Исходные данные

Коэф. запаса: $safety = 1.3$

$turbine = \text{"ТВД"}$

Горючее: $Fuel = \text{"Керосин"}$

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):

$$\begin{pmatrix} G_{г} \\ G_{leak} \\ G_{cooling} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} 32.30 \\ 106.96\cdot 10^{-3} \\ 3240.8\cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \text{ if } turbine = \text{"ТВД"} \\ \begin{pmatrix} 35.43 \\ 35.65\cdot 10^{-3} \\ 810.2\cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \text{ if } turbine = \text{"ТНД"} \end{array} \right. =$$

	1
1	32.30
2	0.11
3	3.24

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Абс. скорость перед Т (м/с):

Абс. скорость после Т (м/с):

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

	1
1	100.0
2	180.0

[1, c.15] $80 \le c_{Т} \le 400 = 1$

Лопаточный КПД Т: $\eta_{Л} = 88\%$

$88\% \le \eta_{Л} \le 95\% = 1$

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

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

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

▲ Исходные данные

Основне размеры Т

$z = ORIGIN..N_r$

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): $G_T = G_Г + G_{cooling} = 35.4$

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

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

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

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

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

=

	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): $Cp_{г} = Cp_{газ}\left(P_{г}, T_{г}, \alpha_{ox}, Fuel\right) = 1309$

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

	1
1	1
2	1.293
3	866477.23
4	1424.088

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

Показатель адиабаты после Т: $k_т = 1.293$

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

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

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

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

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

Степень понижения давления: $\pi_{T} = \dfrac{P*_{г}}{P_{т}} = 3.15$

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

$$\begin{pmatrix} v_{г} \\ v_{т} \end{pmatrix} = R_{газ}\left(\alpha_{ox}, Fuel\right) \cdot \begin{pmatrix} \dfrac{T_{г}}{P_{г}} \\ \dfrac{T_{т}}{P_{т}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	0.189
2	0.474

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

$$\begin{pmatrix} F_{г} \\ F_{т} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{G_{г} \cdot v_{г}}{c_{г}} \\ \dfrac{G_{т} \cdot v_{т}}{c_{т}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	60741
2	93341

$\cdot 10^{-6}$

Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

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

Определение количества ступеней Т

```
$\begin{pmatrix} Z_{recomend} \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} =$
    $c_{cp} = \mathrm{mean}(c_Г, c_Т)$
    $\alpha_{возв} = 0.025$
    while $1 > 0$
        $Z = \mathrm{round}\left[\dfrac{2 \cdot H_Т \cdot \dfrac{(1+\alpha_{возв})}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2} - 1}{\dfrac{u_Т^2}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2 \cdot y_0^2} - 1}\right]$
        break if $\left|\mathrm{eps}\left[\text{"rel"}, \alpha_{возв}, \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_Т^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_Л)\right]\right| < \mathrm{epsilon}$
        $\alpha_{возв} = \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_Т^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_Л)$
        if $\alpha_{возв} = 0$
            $\begin{pmatrix} Z \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
            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: $$material\_blade_i = \left| \begin{array}{l} \text{"ВКНА-1В"} \quad \text{if } 1523 \le T*_{г} \\ \text{"ВЖМ7"} \quad \text{if } 1323 \le T*_{г} < 1523 \\ \text{"ЖС-36"} \quad \text{if } 1123 \le T*_{г} < 1323 \end{array} \right.$$

Плотность материала Л (кг/м^3): $$\rho\_blade_i = \left| \begin{array}{l} 7938 \quad \text{if } material\_blade_i = \text{"ВКНА-1В"} \\ 8390 \quad \text{if } material\_blade_i = \text{"ВЖМ7"} \\ 8760 \quad \text{if } material\_blade_i = \text{"ЖС-36"} \\ NaN \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

Предел длительной прочности Л РК (Па): $$\sigma\_blade\_long_i = 10^6 \cdot \left| \begin{array}{l} 205 \quad \text{if } material\_blade_i = \text{"ВКНА-1В"} \\ 120 \quad \text{if } material\_blade_i = \text{"ВЖМ7"} \\ 120 \quad \text{if } material\_blade_i = \text{"ЖС-36"} \\ NaN \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

$material\_blade^T =$

	1
1	"ВКНА-1В"

$\rho\_blade^T =$

	1
1	7938

$\sigma\_blade\_long^T =$

	1
1	205

$\cdot 10^6$

Коэф. формы: $k_n = 6.8$

Модуль Юнга I рода материала Л (Па): $E\_blade = 210 \cdot 10^9$

Коэф. Пуассона материала Л (): $\mu\_steel = 0.3$

Частота вращения Т

Max частота вращения ротора на входе (об/мин): $\sqrt{\dfrac{\sigma\_blade\_long_Z}{safety \cdot k_n \cdot F_г}} = 19539$

Max частота вращения ротора на выходе (об/мин): $n_{max} = \sqrt{\dfrac{\sigma\_blade\_long_Z}{safety \cdot k_n \cdot F_т}} = 15762$

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

$$n = \left| \begin{array}{l} 15000 \ \text{ if } turbine = \text{"ТВД"} \\ 5300 \ \text{ if } turbine = \text{"ТНД"} \end{array} \right. = 15000$$

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):

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

Длина Л первой ступени Т (м):

Длина Л последней ступени Т (м):

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

$$\frac{l_г}{D_{г.ср}} = \frac{1}{22} \qquad \frac{l_т}{D_{т.ср}} = \frac{1}{14}$$

Диаметр периферии после Т (м):

Диаметр корня после Т (м):

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

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
    |   $F_i = \frac{F_т - F_г}{st(Z,3) - 1} \cdot i + \left(F_г - \frac{F_т - F_г}{st(Z,3) - 1}\right)$
    | 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 $r = 1$
            | $\frac{1}{2} \cdot \left[D_{st(i,a+1),1} + \sqrt{(D_{st(i,a+1),1})^2 + \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}}\right]$ if $r = av(N_r)$
            | $\sqrt{(D_{st(i,a+1),1})^2 + \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}}$ 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 $ЗППЧ_{i,a} = "пер"$
            | $\sqrt{(D_{st(i,a+1),N_r})^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}}$ if $r = 1$
            | $\frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{(D_{st(i,a+1),N_r})^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} + D_{st(i,a+1),N_r}\right]$ 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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

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

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

NaN otherwise

D

