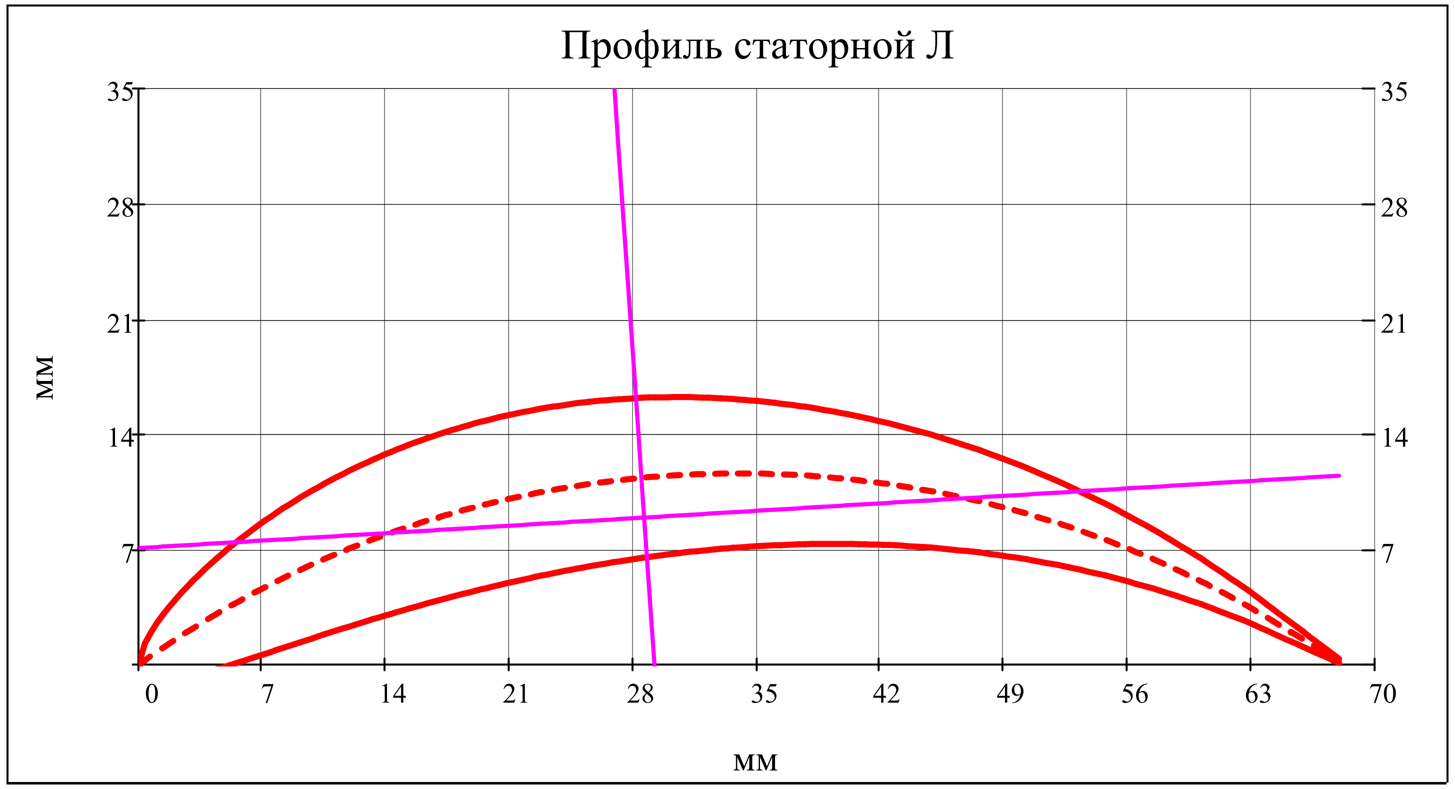


Профиль статорной Л
мм
мм
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
35
28
21
14
7

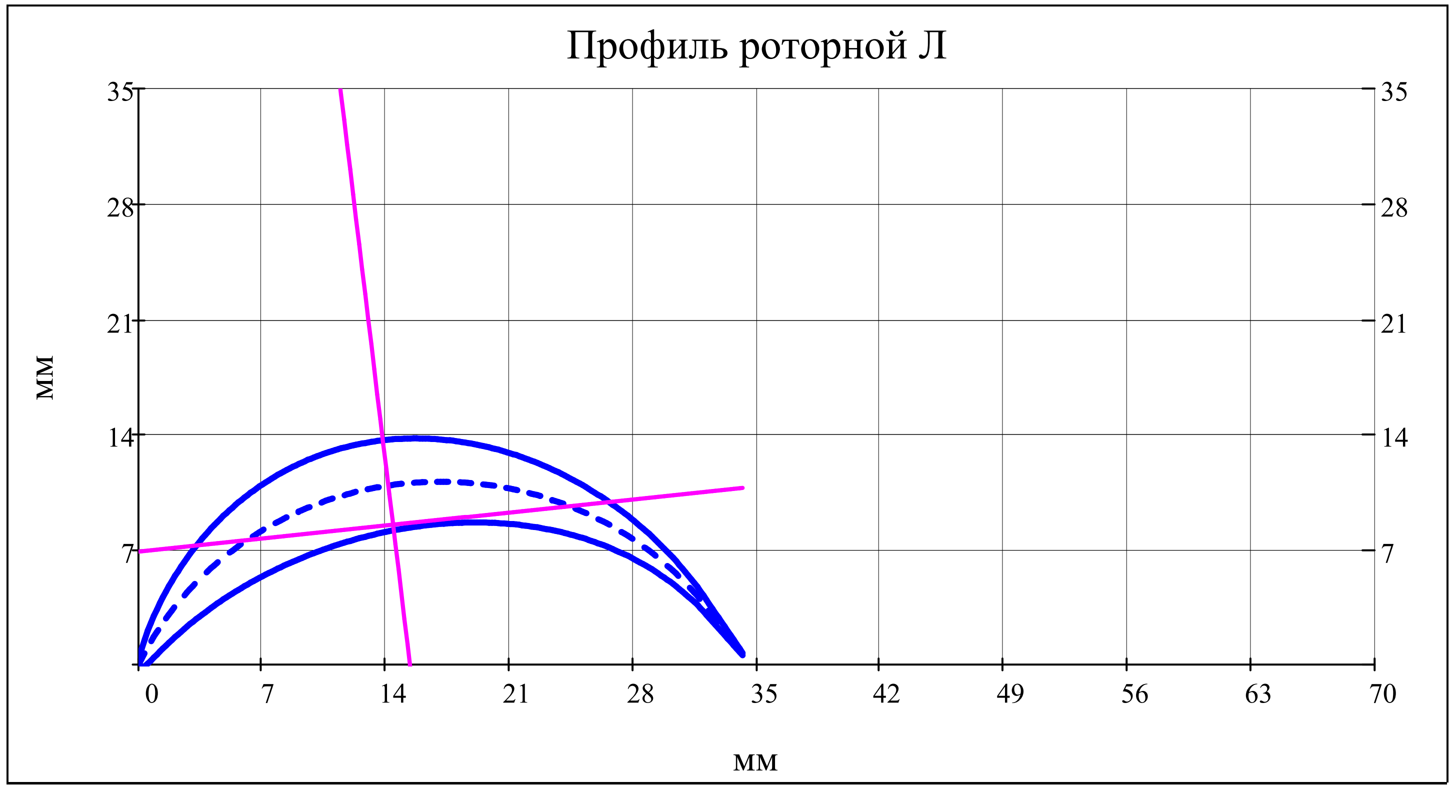


Профиль роторной Л
мм
мм
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
35
28
21
14
7