```
u = | for i ∈ 1 .. 2·Z + 1
    |   for r ∈ 1 .. N_r
    |       u_{i,r} = π·D_{i,r}·n / 60
    | u
```

$u^T =$

	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						

$\cdot 10^{-6}$

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

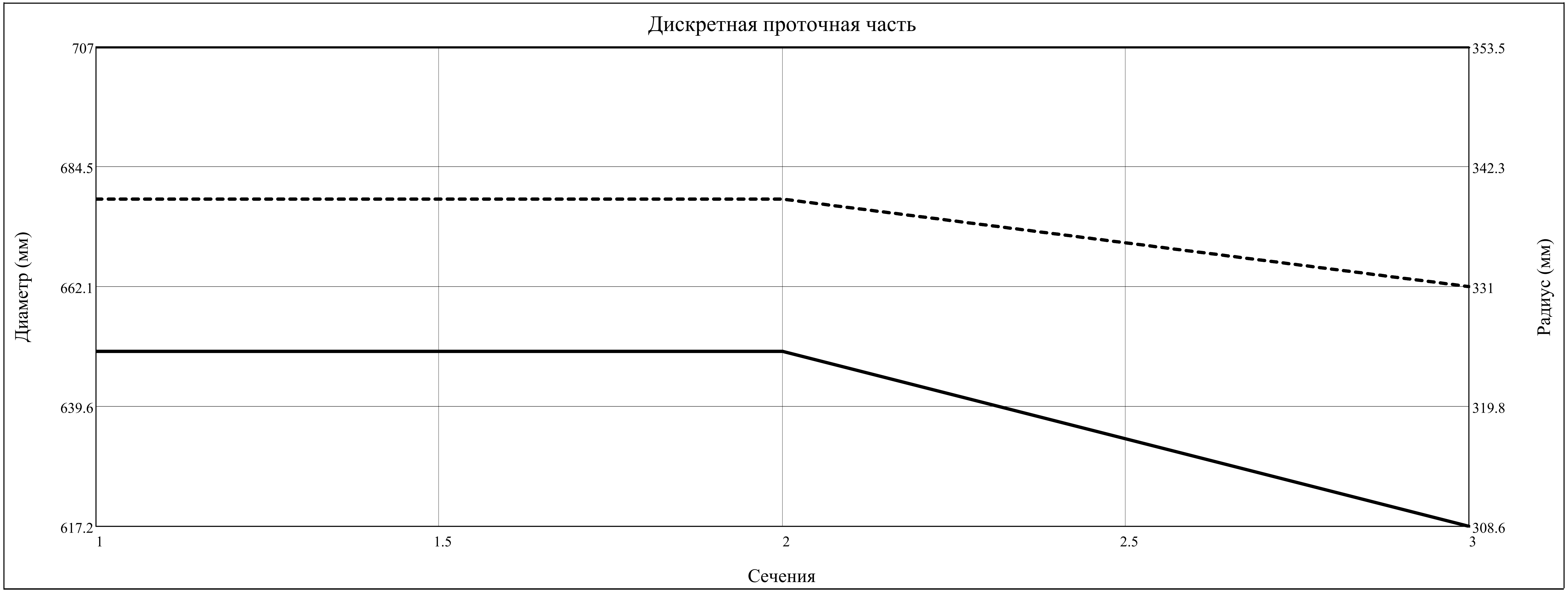
$\overline{d}^T =$

	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

$\cdot 10^{-3}$



$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

Осевая ширина Л СА и РК [1, с.183]:

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

$\text{stack}\left(B_{CA}{}^{T}, B_{PK}{}^{T}\right) =$

	1
1	40.9
2	30.1

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\Delta_r{}^{T} =$

	1	2	3
1	0.707	0.707	0.707

$\cdot 10^{-3}$

$\Delta_a{}^{T} =$

	1
1	10.234

$\cdot 10^{-3}$

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

```
$\begin{pmatrix} \gamma_{ПЧпер} \\ \gamma_{ПЧ} \\ \gamma_{ПЧкор} \end{pmatrix} =$
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 $a = 2$
            $\gamma_{ПЧпер_{st(i,a)}} = \operatorname{atan}\left(\frac{k2 - k1}{1 + k2 \cdot k1}\right)$
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 $a = 2$
        $\gamma_{ПЧ_{st(i,a)}} = \operatorname{atan}\left(\frac{k2 - k1}{1 + k2 \cdot k1}\right)$
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 $a = 2$
            $\gamma_{ПЧкор_{st(i,a)}} = \operatorname{atan}\left(\frac{k2 - k1}{1 + k2 \cdot k1}\right)$
$\begin{pmatrix} \gamma_{ПЧпер} \\ \gamma_{ПЧ} \\ \gamma_{ПЧкор} \end{pmatrix}$
```

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

	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

$\gamma_{ПЧкор}{}^{T} > -12 \cdot ° =$

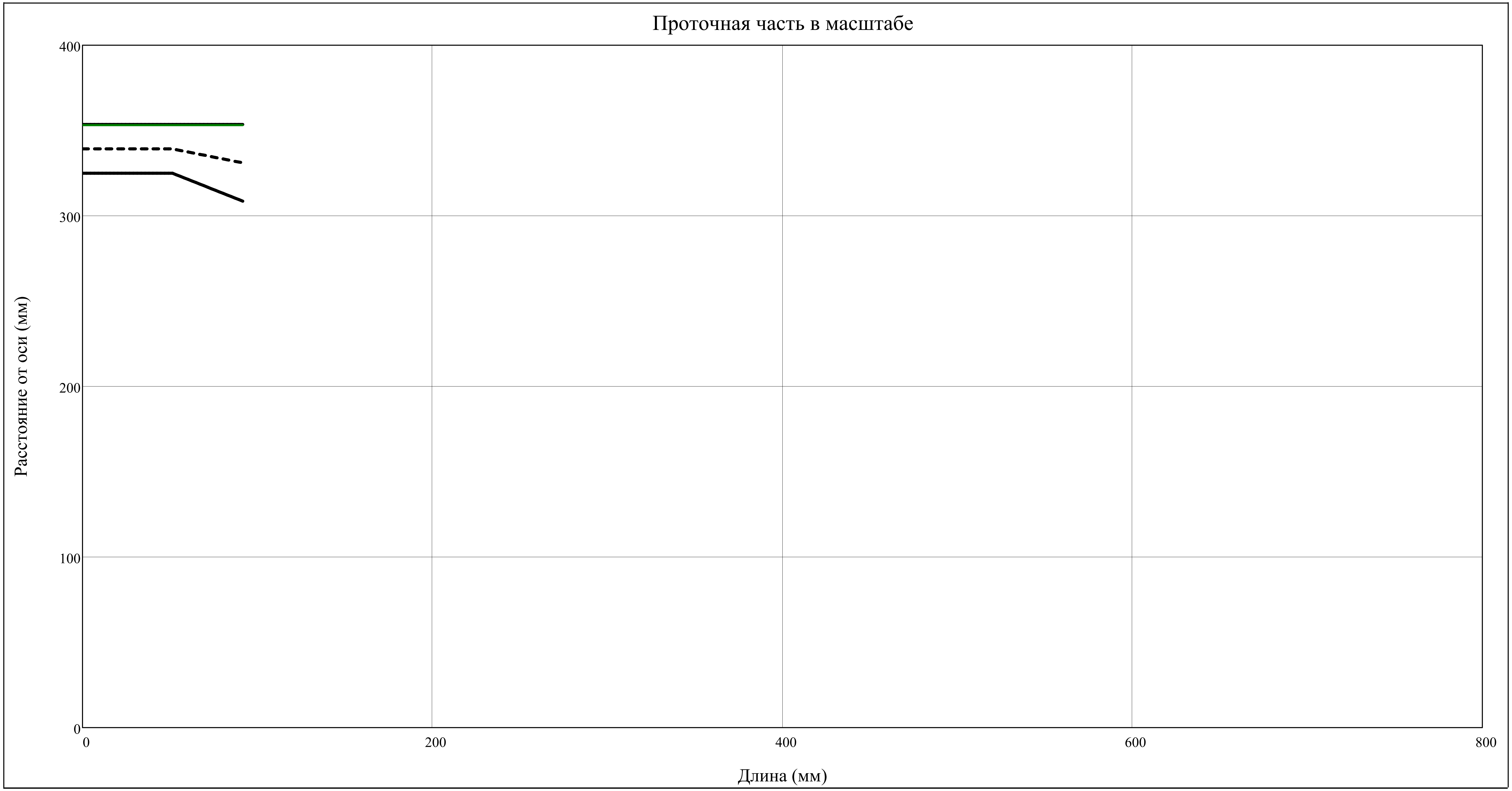
	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧкор}{}^{T} > -15 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

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

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



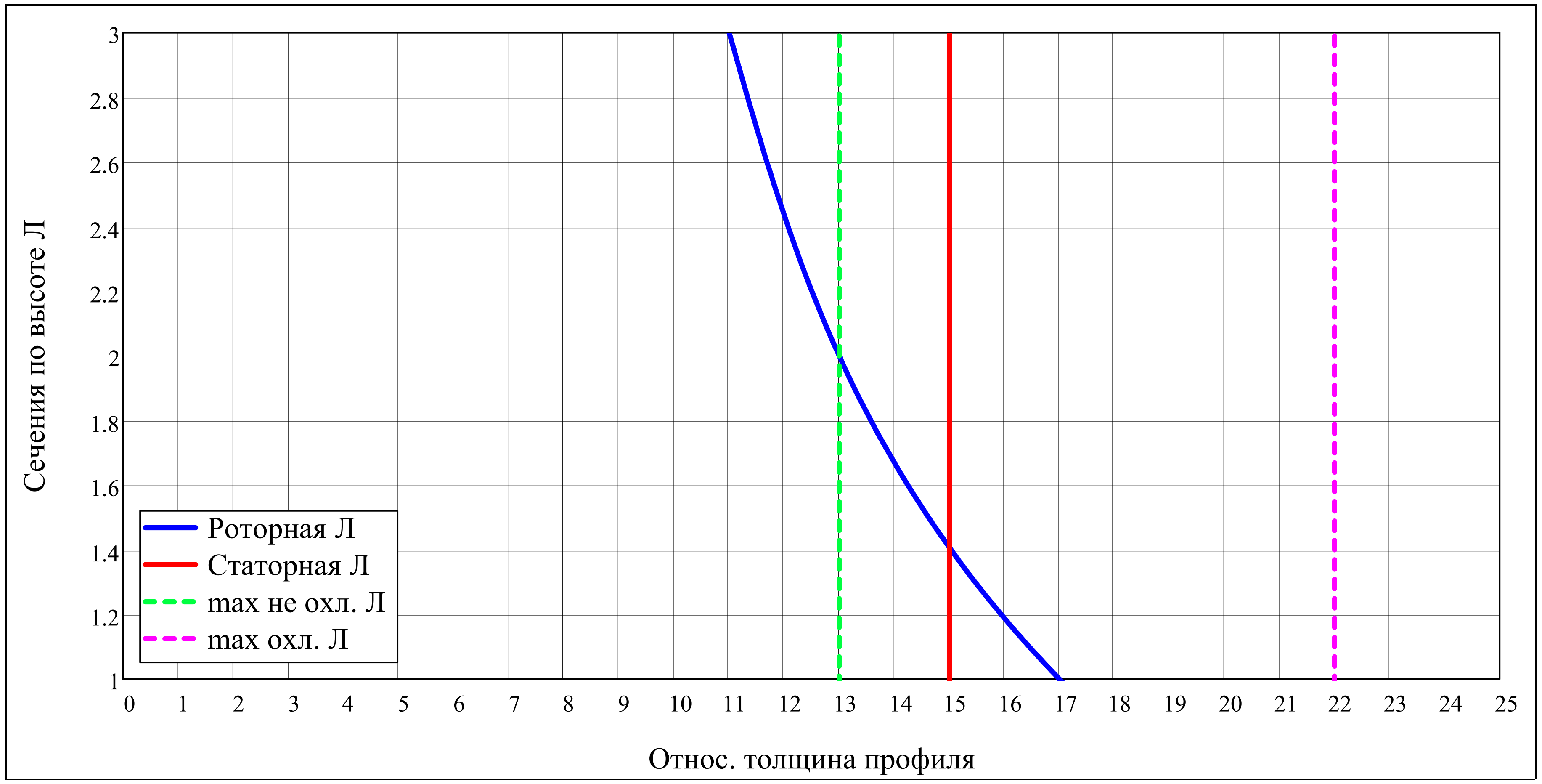
▲ Определение проточной части ОТ

Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

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

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