$r = av(N_r)$

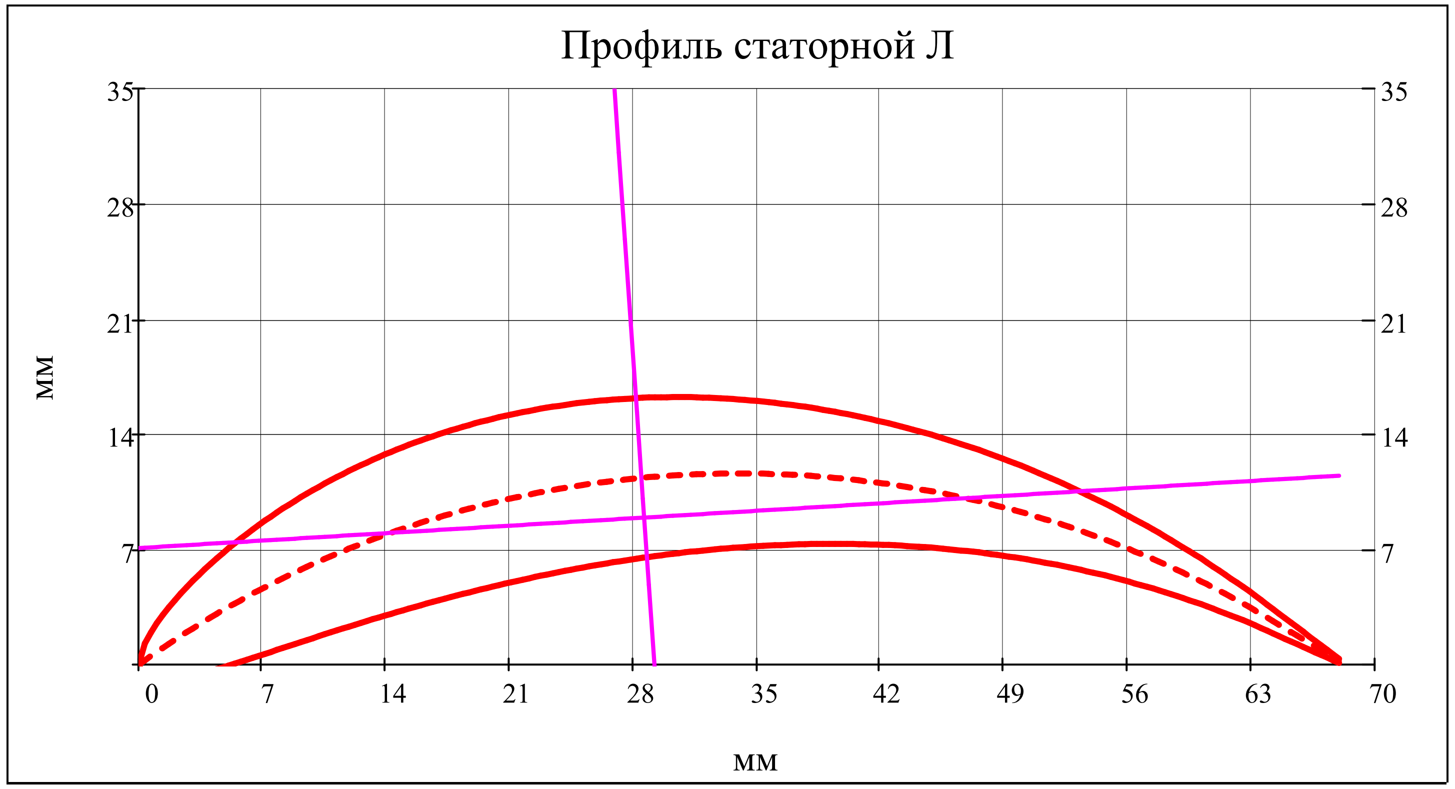


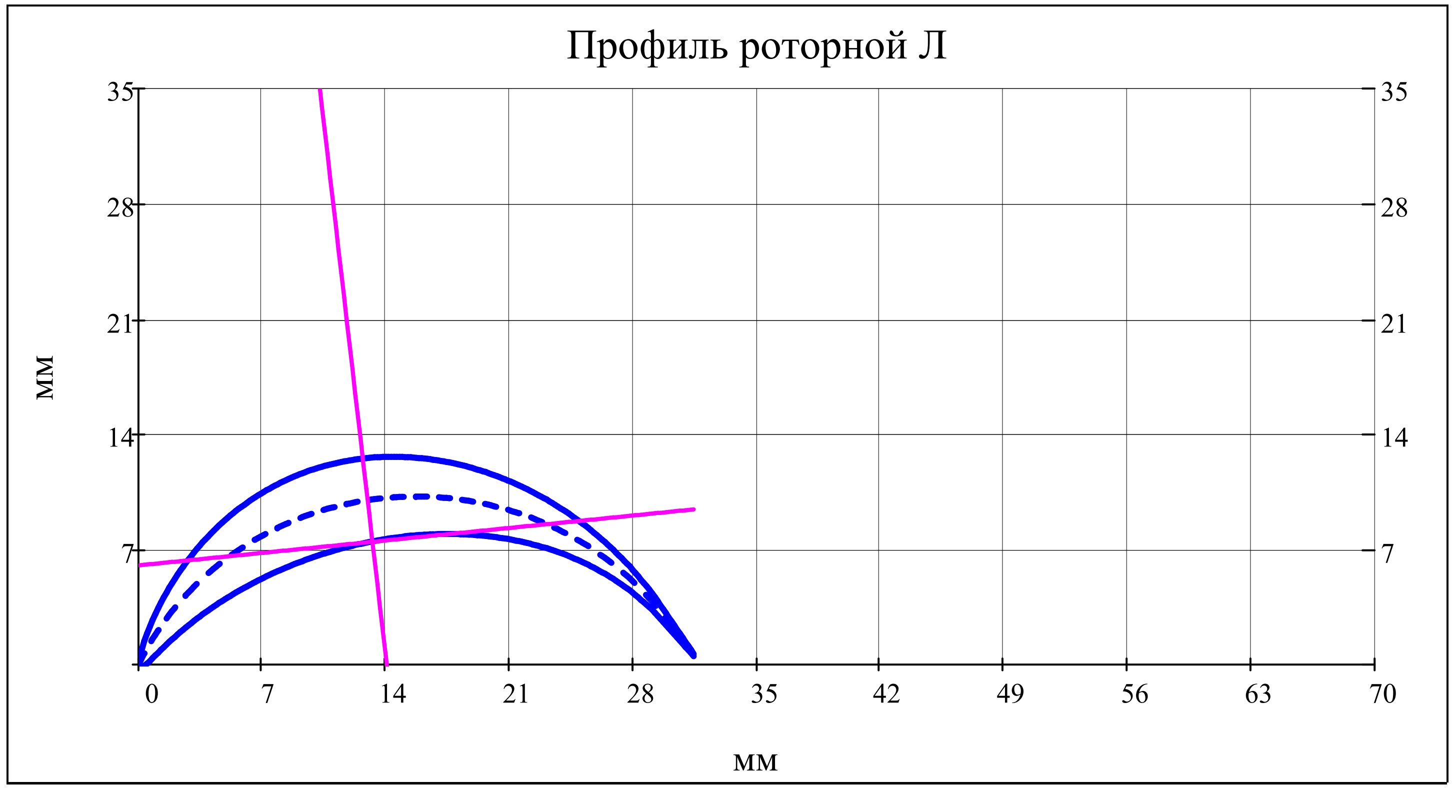
Профиль статорной Л
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм



Профиль роторной Л
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм

$r = N_r$





Построение профилей Л РК и НА

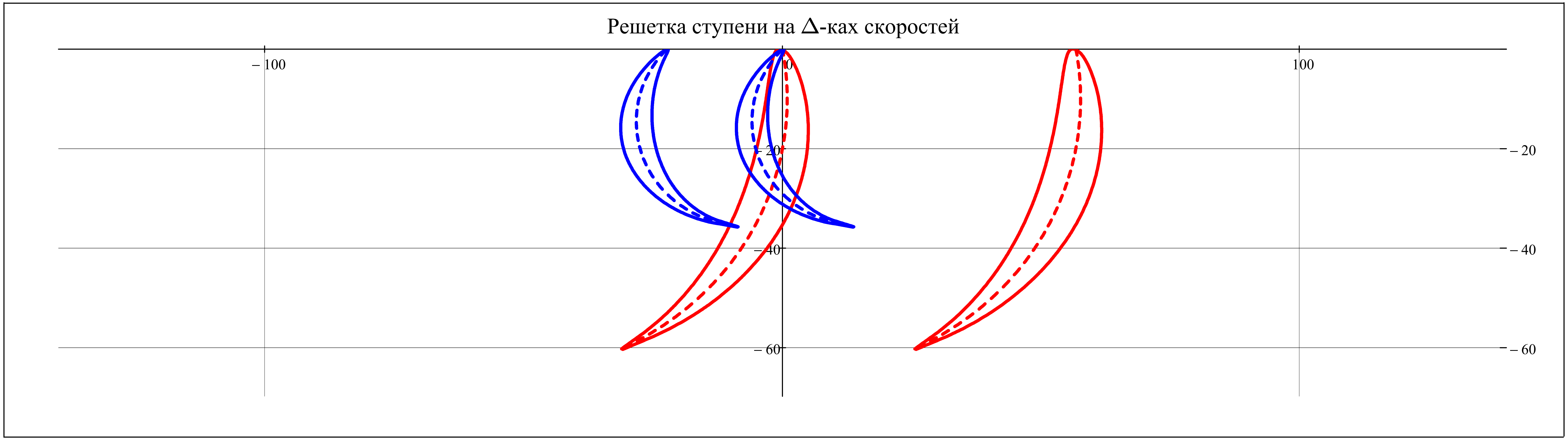
Вывод координат для построения профиля Л

Рассматриваемая ступень: $j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{l} \text{"Такой ступени не существует!"} \quad \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$

$$b_{lim} = \frac{\mathrm{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

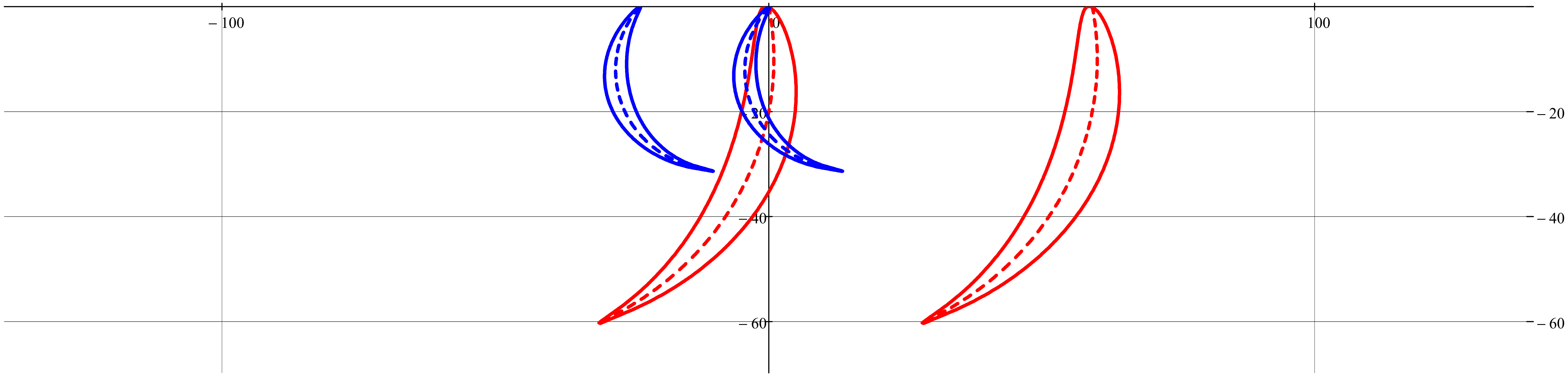
▼ Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

$r = 1$

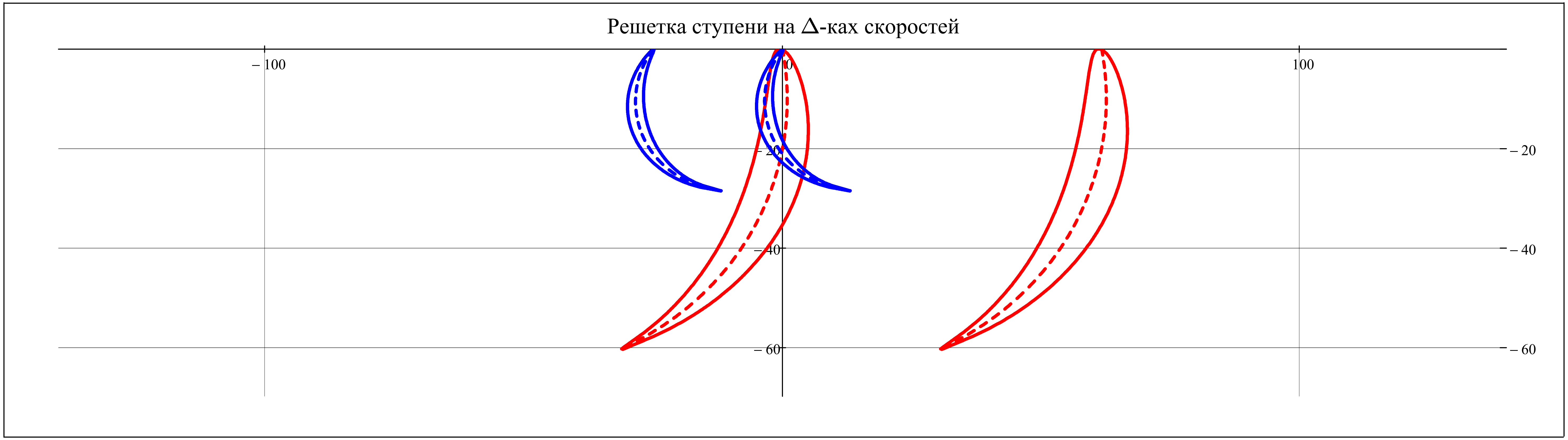

Решетка ступени на Δ-ках скоростей

$r = av(N_r)$

Решетка ступени на Δ-ках скоростей



$r = N_r$



▲ Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

Вывод данных по построению профиля Л rotor и stator на треугольниках скоростей

Рассматриваемая ступень: $j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$

Поперечная часть ступени

$$r = \min(D), \min(D) + \frac{\max(D) - \min(D)}{N_{dis}} .. \max(D)$$

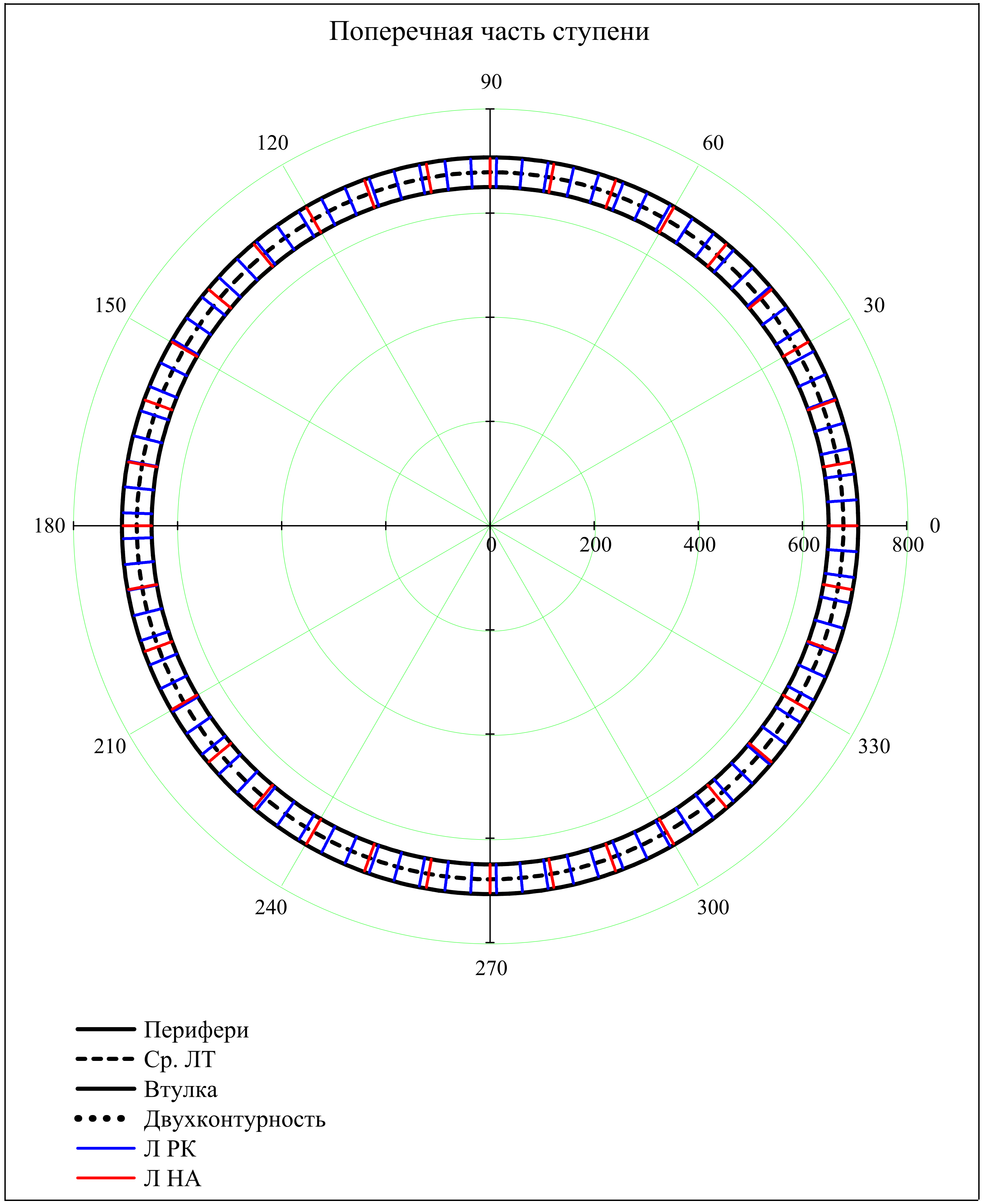
$$i_{rotor} = 1 .. Z_{rotor_j}$$

$$i_{stator} = 1 .. Z_{stator_j}$$

$$\varphi = 0, \frac{2 \cdot \pi}{360} .. 2 \cdot \pi$$

$$Л_{РК}(r,j) = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{2 \cdot \pi}{Z_{rotor_j}} & \text{if } D_{st(j,1),1} < r < D_{st(j,1),N_r} \\ \text{NaN} & \text{otherwise} \end{array} \right.$$

$$Л_{HA}(r,j) = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{2 \cdot \pi}{Z_{stator_j}} & \text{if } D_{st(j,2),1} < r < D_{st(j,2),N_r} \\ \text{NaN} & \text{otherwise} \end{array} \right.$$