```
(c̄stator)  = | for i ∈ 1 .. Z
(c̄rotor )    |   for r ∈ 1 .. N_r
             |     (c̄stator_{i,r})   (c̄stator.(r))
             |     (c̄rotor_{i,r} ) = (c̄rotor.(r) )
             | (c̄stator)
             | (c̄rotor )
```

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

	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

$\cdot\%$

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

```
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

$\cdot\%$

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

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

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

	1
1	5.950
2	4.550
3	3.850

$\cdot\%$

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

	1
1	2.550
2	1.950
3	1.650

$\cdot\%$

Относ. толщины и радиусы профилей

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

Поступенчатый расчет ОТ

$$\left(\begin{array}{cc} \text{iteration}_{CA} & \text{iteration}_{РК} \\ k & R_L \\ H^*_{ст} & H_{ст} \\ H_{stator} & H_{rotor} \\ c_{ад} & w_{ад} \\ P^* & P \\ T^* & T \\ G & v \\ \rho^* & \rho \\ \alpha_{ox} & \alpha_{ox} \\ \alpha & \beta \\ \varepsilon_{stator} & \varepsilon_{rotor} \\ \theta_{CA} & \theta_{РК} \\ g_{охлCA} & g_{охлРК} \\ a^*_c & a^*_w \\ T_{ад} & T_{ад} \\ P^*_w & T^*_w \\ a_{зв} & a_{зв} \\ u & u \\ c & c \\ c_a & c_u \\ w & w \\ w_a & w_u \\ \lambda_c & M_c \\ \lambda_w & M_w \\ \upsilon_{stator} & \upsilon_{rotor} \end{array} \right) = \left| \begin{array}{l} r = av(N_r) \\ \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \left| \text{trace(concat("ступень i = ", num2str(i)))} \right. \end{array} \right.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\left(\lambda_{c_{st(i,3),r}}\right. = \left(\frac{c_{st(i,3),r}}{a^*{}_{c_{st(i,3),r}}}\right.$$

```
$\begin{pmatrix} \lambda_{w_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \dfrac{w_{st(i,3),r}}{a^*_{w_{st(i,3),r}}} \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} M_{c_{st(i,3),r}} \\ M_{w_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} = \dfrac{1}{a_{\text{зв}_{st(i,3),r}}} \cdot \begin{pmatrix} c_{st(i,3),r} \\ w_{st(i,3),r} \end{pmatrix}$
$\upsilon_{rotor_i} = \upsilon_{\text{установки}}\left(\beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}\right)$
$chord_{rotor_{i,r}} = \dfrac{B_{\text{РК}_i}}{\sin\left(\upsilon_{rotor_i}\right)}$
$\overline{t}_{\text{оптРК}_i} = \overline{t}_{\text{опт}}\left(\text{"РК"}, g_{\text{охлРК}_i} > 0, \beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}, \max\left(\text{submatrix}\left(\overline{c}_{rotor}, i, i, 1, N_r\right)\right)\right)$
$Z_{rotor_i} =$
    $Z_{rotor_i} = \text{ceil}\left(\dfrac{\pi \cdot \text{mean}\left(D_{st(i,2),r}, D_{st(i,3),r}\right)}{\overline{t}_{\text{оптРК}_i} \cdot chord_{rotor_{i,r}}}\right)$
    while $\gcd\left(Z_{rotor_i}, Z_{stator_i}\right) \neq 1$
        $Z_{rotor_i} = Z_{rotor_i} + 1$
for $r \in 1 .. N_r$
    $t_{rotor_{i,r}} = \dfrac{\pi \cdot \text{mean}\left(D_{st(i,2),r}, D_{st(i,3),r}\right)}{Z_{rotor_i}}$
$\xi_{\text{трРК}_i} = \xi_{\text{трение}}\left(\beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}\right)$
$\xi_{\text{крРК}_i} = \xi_{\text{кромка}}\left(\overline{r\_outlet}_{rotor_{i,r}} \cdot chord_{rotor_{i,r}}, t_{rotor_{i,r}}, \beta_{st(i,3),r}\right)$
$\xi_{\text{ReРК}_i} = \xi_{Re}\left(\dfrac{w_{st(i,3),r} \cdot chord_{rotor_{i,r}}}{\mu_{\text{газ}}\left(T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}\right) \cdot v_{st(i,3),r}}\right)$
$\xi_{\lambda\text{РК}_i} = \xi_{\text{сжимаемость}}\left(\text{"РК"}, \lambda_{w_{st(i,3),r}}\right)$
$\xi_{\text{прРК}_i} = \xi_{\text{трРК}_i} + \xi_{\text{крРК}_i} + \xi_{\text{ReРК}_i} + \xi_{\lambda\text{РК}_i}$
$\xi_{\text{втРК}_i} = \xi_{\text{вторичные}}\left(\xi_{\text{трРК}_i}, t_{rotor_{i,r}}, \beta_{st(i,3),r}, h_{st(i,3)}\right)$
$\xi_{\text{тдРК}_i} = \dfrac{\xi_{\text{ТД}}\left(\text{"РК"}, T^*_{\text{см}_{st(i,3),r}}, T^*_{\text{ад}_{st(i,3),r}}, P_{st(i,3),r}, Cp_{\text{газ}}\left(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right), R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right), G_{st(i,3)}, F_{st(i,3)}, \beta_{st(i,3),r}, u_{st(i,3),r}\right)}{H_{rotor_i}}$
$\xi_{\text{смРК}_i} = \xi_{\text{смешение}}\left(\text{"РК"}, g_{\text{охлРК}_i}\right)$
if $\left|\text{eps}\left(\text{"rel"}, \sqrt{1 - \xi_{\text{смРК}_i} - \xi_{\text{тдРК}_i} - \xi_{\text{втРК}_i} - \xi_{\text{прРК}_i}}, \overline{\upsilon}_{rotor_i}\right)\right| \leq \text{epsilon}$
    $\overline{\upsilon}_{rotor_i} = \sqrt{1 - \xi_{\text{смРК}_i} - \xi_{\text{тдРК}_i} - \xi_{\text{втРК}_i} - \xi_{\text{прРК}_i}}$
    break
```

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$H^*_{ст_i} = Cp_{газ.ср}\left(P_{st(i,1),r}, P_{st(i,3),r}, T_{st(i,1),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)\cdot T^*_{st(i,1),r}\cdot\left[1-\left(\pi^*_{ст_i}\right)^{\frac{}{k_{cp}}}\right]$$

$$\eta^*_{ст_i} = \frac{L_{ст_i}}{H^*_{ст_i}}$$

for $i \in 1..Z$

for $j \in 1..3$

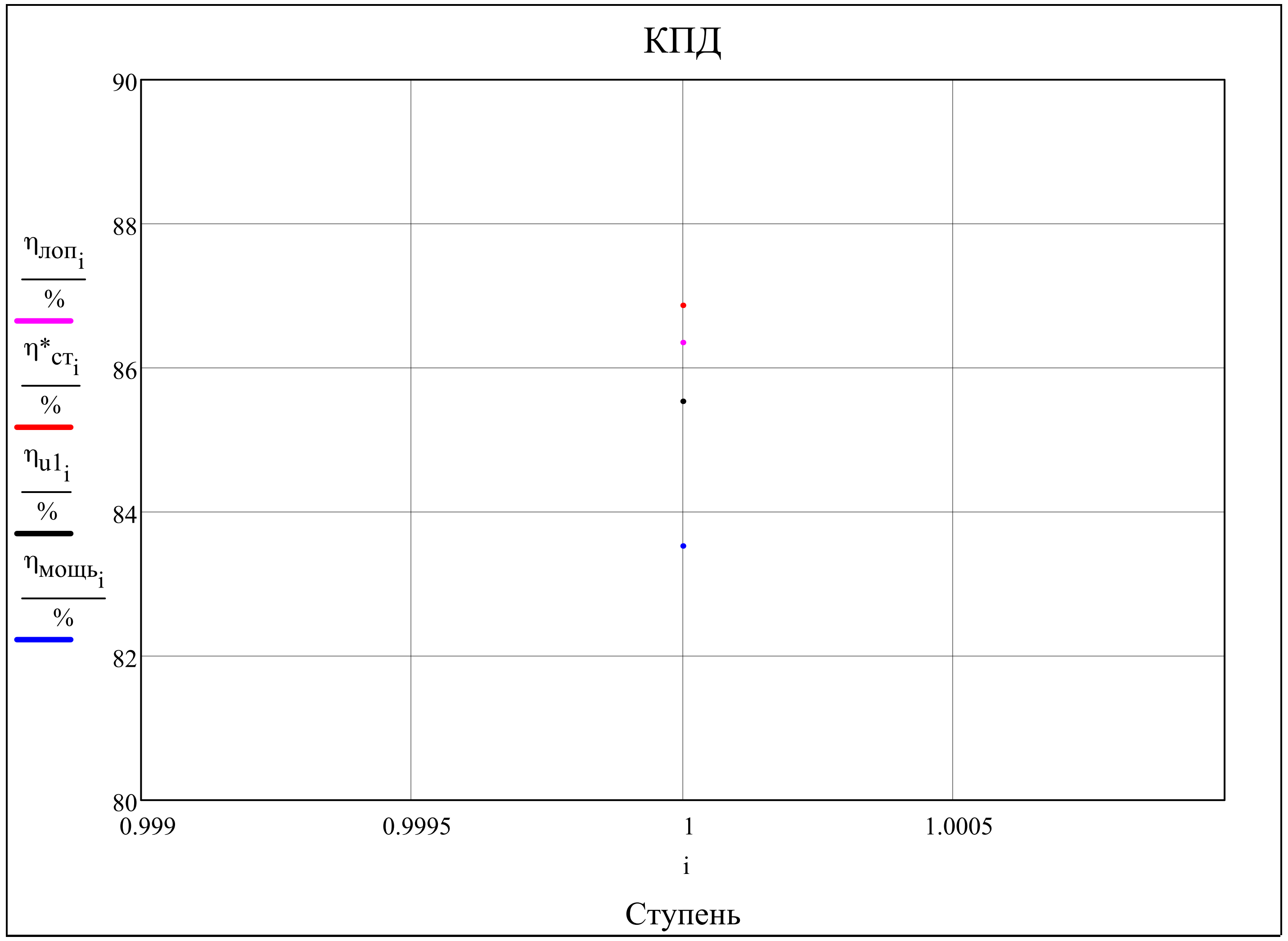
$$\rho^*_{st(i,j),r} = \frac{P^*_{st(i,j),r}}{R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,j)}}, Fuel\right)\cdot T^*_{st(i,j),r}}$$

$$\rho_{st(i,j),r} = \left(v_{st(i,j),r}\right)^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{stator_{i,av(N_r)}} \\ \varepsilon_{rotor_{i,av(N_r)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{st(i,2),av(N_r)} - \alpha_{st(i,1),av(N_r)} \\ \beta_{st(i,3),av(N_r)} - \beta_{st(i,2),av(N_r)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} iteration_{CA} & iteration_{PK} \\ k & R_L \\ H^*_{ст} & H_{ст} \\ H_{stator} & H_{rotor} \\ c_{ад} & w_{ад} \\ P^* & P \\ T^* & T \\ G & v \\ \rho^* & \rho \\ \alpha_{ox} & \alpha_{ox} \\ \alpha & \beta \\ \varepsilon_{stator} & \varepsilon_{rotor} \\ \theta_{CA} & \theta_{PK} \\ g_{охлCA} & g_{охлPK} \\ a^*_c & a^*_w \\ T_{ад} & T_{ад} \\ P^*_w & T^*_w \\ a_{зв} & a_{зв} \\ u & u \\ c & c \\ c_a & c_u \end{pmatrix}$$