Поперечная часть ступени

Расчет собственных частот колебаний Л

$$\begin{pmatrix} \nu0_{изг.stator} & \nu0_{изг.rotor} \\ \nu0_{угл.stator} & \nu0_{угл.rotor} \\ \nu0_{угл.stator\_bondage} & \nu0_{угл.rotor\_bondage} \end{pmatrix} =$$

```
for $i \in 1 .. Z$
  for $r \in av(N_r)$
    for $mode \in 1 .. 6$
      $\nu0_{изг.stator_{i,mode}} = \nu0_{изгиб}(mode, mean(h_{st(i,1)}, h_{st(i,2)}), E\_blade, \rho\_blade_i, area_{stator_{i,r}}, Ju_{stator_{i,r}})$
      $\nu0_{изг.rotor_{i,mode}} = \nu0_{изгиб}(mode, mean(h_{st(i,2)}, h_{st(i,3)}), E\_blade, \rho\_blade_i, area_{rotor_{i,r}}, Ju_{rotor_{i,r}})$
      $\nu0_{угл.stator_{i,mode}} = \nu0_{угл}(mode, 0, mean(h_{st(i,1)}, h_{st(i,2)}), Jung(2, \mu\_steel, E\_blade), \rho\_blade_i, stiffness_{stator_{i,r}}, Jp_{stator_{i,r}})$
      $\nu0_{угл.rotor_{i,mode}} = \nu0_{угл}(mode, 0, mean(h_{st(i,2)}, h_{st(i,3)}), Jung(2, \mu\_steel, E\_blade), \rho\_blade_i, stiffness_{rotor_{i,r}}, Jp_{rotor_{i,r}})$
      $\nu0_{угл.stator\_bondage_{i,mode}} = \nu0_{угл}(mode, 1, mean(h_{st(i,1)}, h_{st(i,2)}), Jung(2, \mu\_steel, E\_blade), \rho\_blade_i, stiffness_{stator_{i,r}}, Jp_{stator_{i,r}})$
      $\nu0_{угл.rotor\_bondage_{i,mode}} = \nu0_{угл}(mode, 1, mean(h_{st(i,2)}, h_{st(i,3)}), Jung(2, \mu\_steel, E\_blade), \rho\_blade_i, stiffness_{rotor_{i,r}}, Jp_{rotor_{i,r}})$
$\begin{pmatrix} \nu0_{изг.stator} & \nu0_{изг.rotor} \\ \nu0_{угл.stator} & \nu0_{угл.rotor} \\ \nu0_{угл.stator\_bondage} & \nu0_{угл.rotor\_bondage} \end{pmatrix}$
```

Частота собственных изгибных колебаний (Гц) [9, с.240]:

$\mathrm{stack}\left(\nu0_{изг.stator}, \nu0_{изг.rotor}\right)^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	12595	5145						
2	78937	32248						
3	221049	90305						
4	433492	177095						
5	716300	292630						
6	1069752	437026						

Частота собственных угловых колебаний (Гц) [9, с.243] без и с бандажом:

$\mathrm{stack}\left(\nu0_{угл.stator}, \nu0_{угл.rotor}\right)^{T} =$

	1	2
1	8364	5507
2	25091	16521
3	41819	27535
4	58546	38548
5	75274	49562
6	92001	60576

$\mathrm{stack}\left(\nu0_{угл.stator\_bondage}, \nu0_{угл.rotor\_bondage}\right)^{T} =$

	1	2
1	16727	11014
2	33455	22028
3	50182	33041
4	66910	44055
5	83637	55069
6	100365	66083

▲ Расчет собственных частот колебаний Л

Вывод результатов расчета собственных частот колебаний Л

Расчетный узел: type = "turbine"

Объем бандажной полки ($м^3$): $V_{бп} = 0$

Радиус положения ЦМ бандажной полки (м): $R_{бп} = 0$

▶ Расчет Л на прочность

$$\text{neutral\_line}(\text{type}, x, i, r) = \begin{cases} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}} + \varphi\_neutral_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)\right)\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if type} = \text{"rotor"} \\ \dfrac{y0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}} + \tan\left(\left(\alpha\_major_{stator_{i,r}} + \varphi\_neutral_{stator}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)\right)\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}}\right) & \text{if type} = \text{"stator"} \end{cases}$$

$$\text{epure}(\text{type}, x, i, r) = \begin{cases} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \dfrac{-1}{\tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}} + \varphi\_neutral_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right) - \dfrac{\pi}{4}\right)} \cdot \left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if type} = \text{"rotor"} \\ \dfrac{y0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}} + \dfrac{-1}{\tan\left(\alpha\_major_{stator_{i,r}} + \varphi\_neutral_{stator}\left(i, R_{st(i,2),r}\right) - \dfrac{\pi}{4}\right)} \cdot \left(x - \dfrac{x0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}}\right) & \text{if type} = \text{"stator"} \end{cases}$$

Определение координат точек профиля Л, наиболее удаленных от НЛ

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$u\_u_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -0.218 \\ 2 & 0.395 \\ 3 & -5.994 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_u_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 5.323 \\ 2 & 4.047 \\ 3 & 13.959 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_l_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 21.030 \\ 2 & 18.832 \\ 3 & -8.994 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_l_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -11.789 \\ 2 & -10.076 \\ 3 & -17.325 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_u_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -7.064 \\ 2 & 8.165 \\ 3 & 8.161 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_u_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 29.140 \\ 2 & 8.190 \\ 3 & 8.194 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_l_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -11.363 \\ 2 & -25.857 \\ 3 & -25.850 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_l_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -38.695 \\ 2 & -14.465 \\ 3 & -14.477 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

```
$\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor} & \sigma\_n_{rotor} \\ \sigma\_p_{stator} & \sigma\_n_{stator} \end{pmatrix} =$ for $i \in 1..Z$
    for $r \in 1..N_r$
        $\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor_{i,r}} & \sigma\_n_{rotor_{i,r}} \\ \sigma\_p_{stator_{i,r}} & \sigma\_n_{stator_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Mu_{rotor}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Ju_{rotor_{i,r}}} \cdot v\_u_{rotor_{i,r}} - \frac{Mv_{rotor}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Jv_{rotor_{i,r}}} \cdot u\_u_{rotor_{i,r}} & \frac{Mu_{rotor}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Ju_{rotor_{i,r}}} \cdot v\_l_{rotor_{i,r}} - \frac{Mv_{rotor}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Jv_{rotor_{i,r}}} \cdot u\_l_{rotor_{i,r}} \\ \frac{Mu_{stator}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Ju_{stator_{i,r}}} \cdot v\_u_{stator_{i,r}} - \frac{Mv_{stator}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Jv_{stator_{i,r}}} \cdot u\_u_{stator_{i,r}} & \frac{Mu_{stator}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Ju_{stator_{i,r}}} \cdot v\_l_{stator_{i,r}} - \frac{Mv_{stator}(i, R_{st(i,2)}, r)}{Jv_{stator_{i,r}}} \cdot u\_l_{stator_{i,r}} \end{pmatrix}$
    $\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor} & \sigma\_n_{rotor} \\ \sigma\_p_{stator} & \sigma\_n_{stator} \end{pmatrix}$
```

```
$\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor.} & \sigma\_p_{stator.} \\ \sigma\_n_{rotor.} & \sigma\_n_{stator.} \end{pmatrix} =$ for $i \in 1..Z$
    $\sigma\_p_{rotor.}(i,z) = interp\left(lspline\left(submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_p_{rotor}, i, i, 1, N_r)^T\right), submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_p_{rotor}, i, i, 1, N_r)^T, z\right)$
    $\sigma\_p_{stator.}(i,z) = interp\left(lspline\left(submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_p_{stator}, i, i, 1, N_r)^T\right), submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_p_{stator}, i, i, 1, N_r)^T, z\right)$
    $\sigma\_n_{rotor.}(i,z) = interp\left(lspline\left(submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_n_{rotor}, i, i, 1, N_r)^T\right), submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_n_{rotor}, i, i, 1, N_r)^T, z\right)$
    $\sigma\_n_{stator.}(i,z) = interp\left(lspline\left(submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_n_{stator}, i, i, 1, N_r)^T\right), submatrix(R, st(i,1), st(i,1), 1, N_r)^T, submatrix(\sigma\_n_{stator}, i, i, 1, N_r)^T, z\right)$
$\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor.} & \sigma\_p_{stator.} \\ \sigma\_n_{rotor.} & \sigma\_n_{stator.} \end{pmatrix}$
```

$$\sigma\_p_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -18.45 \\ 2 & -8.87 \\ 3 & 0.00 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_p_{rotor}{}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ 2 & 1 \\ 3 & 1 \end{array}$$

$$\sigma\_n_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 40.41 \\ 2 & 21.85 \\ 3 & 0.00 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_n_{rotor}{}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ 2 & 1 \\ 3 & 1 \end{array}$$

$$\sigma\_p_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.00 \\ 2 & 3.47 \\ 3 & 13.87 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_p_{stator}{}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ 2 & 1 \\ 3 & 1 \end{array}$$

$$\sigma\_n_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.00 \\ 2 & -7.07 \\ 3 & -28.26 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_n_{stator}{}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ 2 & 1 \\ 3 & 1 \end{array}$$

$$\begin{pmatrix}\sigma_{rotor}\\ \sigma_{stator}\end{pmatrix} = \left|\begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } r \in 1..N_r \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} \sigma_{rotor_{i,r}} = \sqrt{\left(\sigma\_z_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right) + \max\left(\sigma\_p_{rotor_{i,r}}, \sigma\_n_{rotor_{i,r}}\right)\right)^2 + \tau_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)^2} \\ \sigma_{stator_{i,r}} = \sqrt{\left(0+\max\left(\sigma\_p_{stator_{i,r}}, \sigma\_n_{stator_{i,r}}\right)\right)^2 + \tau_{stator}\left(i,R_{st(i,2),r}\right)^2}\end{array}\right. \\ \begin{pmatrix}\sigma_{rotor}\\ \sigma_{stator}\end{pmatrix}\end{array}\right.$$

$$\begin{pmatrix}\sigma_{rotor.}\\ \sigma_{stator.}\end{pmatrix} = \left|\begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \left| \begin{array}{l} \sigma_{rotor.}(i,z) = \text{interp}\left(\text{lspline}\left(\text{submatrix}\left(R, st(i,2), st(i,2), 1, N_r\right)^T, \text{submatrix}\left(\sigma_{rotor}, i, i, 1, N_r\right)^T\right), \text{submatrix}\left(R, st(i,2), st(i,2), 1, N_r\right)^T, \text{submatrix}\left(\sigma_{rotor}, i, i, 1, N_r\right)^T, z\right) \\ \sigma_{stator.}(i,z) = \text{interp}\left(\text{lspline}\left(\text{submatrix}\left(R, st(i,2), st(i,2), 1, N_r\right)^T, \text{submatrix}\left(\sigma_{stator}, i, i, 1, N_r\right)^T\right), \text{submatrix}\left(R, st(i,2), st(i,2), 1, N_r\right)^T, \text{submatrix}\left(\sigma_{stator}, i, i, 1, N_r\right)^T, z\right) \end{array}\right. \\ \begin{pmatrix}\sigma_{rotor.}\\ \sigma_{stator.}\end{pmatrix}\end{array}\right.$$

$\sigma_{rotor}{}^T =$

	1
1	161.59
2	101.72
3	0.00

$\cdot 10^6$

$\sigma_{stator}{}^T =$

	1
1	0.00
2	5.61
3	16.44

$\cdot 10^6$

$$\begin{pmatrix}safety_{rotor}\\ safety_{stator}\end{pmatrix} = \left|\begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } r \in 1..N_r \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} safety_{rotor_{i,r}} = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{\sigma\_blade\_long_i}{\sigma_{rotor_{i,r}}} & \text{if } \sigma_{rotor_{i,r}} \neq 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{array}\right. \\ safety_{stator_{i,r}} = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{\sigma\_blade\_long_i}{\sigma_{stator_{i,r}}} & \text{if } \sigma_{stator_{i,r}} \neq 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{array}\right. \end{array}\right. \\ \begin{pmatrix}safety_{rotor}\\ safety_{stator}\end{pmatrix}\end{array}\right.$$

$safety_{rotor}{}^T =$

	1
1	1.27
2	2.02
3	0000000000000000000000000000000

$safety_{rotor}{}^T \geq safety =$

	1
1	0
2	1
3	1

$safety_{stator}{}^T =$

	1
1	0000000000000000000000000000000
2	36.53
3	12.47

$safety_{stator}{}^T \geq safety =$

	1
1	1
2	1
3	1

Рассматриваемая ступень:

$$j := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow \left| \begin{array}{l} 1 \ \text{if } type = \text{"compressor"} \\ Z \ \text{if } type = \text{"turbine"} \end{array} \right. \\ j \leftarrow \left| \begin{array}{l} \text{"Такой ступени не существует!"} \ \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j \ \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$$

$$b_{lim} := \frac{\mathrm{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

Расстояния от оси ЛМ до рассматриваемой ступени (м):

$$Rj := \mathrm{submatrix}\left(R, 2 \cdot j - 1, 2 \cdot j + 1, 1, N_r\right) =$$

	1	2	3
1	325.0	339.2	353.5
2	325.0	339.2	353.5
3	308.6	331.0	353.5

$\cdot 10^{-3}$

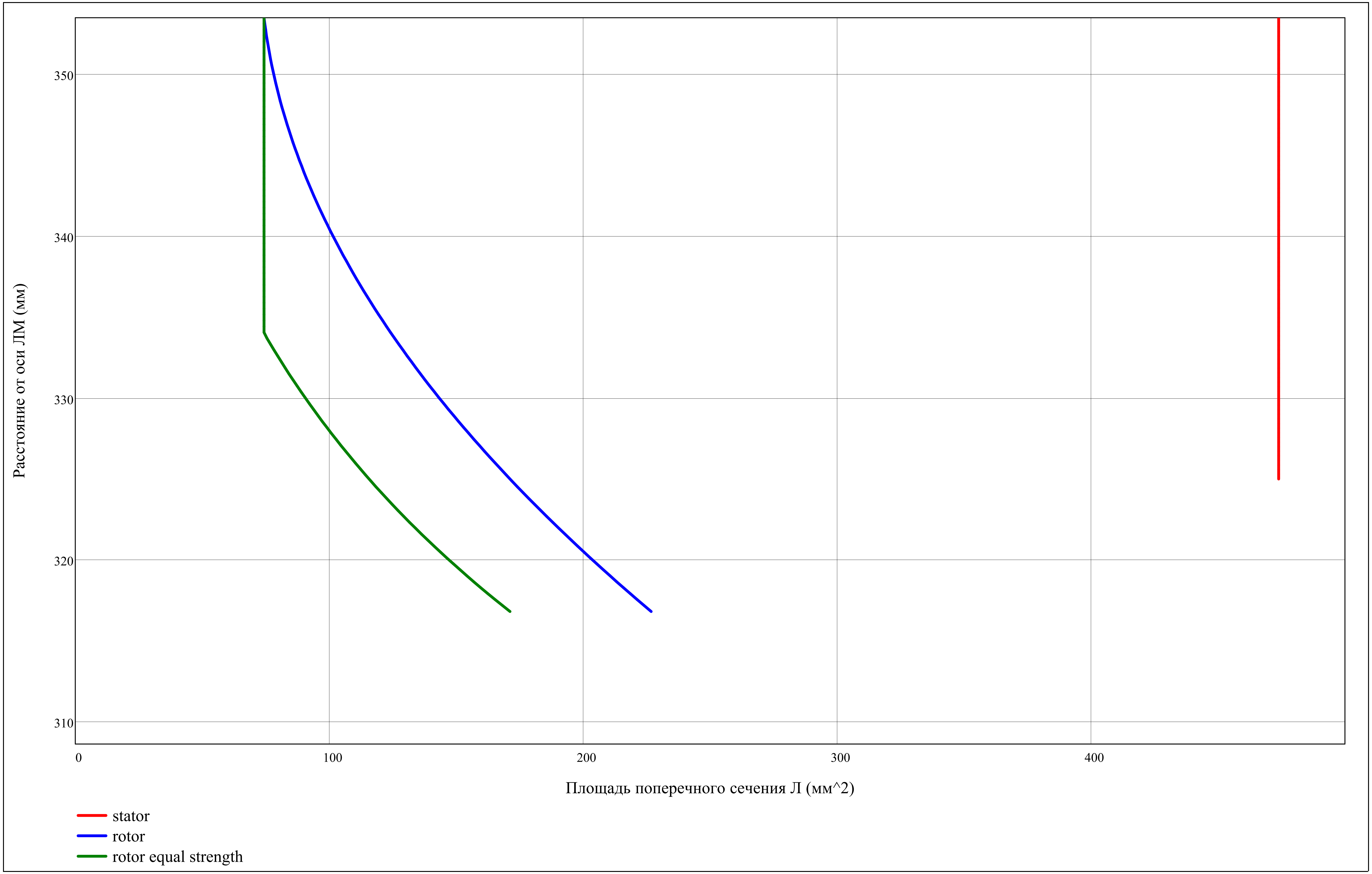
Дискретизация по высоте Л:

$$z := \min(Rj), \min(Rj) + \frac{\max(Rj) - \min(Rj)}{100} .. \max(Rj)$$

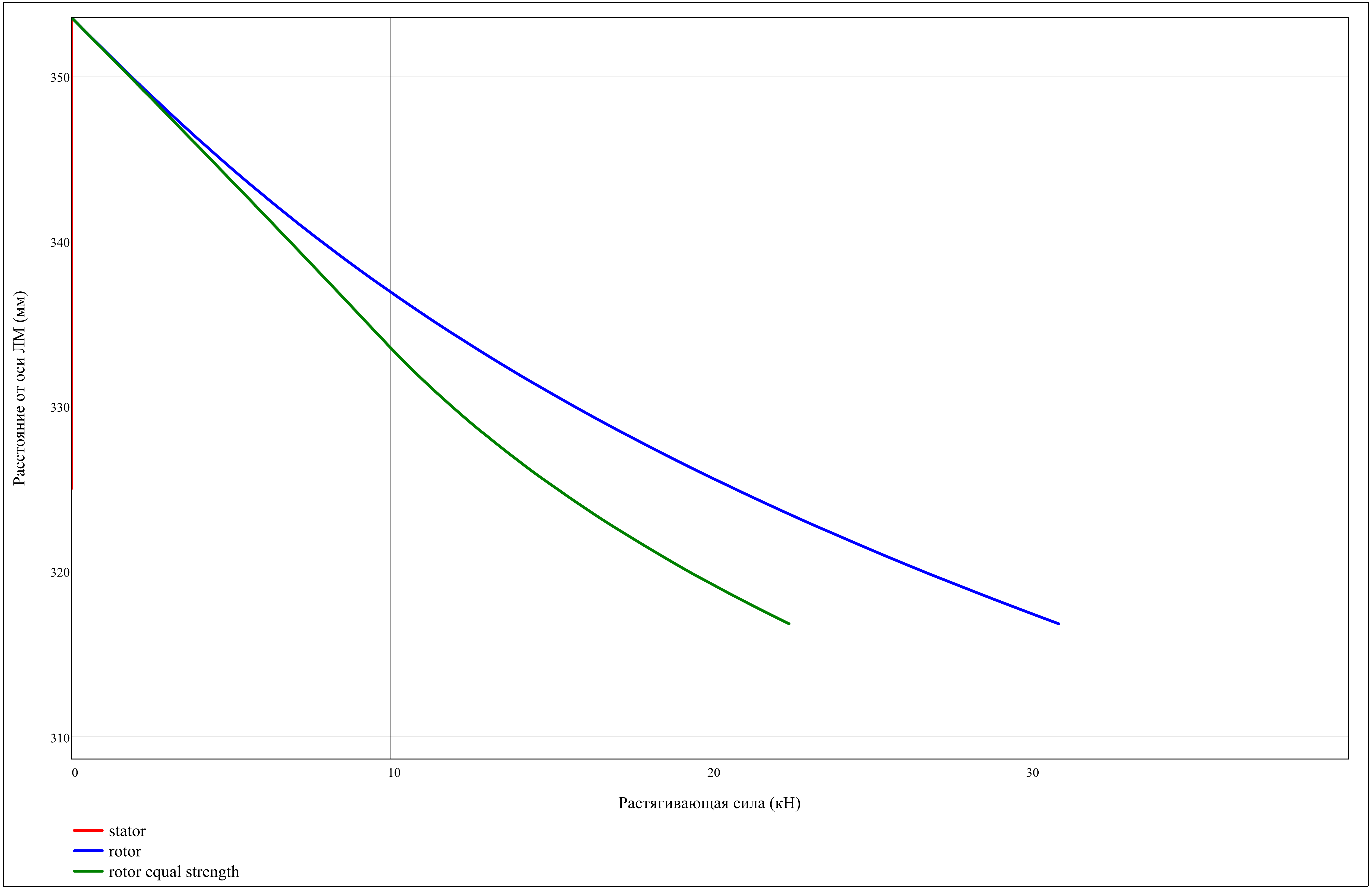
$$z_{rotor} := \left| \begin{array}{l} \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right), \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right) + \dfrac{\mathrm{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) - \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right)}{100} .. \mathrm{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) \ \text{if } type = \text{"compressor"} \\ \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right), \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right) + \dfrac{\mathrm{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) - \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right)}{100} .. \mathrm{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) \ \text{if } type = \text{"turbine"} \end{array} \right.$$

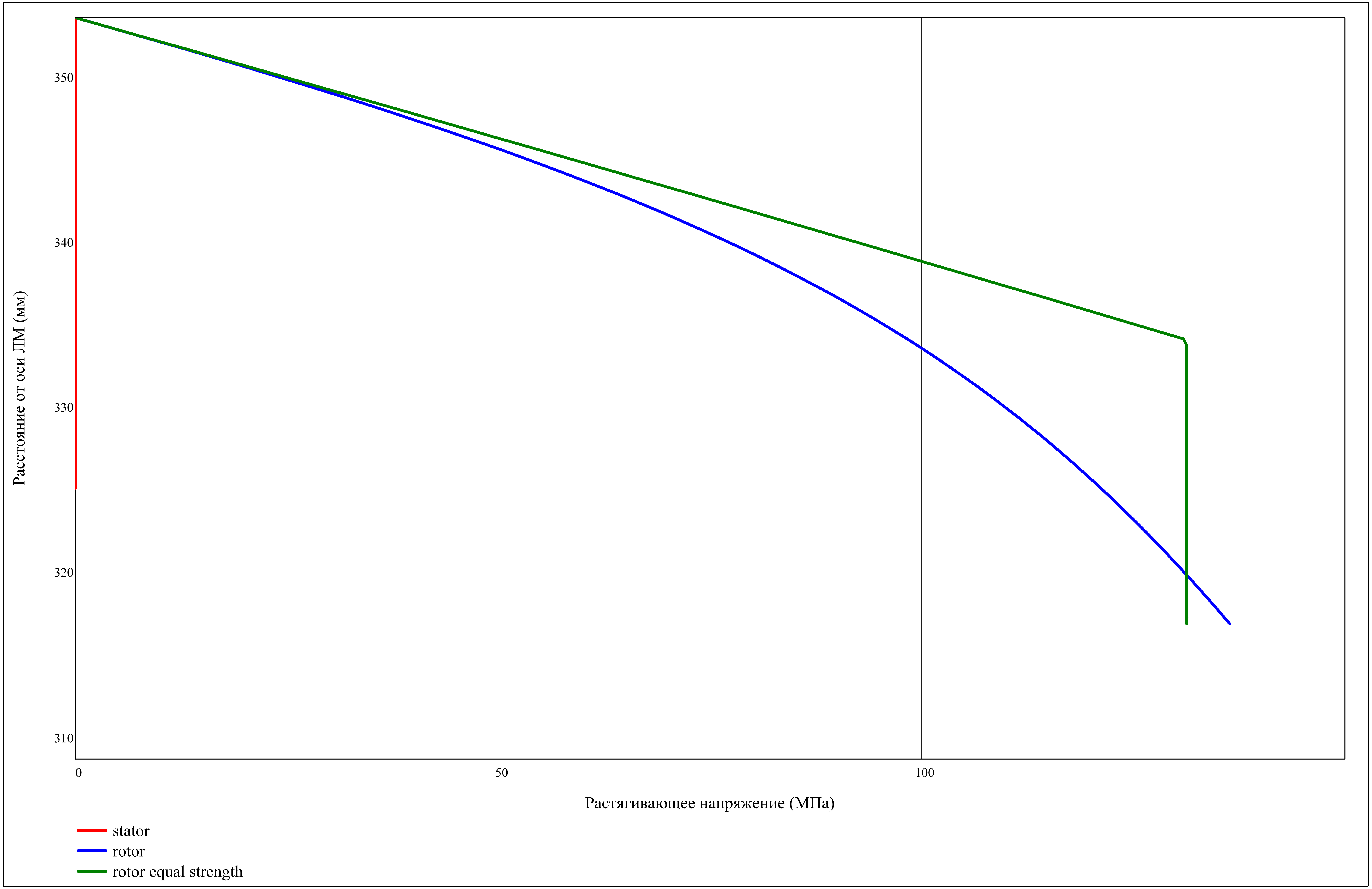
$$z_{stator} := \left| \begin{array}{l} \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right), \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right) + \dfrac{\mathrm{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) - \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right)}{100} .. \mathrm{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) \ \text{if } type = \text{"compressor"} \\ \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right), \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right) + \dfrac{\mathrm{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) - \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right)}{100} .. \mathrm{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) \ \text{if } type = \text{"turbine"} \end{array} \right.$$