Параметры турбины



$\eta_{лоп}^{T} =$

	1
1	86.35

$\cdot\%$

$\eta^{*}{}_{ст}^{T} =$

	1
1	86.87

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\eta_{u1}^{T}, \eta_{u2}^{T}\right) =$

	1
1	85.54
2	86.83

$\cdot\%$

$\eta_{мощь}^{T} =$

	1
1	83.53

$\cdot\%$

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

Степень понижения полного давления Т:
Степень понижения давления Т:

$$\begin{pmatrix}\pi^*_{T} \\ \pi_{T}\end{pmatrix} = P^*_{st(1,1),av(N_r)} \cdot \begin{bmatrix} \left(P^*_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{-1} \\ \left(P_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{-1} \end{bmatrix} =$$

	1
1	3.14
2	3.26

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

$$\begin{pmatrix}H^*_{T} \\ H_{T}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{Z} H^*_{\text{ст}_i} \\ \sum_{i=1}^{Z} H_{\text{ст}_i} \end{pmatrix} =$$

	1
1	516.1
2	536.7

$\cdot 10^{3}$

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

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

Лопаточный КПД Т:

$$\eta_{\text{Tлоп}} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{\text{ст}_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} + \frac{\left(c_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{2}}{2}}{H_T} = 86.4 \cdot \%$$

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

Адиабатный КПД Т: $\eta^*_T = \frac{L_T}{H^*_T} = 86.92 \cdot \%$

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

Мощностной КПД Т:

$$\eta_{\text{Тмощь}} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{\text{ст}_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)}}{H_T} = 83.58 \cdot \%$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$G_{\text{охлCA}_{i}} = g_{\text{охлCA}_{i}} \cdot G_{st(i,1)}$$

$$G_{\text{охлPK}_{i}} = g_{\text{охлPK}_{i}} \cdot G_{st(i,2)}$$

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

$$G_{cooling} = 3.2$$

$$\sum_{i=1}^{Z} G_{\text{охлCA}_{i}} + \sum_{i=1}^{Z} G_{\text{охлCA}_{i}} \le G_{cooling} = 1$$

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

	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						

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

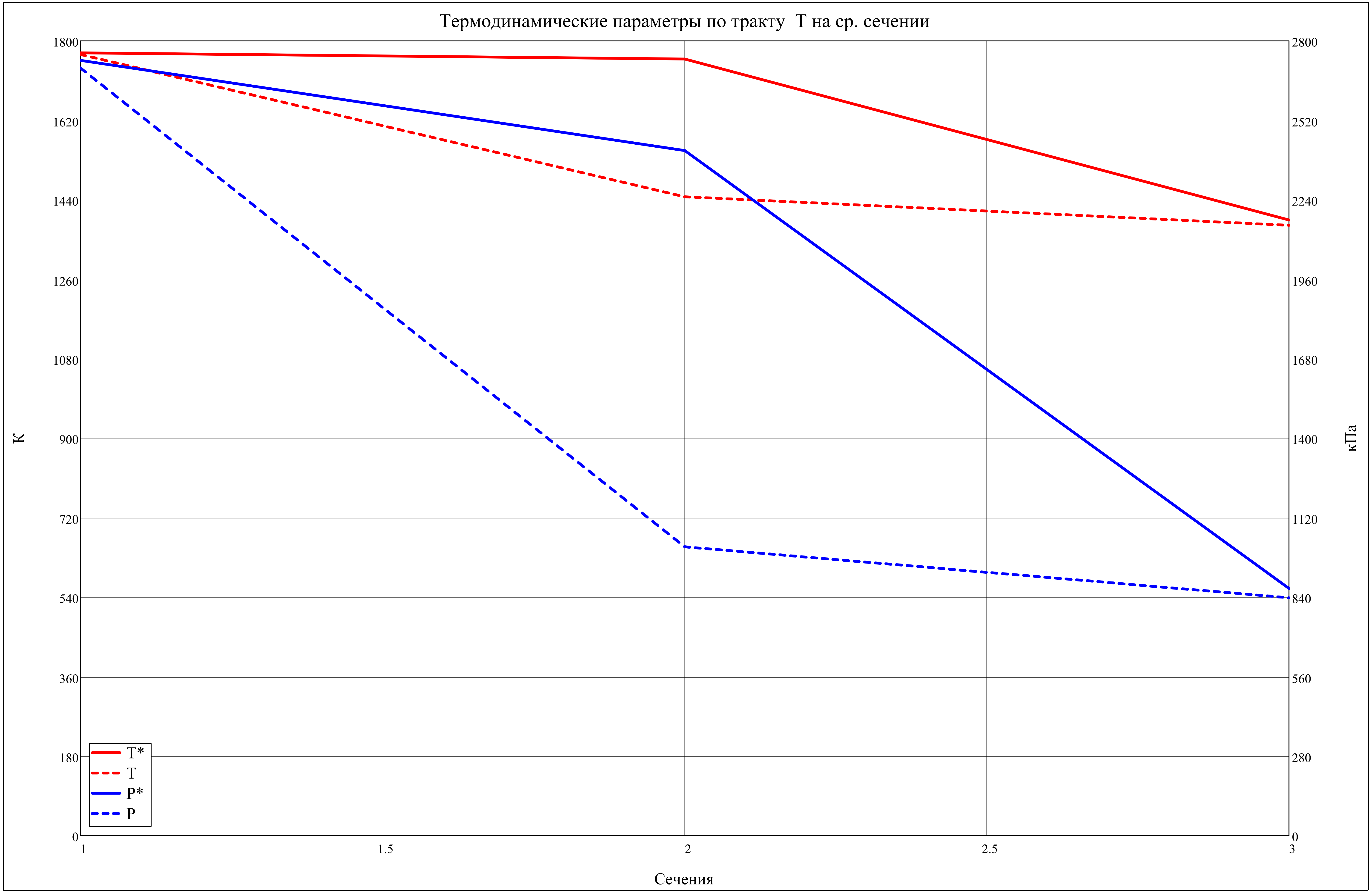
	1	2	3
1	0.189	0.410	0.487

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

	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
К
кПа
1800
1620
1440
1260
1080
900
720
540
360
180
0
2800
2520
2240
1960
1680
1400
1120
840
560
280
0
1
1.5
2
2.5
3
Сечения
T*
T
P*
P