▼ Результаты расчета на прочность Л

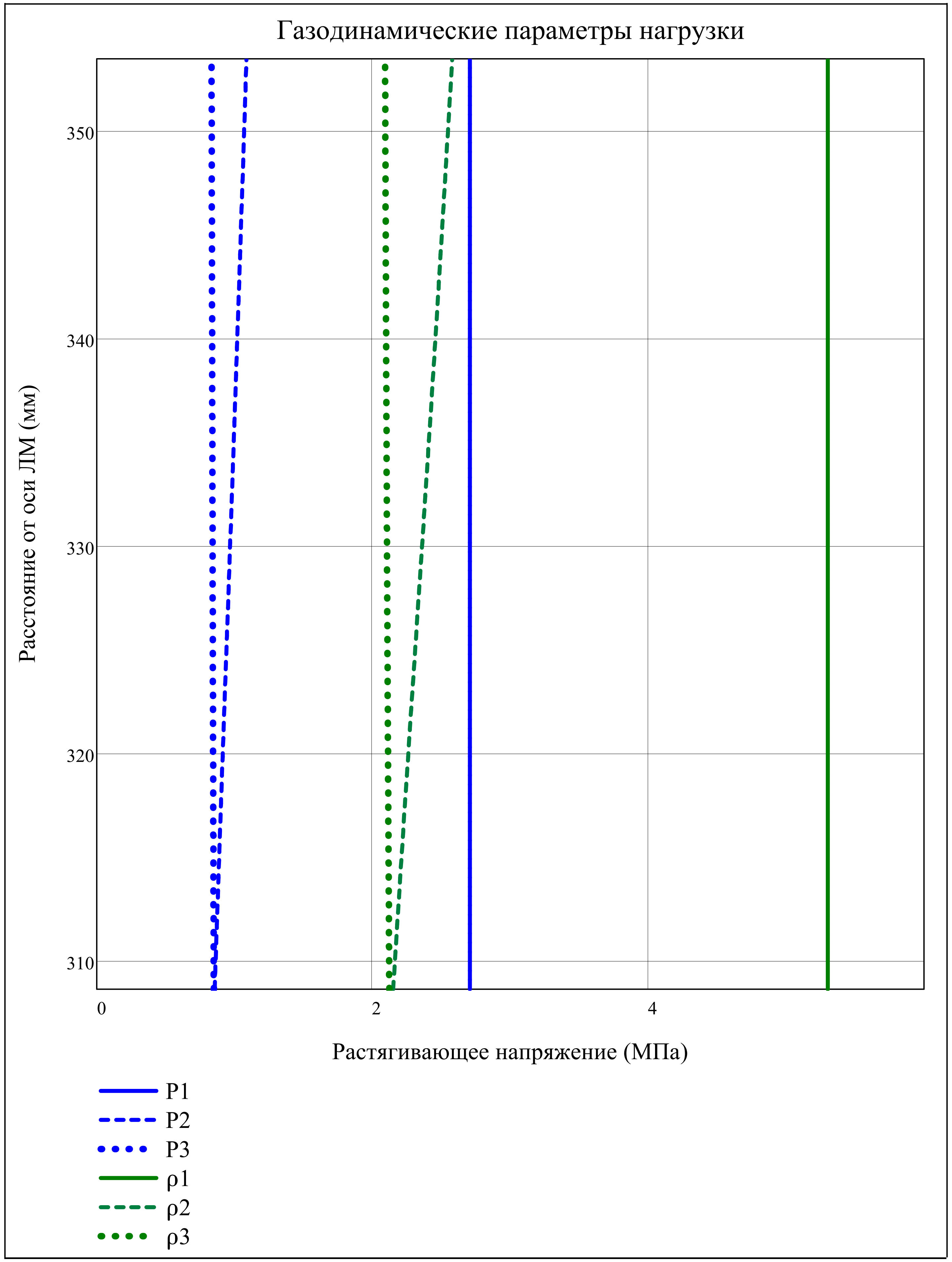


Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
100
200
300
400
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength

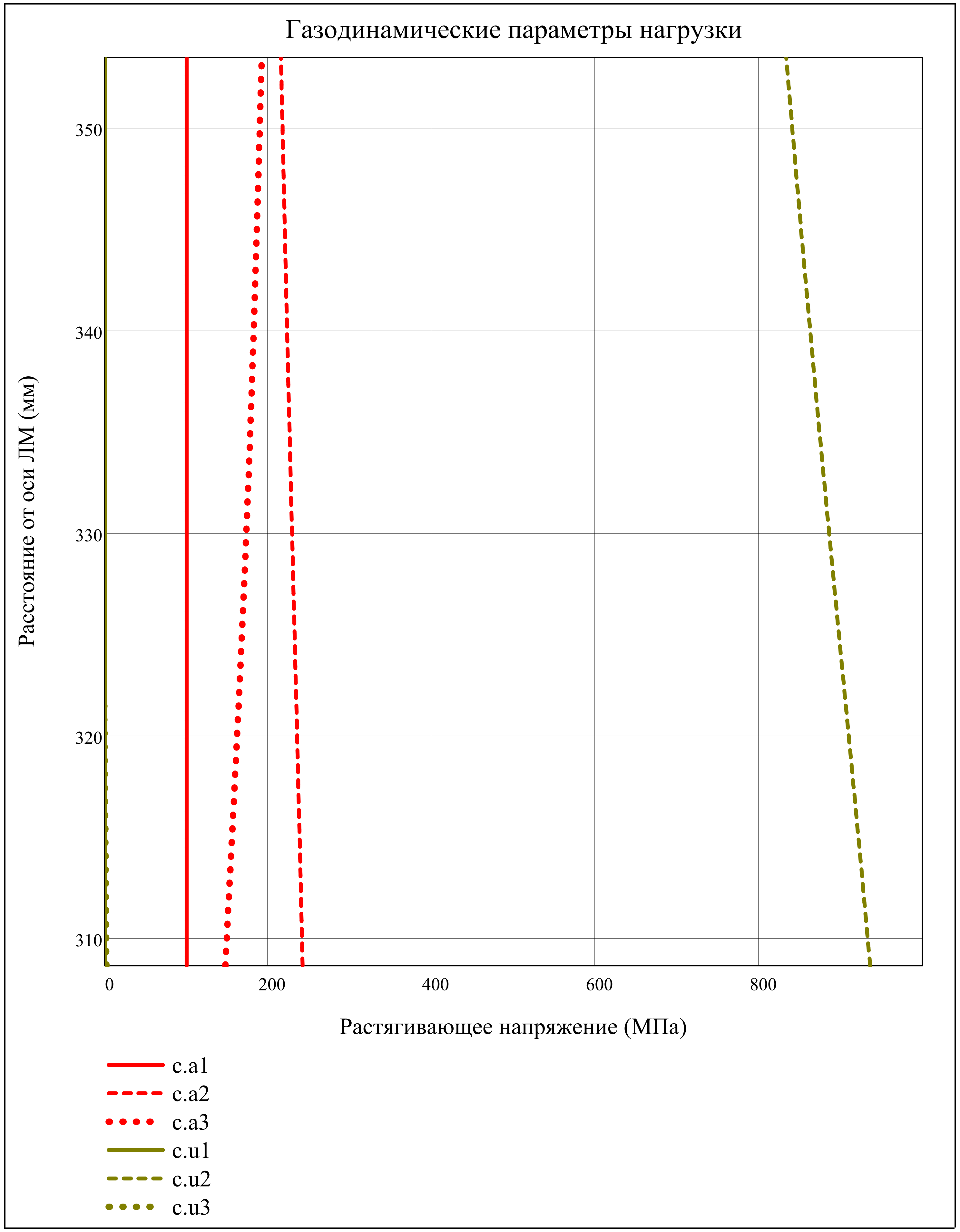

350
340
330
320
310
0
10
20
30
Растояние от оси ЛМ (мм)
Растягивающая сила (кН)
stator
rotor
rotor equal strength



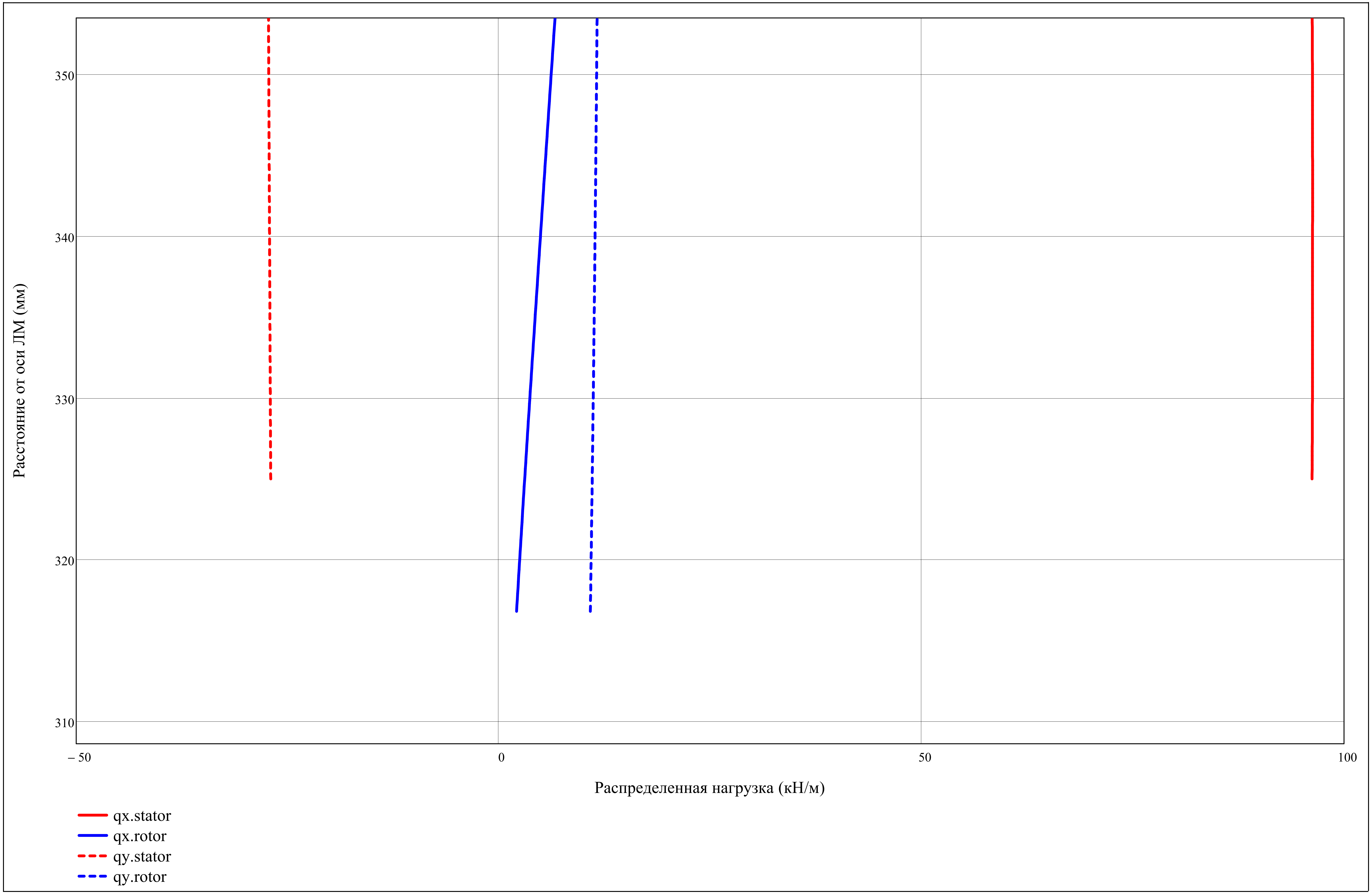
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
50
100
Растягивающее напряжение (МПа)
stator
rotor
rotor equal strength



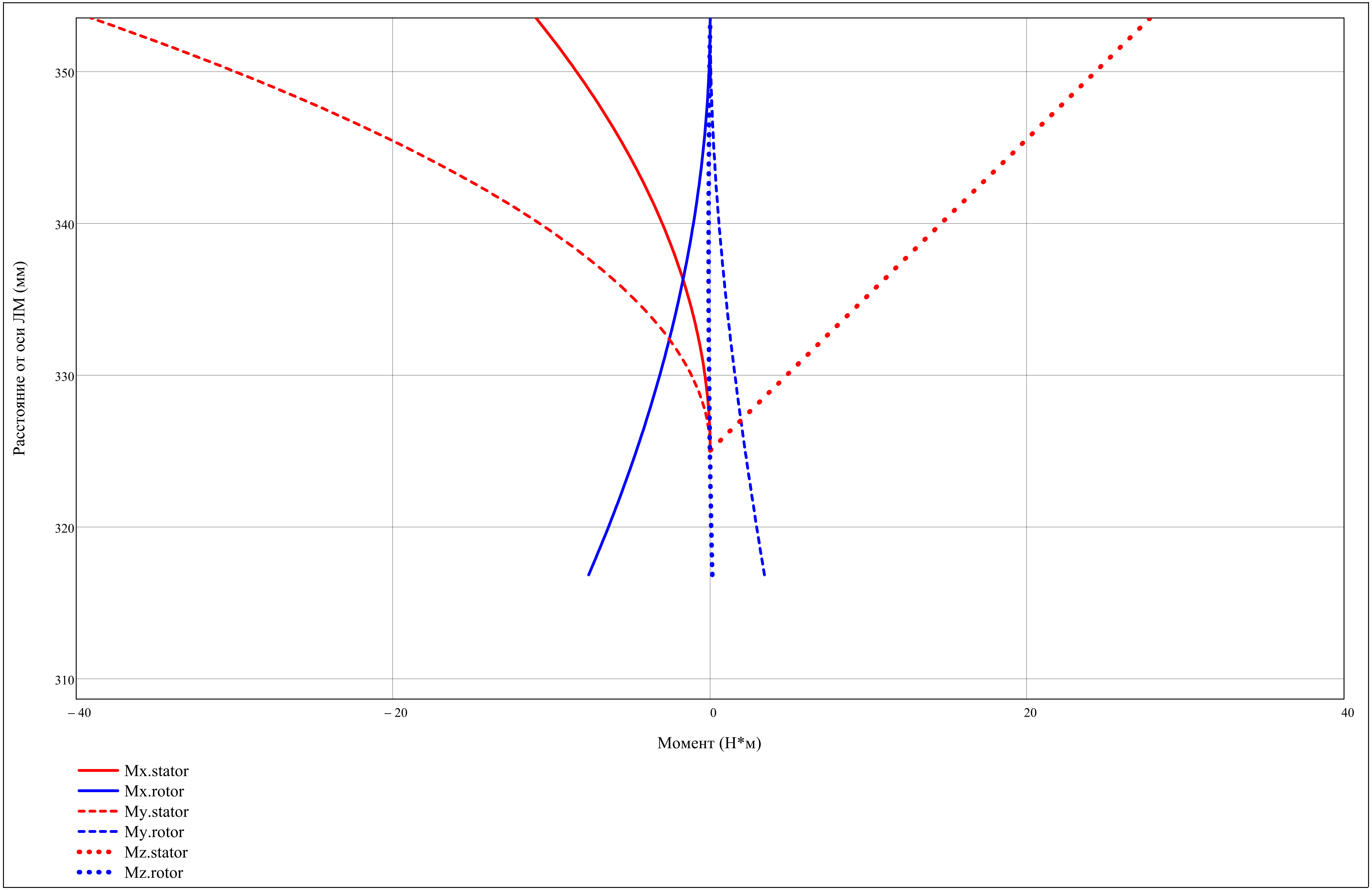
Газодинамические параметры нагрузки

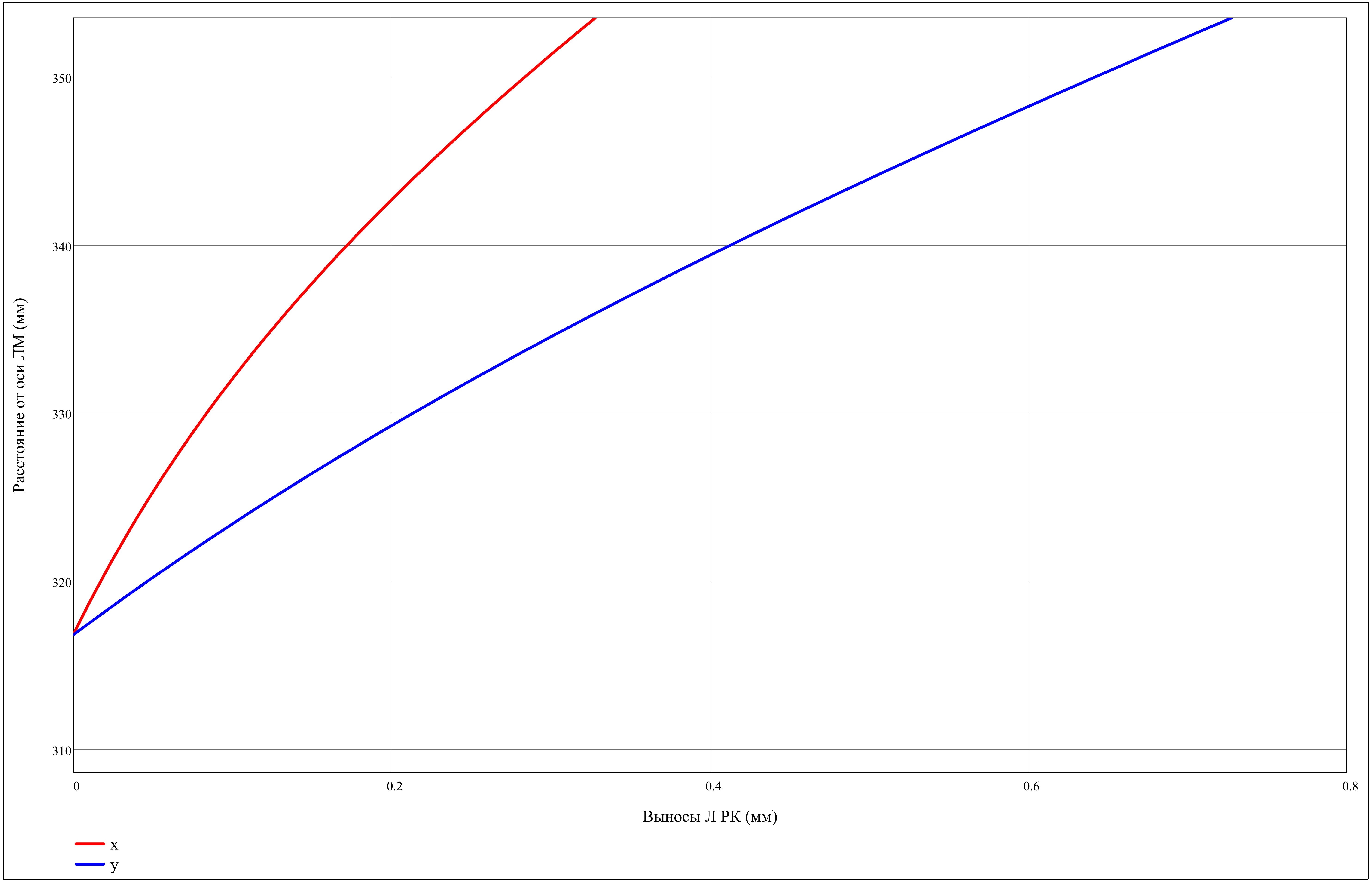


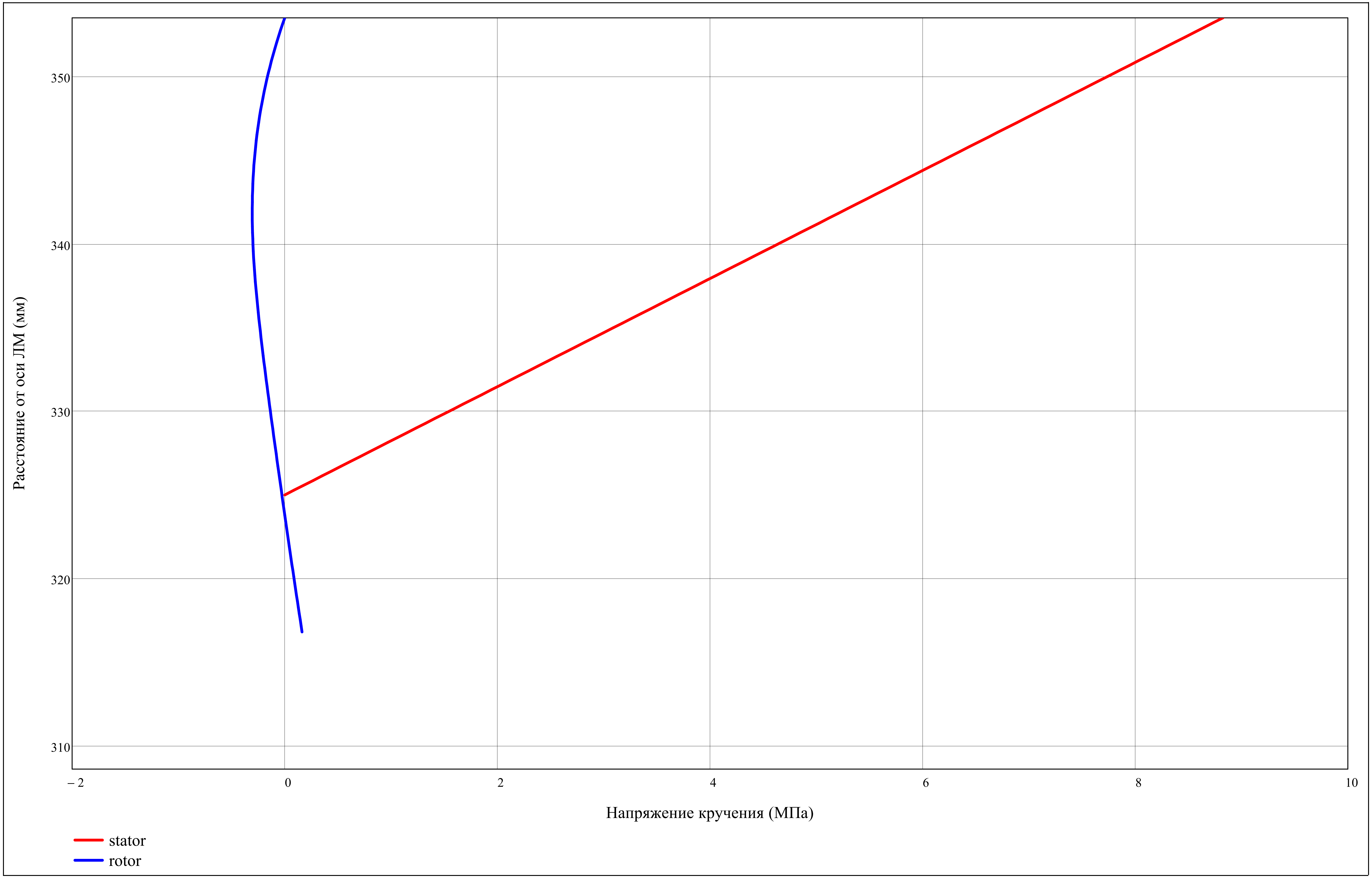
Газодинамические параметры нагрузки



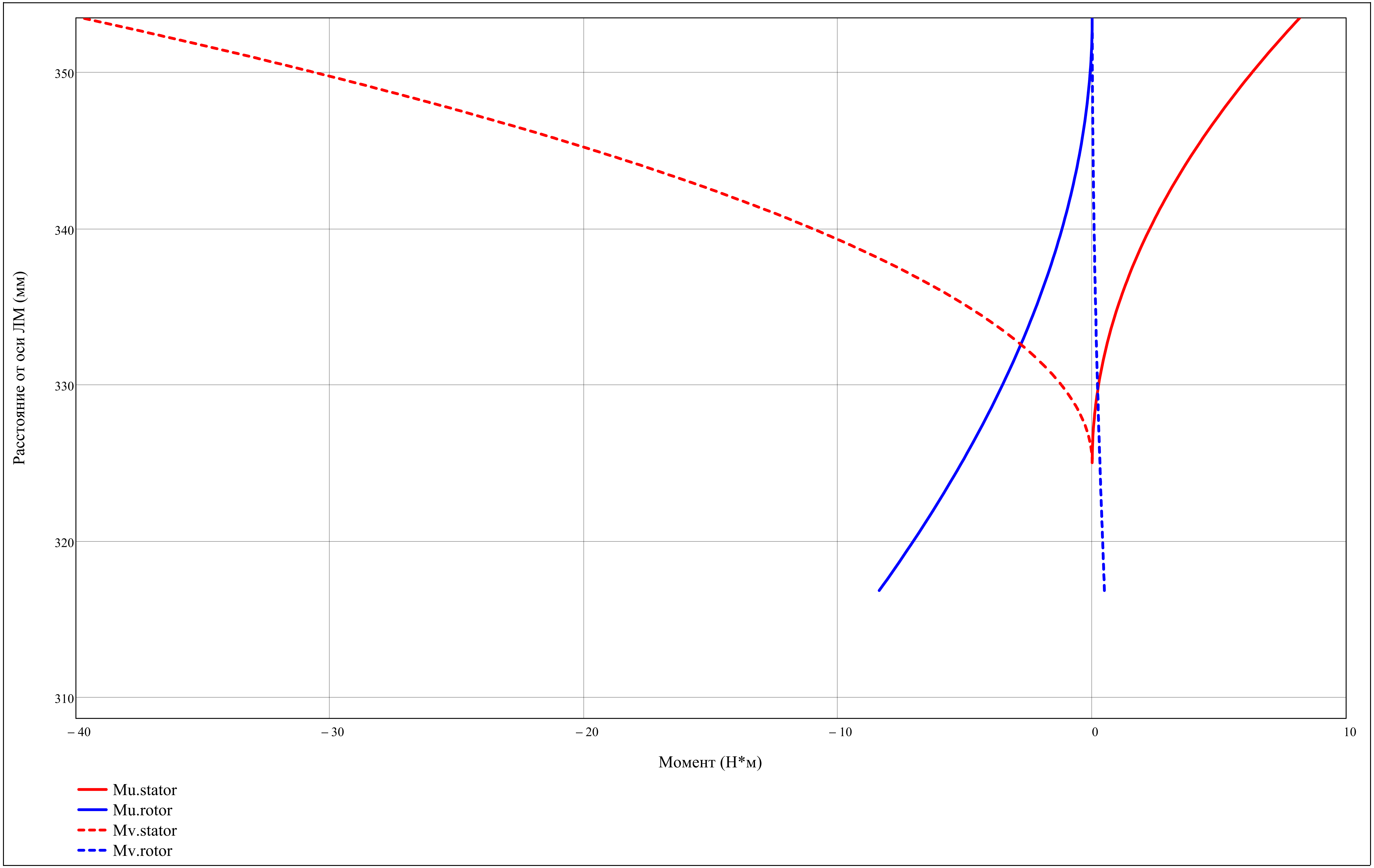
350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 50
0
50
100
Распределенная нагрузка (кН/м)
qx.stator
qx.rotor
qy.stator
qy.rotor

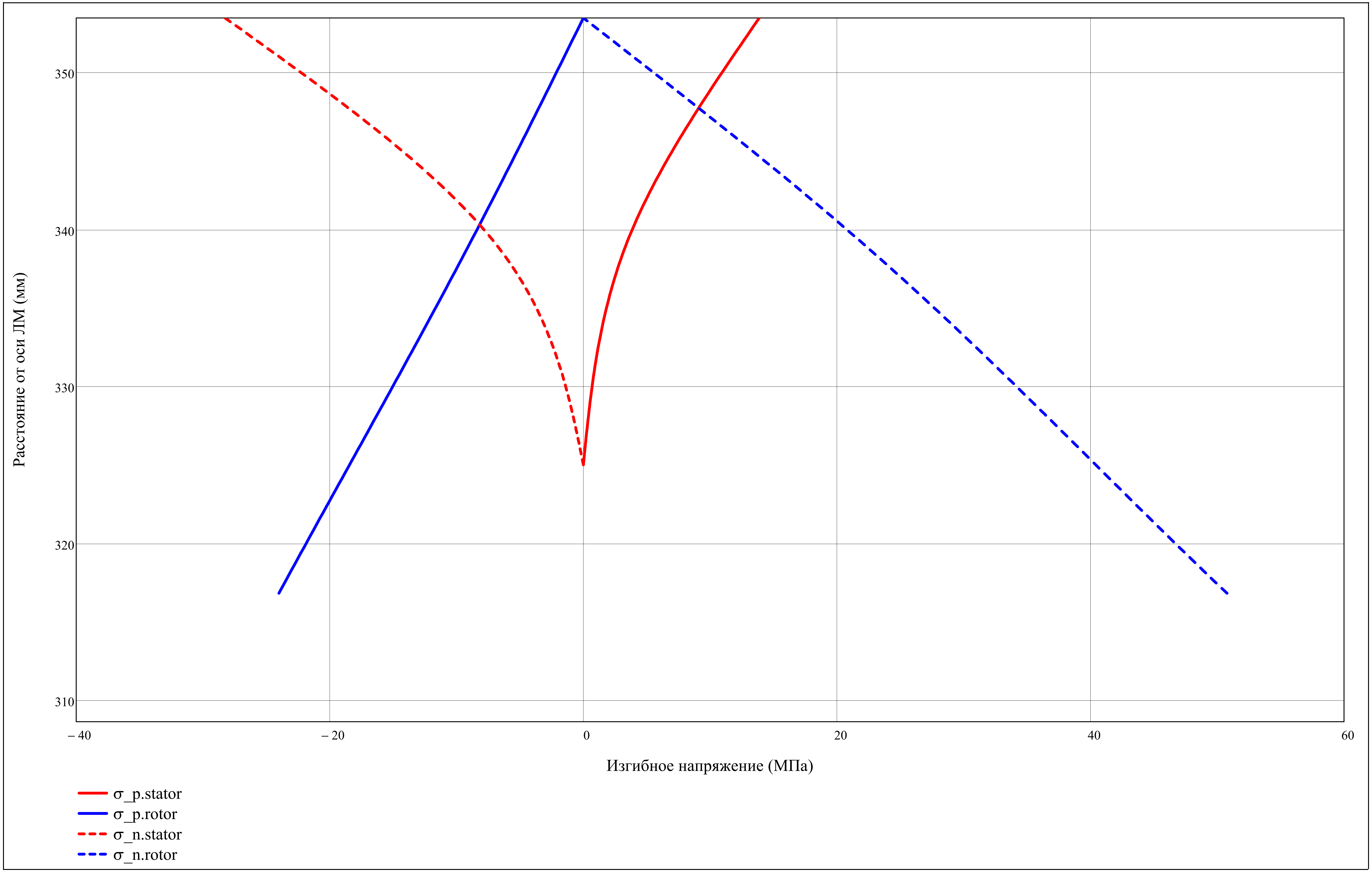

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 40
– 20
0
20
40
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor

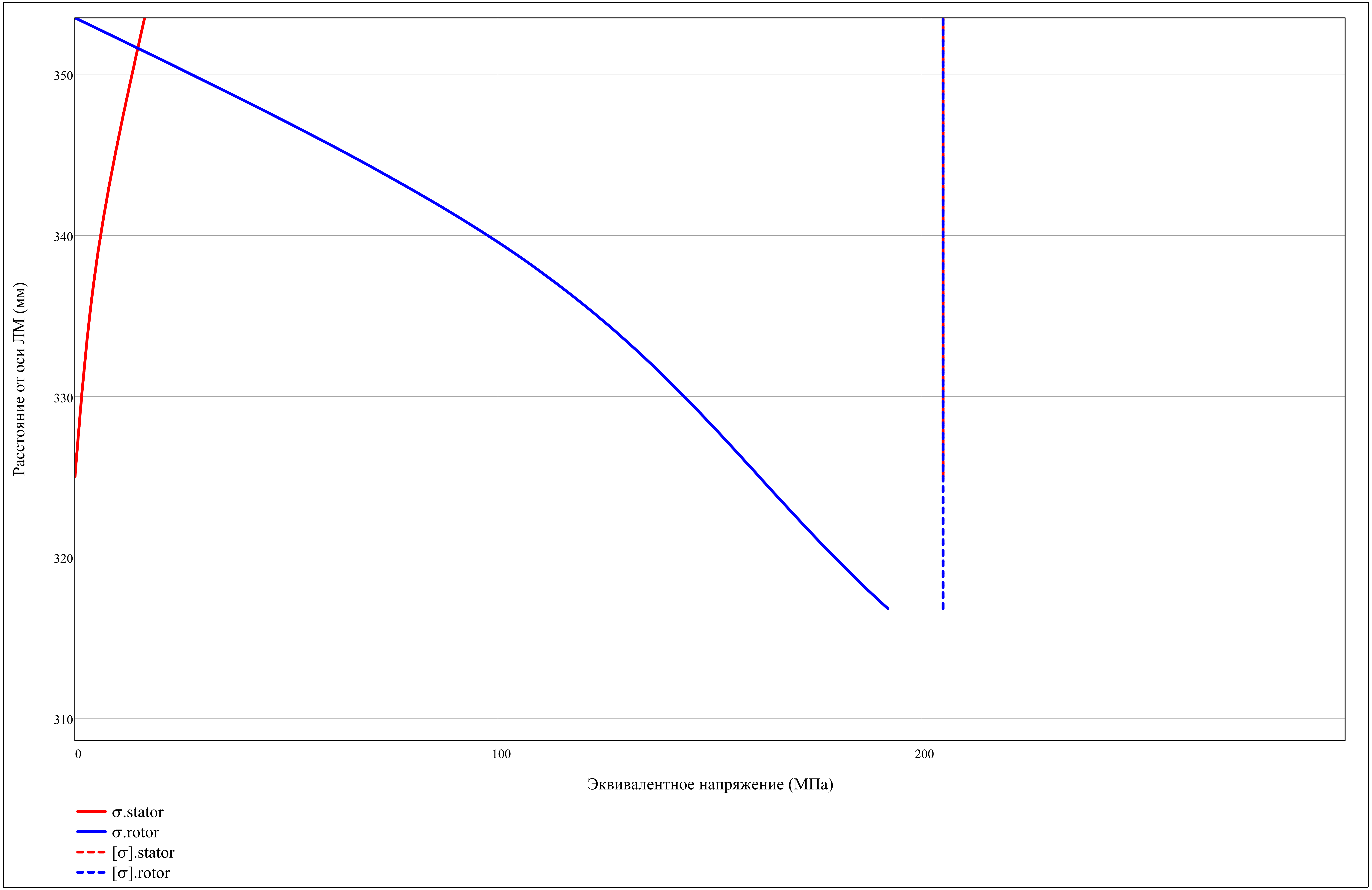

350
340
330
320
310
0
0.2
0.4
0.6
0.8