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

	1	2	3
1	809.2	734.6	718.7

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

	1	2	3
1	758.2	756.5	673.8

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

	1	2	3
1	0.0	700.8	698.9

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

	1	2	3
1	100.0	892.5	174.1

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

	1	2	3
1	0.0	864.2	-2.7

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

	1	2	3
1	100.0	223.3	174.0

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

	1	2	3
1	0.0	399.5	545.8

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

	1	2	3
1	0.0	331.3	517.3

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

	1	2	3
1	0.0	223.3	174.0

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

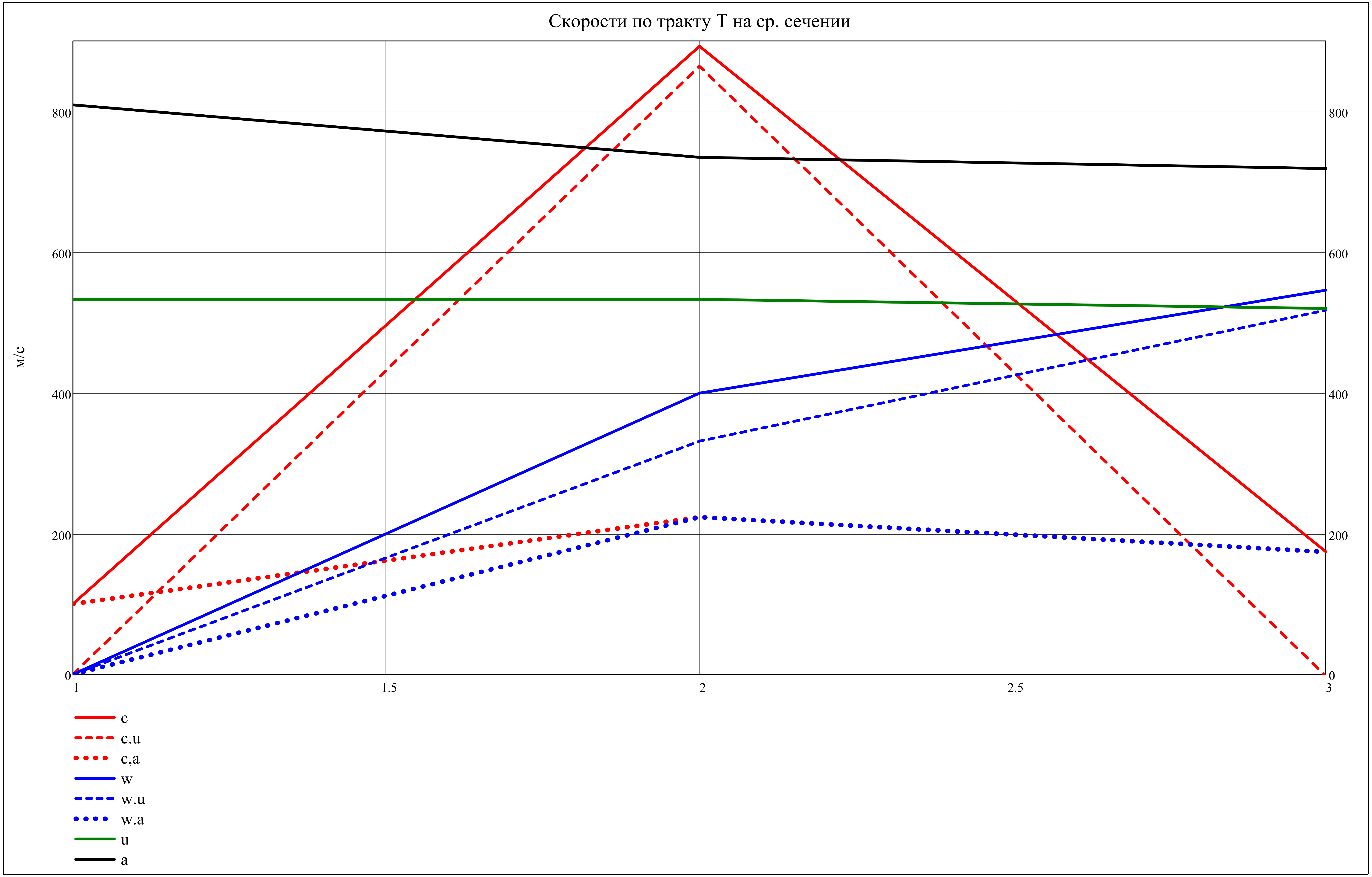
	1	2
1	1036.1	949.6

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

	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
м/с
0
200
400
600
800
1
1.5
2
2.5
3
c
c.u
c,a
w
w.u
w.a
u
a

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

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

$\cdot ^\circ$

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

	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									

$\cdot ^\circ$

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

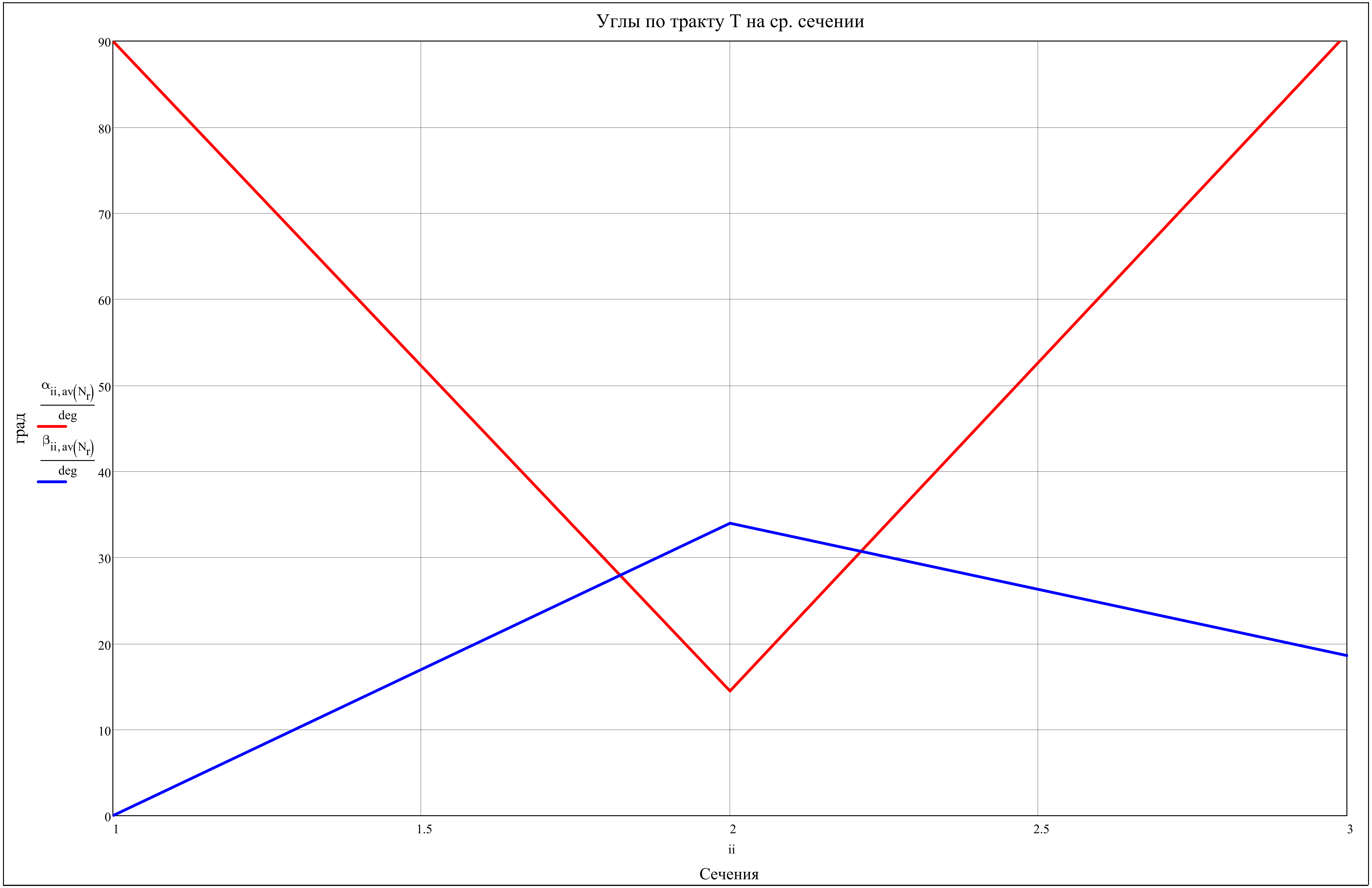
	1	2	3	4	5	6
1	-75.51					

$\cdot ^\circ$

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

	1	2	3	4	5	6
1	-15.39					

$\cdot ^\circ$



Углы по тракту Т на ср. сечении

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

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

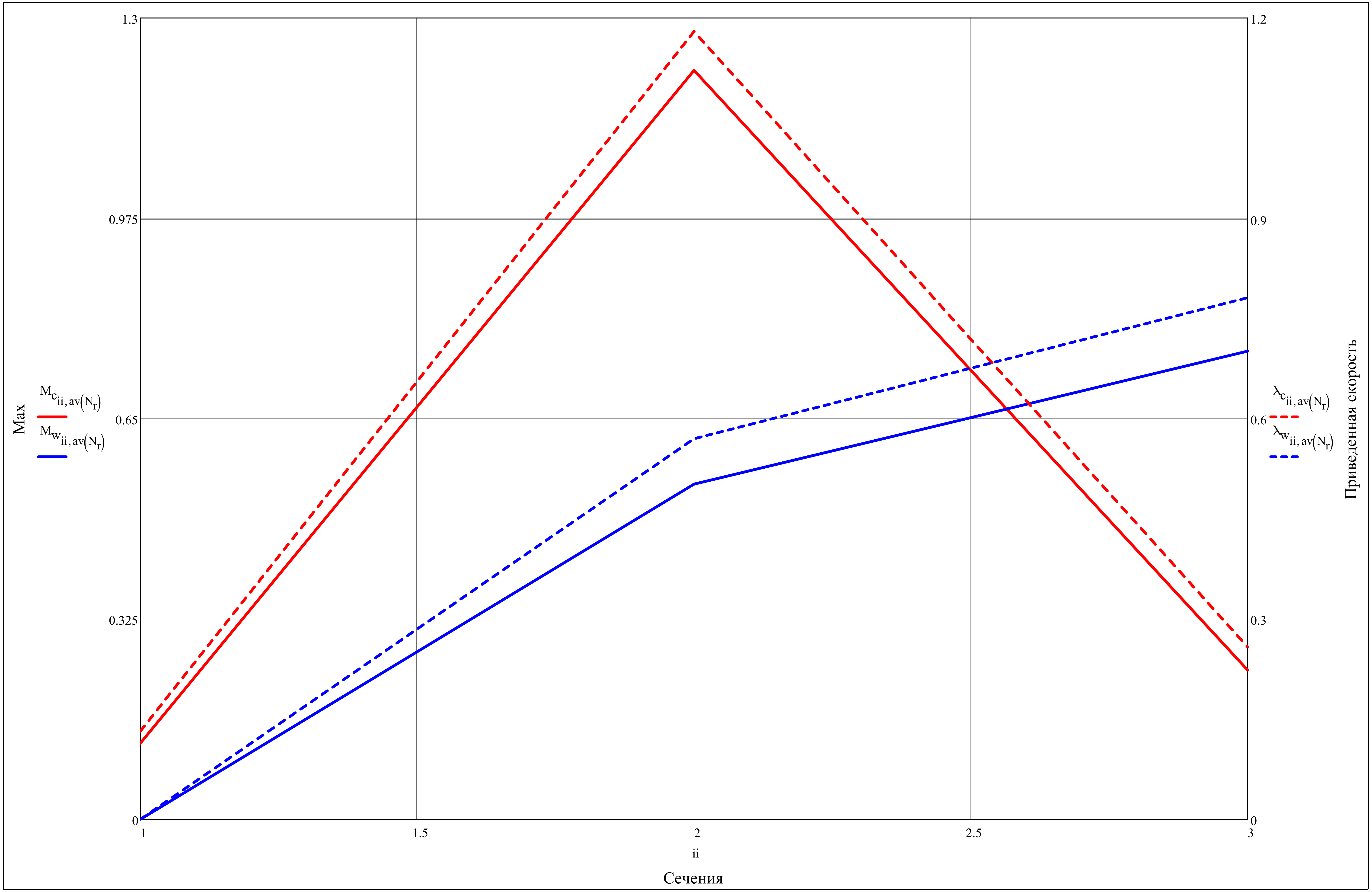
$$\mathrm{submatrix}\left(M_c,1,2Z+1,\mathrm{av}\left(N_r\right),\mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{c|c|c|c} & 1 & 2 & 3\\ \hline 1 & 0.1236 & 1.2150 & 0.2422\end{array}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

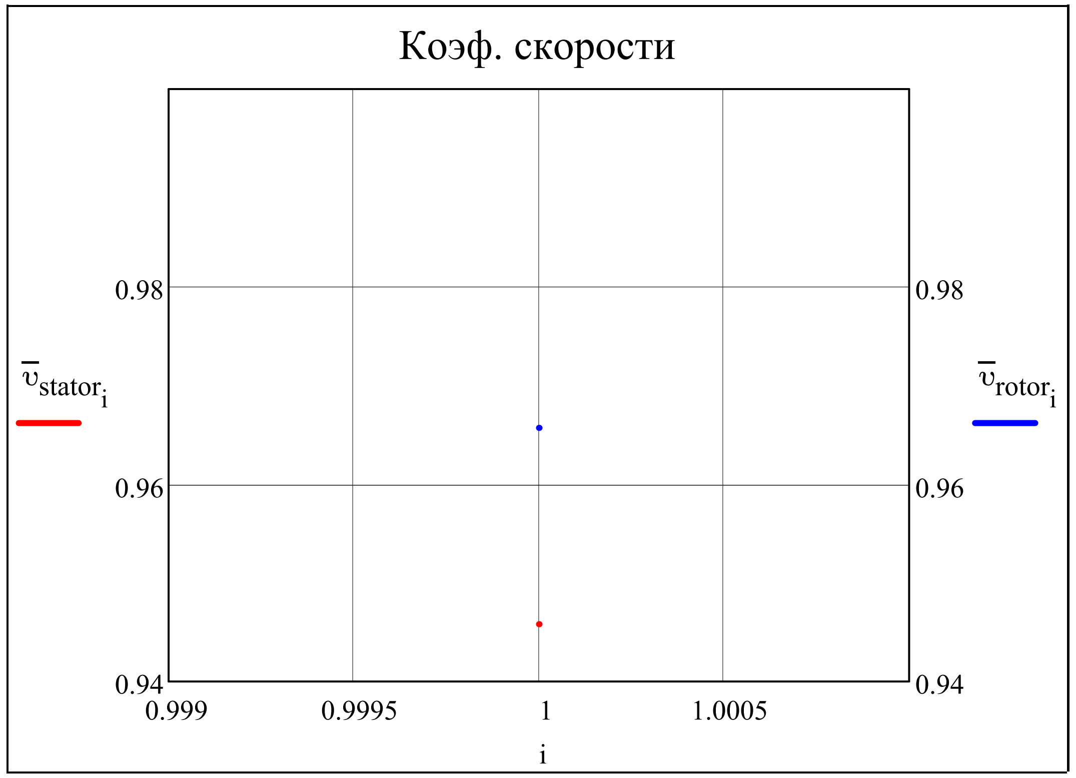
$$\mathrm{stack}\left(\overline{t_{оптСА}}{}^{T}, \overline{t_{оптРК}}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.872 \\ 2 & 0.724 \end{array}$$

$$\frac{t_{stator_{i,av\left(N_r\right)}}}{chord_{stator_{i,av\left(N_r\right)}}} = \boxed{0.871} \qquad 0.7 \le \frac{t_{stator_{i,av\left(N_r\right)}}}{chord_{stator_{i,av\left(N_r\right)}}} \le 1 = \boxed{1}$$

$$\frac{t_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}}{chord_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}} = \boxed{0.724} \qquad 0.7 \le \frac{t_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}}{chord_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}} \le 1 = \boxed{1}$$

$\mathrm{stack}\left(\overline{\upsilon}_{stator}{}^{T}, \overline{\upsilon}_{rotor}{}^{T}\right) =$