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Выносы Л РК (мм)
x
y



350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 2
0
2
4
6
8
10
Напряжение кручения (МПа)
stator
rotor


350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 40
– 30
– 20
– 10
0
10
Момент (Н*м)
Mu.stator
Mu.rotor
Mv.stator
Mv.rotor


Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 40
– 20
0
20
40
60
Изгибное напряжение (МПа)
σ_p.stator
σ_p.rotor
σ_n.stator
σ_n.rotor



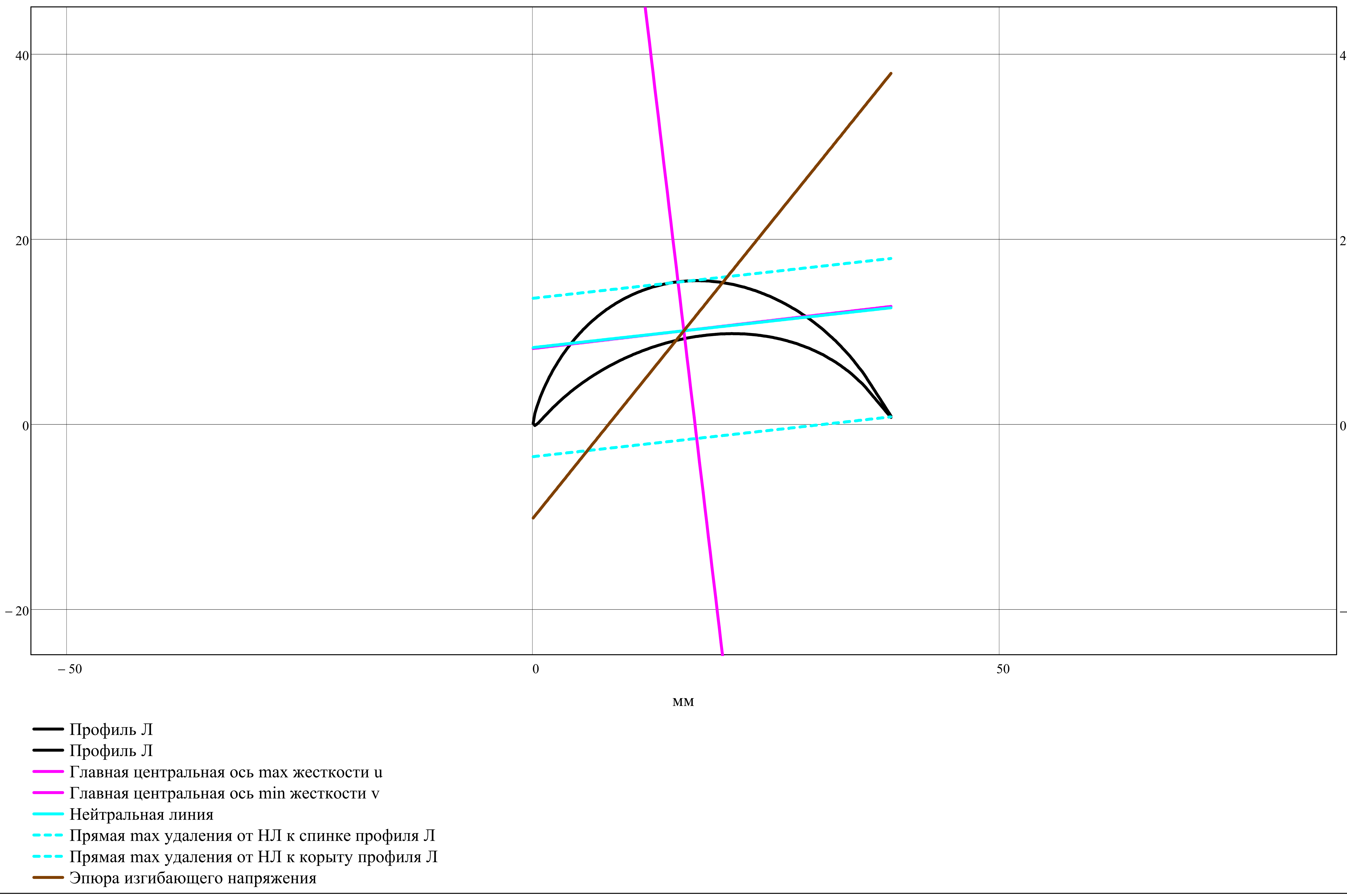
350
340
330
320
310
0
100
200
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Эквивалентное напряжение (МПа)
σ.stator
σ.rotor
[σ].stator
[σ].rotor

$$\begin{pmatrix} \text{blade} \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"rotor"} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{\text{rotor}_{j,r}} \\ v\_l_{\text{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade} = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{\text{stator}_{j,r}} \\ v\_l_{\text{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 5.323 \\ 2 & -11.789 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} x0_{\text{rotor}_{j,r}} \\ y0_{\text{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade} = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} x0_{\text{stator}_{j,r}} \\ y0_{\text{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 16.158 \\ 2 & 10.001 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\text{chord} = \left| \begin{array}{ll} \text{chord}_{\text{rotor}_{j,r}} & \text{if blade} = \text{"rotor"} \\ \text{chord}_{\text{stator}_{j,r}} & \text{if blade} = \text{"stator"} \end{array} \right. = 38.4 \cdot 10^{-3}$$


40
20
0
– 20
40
20
0
– 20
– 50
0
50
мм
мм
Профиль Л
Профиль Л
Главная центральная ось max жесткости u
Главная центральная ось min жесткости v
Нейтральная линия
Прямая max удаления от НЛ к спинке профиля Л
Прямая max удаления от НЛ к корыту профиля Л
Эпюра изгибающего напряжения

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$\begin{pmatrix} u\_u_{rotor_{j,r}} & v\_u_{rotor_{j,r}} \\ u\_l_{rotor_{j,r}} & v\_l_{rotor_{j,r}} \\ u\_u_{stator_{j,r}} & v\_u_{stator_{j,r}} \\ u\_l_{stator_{j,r}} & v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1	2
1	-0.22	5.32
2	21.03	-11.79
3	-7.06	29.14
4	-11.36	-38.70

$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor_{j,r}} & \sigma\_p_{stator_{j,r}} \\ \sigma\_n_{rotor_{j,r}} & \sigma\_n_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1	2
1	-18.4	0.0
2	40.4	0.0

$\cdot 10^{6}$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{stator_{j,r}} \\ \sigma_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	0.0
2	161.6

$\cdot 10^{6}$

$$\begin{pmatrix} safety_{stator_{j,r}} \\ safety_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	0000000000000000000000
2	

Результаты расчета на прочность Л

Вывод результатов расчета Л на прочность

▼ Выбор материала Д

Запас по температуре (К): $\Delta T_{safety} = 0$

Выбранный материал Д: $material\_disk_i = \begin{cases} \text{"ВЖ175"} & \text{if } turbine = \text{"ТВД"} \\ \text{"ЭП742"} & \text{if } turbine = \text{"ТНД"} \end{cases}$

Плотность материала Д (кг/м^3):

$$\rho\_disk_i = \begin{cases} 8266 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВЖ175"} \\ 8320 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ЭП742"} \\ 8393 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ЖС-6К"} \\ 7900 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ41"} \\ 4500 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ25"} \\ 4570 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ23"} \\ 4510 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ9"} \\ 4430 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ6"} \\ NaN & \text{otherwise} \end{cases}$$

Предел длительной прочности Д (Па):

$$\sigma\_disk\_long_i = 10^6 \cdot \begin{cases} 620 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВЖ175"} \\ 680 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ЭП742"} \\ 125 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ЖС-6К"} \\ 123 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ41"} \\ 150 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ25"} \\ 230 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ23"} \\ 200 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ9"} \\ 210 & \text{if } material\_disk_i = \text{"ВТ6"} \\ NaN & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$material\_disk^T = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & \text{"ВЖ175"} \\ \hline \end{array}$$

$$\rho\_disk^T = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 8266 \\ \hline \end{array}$$

$$\sigma\_disk\_long^T = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 620 \\ \hline \end{array} \cdot 10^6$$

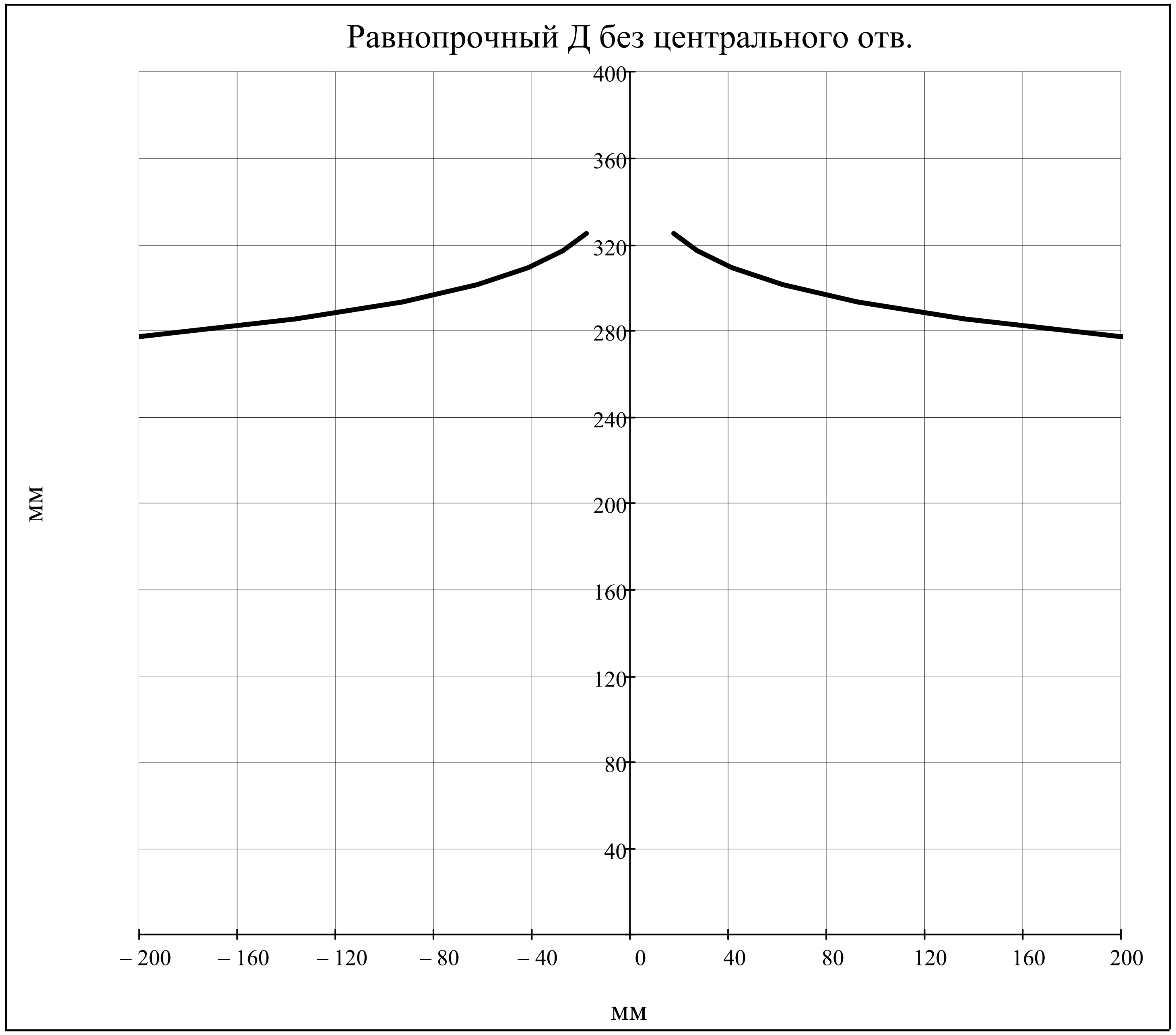
▲ Выбор материала Д

Рассматриваемая ступень: $j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$

Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

$$h(i,z) = \left| \begin{array}{ll} \left(\text{chord}_{\text{rotor}_{i,\text{ORIGIN}}} \cdot \sin\left(\upsilon_{\text{rotor}_{i,\text{ORIGIN}}}\right)\right) \cdot e^{\frac{\rho\_\text{disk}_i \cdot \omega^2}{2} \cdot \frac{1}{\sigma\_z_{\text{rotor}}\left(i, R_{\text{st}(i,2),\text{ORIGIN}}\right)} \cdot \left[\left(R_{\text{st}(i,2),\text{ORIGIN}}\right)^2 - z^2\right]} & \text{if } z \le R_{\text{st}(i,2),\text{ORIGIN}} \\ \text{NaN} & \text{otherwise} \end{array} \right.$$

$$z = 0, \frac{R_{\text{st}(j,2),\text{ORIGIN}}}{N_{\text{dis}}} .. R_{\text{st}(j,2),\text{ORIGIN}}$$



Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

$$type := \left| \begin{array}{l} type \leftarrow \text{"stator"} \\ type \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \text{"Нет такого типа!"} & \text{if } type \neq \text{"stator"} \wedge type \neq \text{"rotor"} \\ type & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = \text{"stator"}$$

Рассматриваемая ступень:

$$j := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow 1 \\ j \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$$

Приведенная скорость по профилю Л

Общие параметры охлаждения

Конвективное охлаждение

▶ Результаты конвективного охлаждения

Конвективно-пленочное охлаждение

▶ Результат конвективно-пленочного охлаждения

▶ Вывод результатов охлаждения

$D^T =$

	1	2	3	4
1	650.0	650.0	617.2	
2	678.5	678.5	662.1	
3	707.0	707.0	707.0	

$$R = \frac{D}{2}$$

$R^T =$

	1	2	3	4
1	325.0	325.0	308.6	
2	339.2	339.2	331.0	
3	353.5	353.5	353.5	

```
$\bar{d}$ =  for $i \in 1..Z$
               for $a \in 1..3$
                 $\bar{d}_{st(i,a)} = \frac{D_{st(i,a),1}}{D_{st(i,a),N_r}}$
             $\bar{d}$
```

$\bar{d}^T =$

	1	2	3	4
1	0.9194	0.9194	0.8730	

$\bar{d}^T \le 0.9 =$

	1	2	3
1	0	0	1

```
h =  for $i \in 1..2Z+1$
       $h_i = \frac{F_i}{\pi \cdot D_{i,av(N_r)}}$
     h
```

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 927.16 \\ 147.28 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 231.94 \\ 147.27 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 520.18 \\ 451.35 \\ 504.94 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.49 \\ 89.31 \end{pmatrix} \cdot {}^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 510.48 \\ 510.48 \\ 484.75 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11.08 \\ 149.08 \\ 16.96 \end{pmatrix} \cdot {}^{\circ}$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.51 \cdot {}^{\circ}$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 132.12 \cdot {}^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 892.55 \\ 174.05 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 223.28 \\ 174.03 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 542.17 \\ 399.52 \\ 550.87 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.49 \\ 90.87 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 532.86 \\ 532.86 \\ 520.00 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.63 \\ 146.02 \\ 18.42 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.51 \cdot ^{\circ}$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 127.61 \cdot ^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 860.58 \\ 191.81 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 215.28 \\ 191.70 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 564.18 \\ 351.59 \\ 593.43 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.49 \\ 91.90 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 555.25 \\ 555.25 \\ 555.25 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.21 \\ 142.24 \\ 18.85 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.51 \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 123.4 \cdot ^\circ$$

00000000.0
1.269