	1
1	0.9458
2	0.9657



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

	1
1	1.398
2	2.620

$\cdot\%$

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

	1
1	2.753
2	1.689

$\cdot\%$

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

	1
1	-0.135
2	0.085

$\cdot\%$

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

	1
1	2.434
2	0.024

$\cdot\%$

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

	1
1	1.453
2	0.881

$\cdot\%$

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

	1
1	1.856
2	1.200

$\cdot\%$

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

	1
1	0.784
2	0.248

$\cdot\%$

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

	1
1	8.748
2	2.008

$\cdot\%$

$\xi_{\text{вых}}{}^{T} =$

	1
1	2.822

$\cdot\%$

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

	1
1	2.476

$\cdot\%$

$\xi_{\text{тр.в}}{}^{T} =$

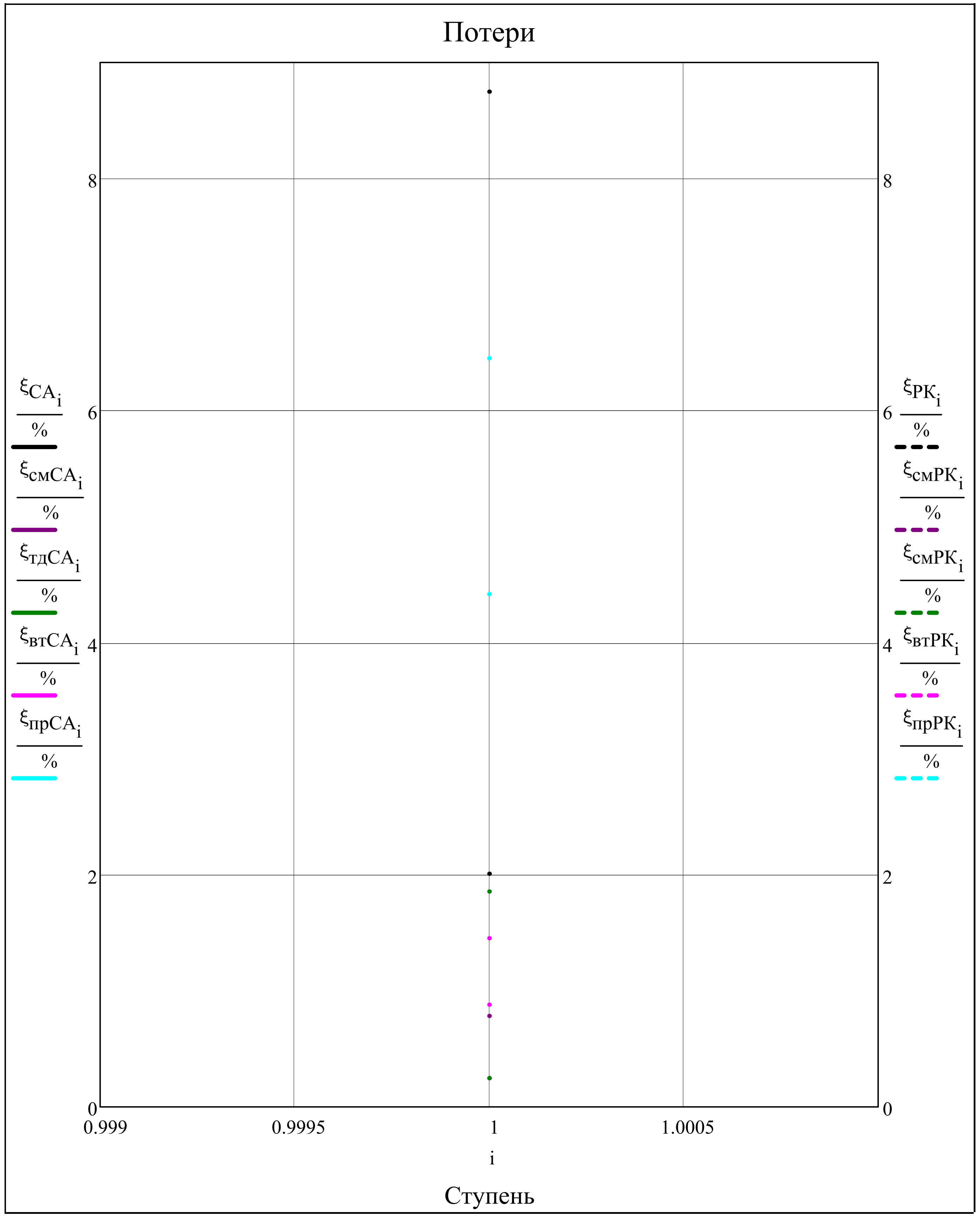
	1
1	0.831

$\cdot\%$

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

	1
1	6.451
2	4.418

$\cdot\%$



▲ Параметры турбины

▼ Выбор закона профилирования Л по высоте

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

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

$m^T =$

	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  $r \in 1..N_r$
      $A_{st(i,a)} = \left(1 - R_{L_{i,av(N_r)}}\right)\cdot\omega\cdot\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{m_i+1}$
      $B_{st(i,a)} = \dfrac{Lu_{ст_i}}{2\cdot\omega}$
      $c_{u_{st(i,a),r}} =$
        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
      $c_{a_{st(i,a),r}} =$
        $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] + 4\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}\cdot \begin{vmatrix} -1 & \text{if } a = 2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{vmatrix}$   if  $m_i = -1$
        $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right) - 2\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\left(\dfrac{1}{R_{st(i,a),r}} - \dfrac{1}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}\cdot \begin{vmatrix} -1 & \text{if } a = 2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{vmatrix}$   if  $m_i = 0$
        if  $m_i = \overline{\upsilon}$   $\cos(\alpha$   $)^2$
```

if $m_i = \upsilon_{stator_i}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)$

$$c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot\sqrt{1+\frac{\left(1-\frac{\bar{\upsilon}_{stator_i}}{m_i}\right)\cdot\left[1-\frac{1}{\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{2\cdot m_i}}\right]}{\tan\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^2}}\quad \text{if } a=2$$

$$\sqrt{\begin{aligned}&\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 \ldots\\
&+\left[1-\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[\left(u_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\cdot\left[1-\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2\right]-2\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot\left[1-\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{1-m_i}\right]\right]\ldots\\
&+\left[1-\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[1-\frac{1}{\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2}\right]\cdot\left(c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}+c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2\ldots\\
&+-2\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}\cdot\left(c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}+c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\right)\cdot\left[1-\frac{2}{m_i+1}\cdot\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[1-\frac{1}{\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{m_i+1}}\right]\ldots\\
&+\left(c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}}\right)^2\cdot\left[1-\frac{\left(\bar{\upsilon}_{stator_i}\right)^2\cdot\left(\bar{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2}{m_i}\right]\cdot\left[1-\frac{1}{\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{2\cdot m_i}}\right]\end{aligned}}\quad \text{otherwise}$$

$$\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2+\frac{A_{st(i,a)}\cdot\left(m_i-1\right)\cdot\left[\begin{aligned}&-A_{st(i,a)}\cdot\left(m_i+1\right)\cdot\left[\frac{1}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{2\cdot m_i}}-\frac{1}{\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{2\cdot m_i}}\right]\ldots\\&+2\cdot B_{st(i,a)}\cdot m_i\cdot\left[\frac{1}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i+1}}-\frac{1}{\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{m_i+1}}\right]\end{aligned}\right]\cdot\begin{cases}-1 & \text{if } a=2\\ 1 & \text{otherwise}\end{cases}}{m_i\cdot\left(m_i+1\right)}}\quad \text{otherwise}$$

for $i \in 1\,..\,2\cdot Z+1$

for $r \in 1\,..\,N_r$

$$\begin{pmatrix}c_{u_{i,r}}\\ c_{a_{i,r}}\end{pmatrix} = c_{i,av(N_r)}\cdot\begin{pmatrix}\cos\left(\alpha_{i,av(N_r)}\right)\\ \sin\left(\alpha_{i,av(N_r)}\right)\end{pmatrix}\quad \text{if } (i=1)$$

$$P^*_{i,r} = P^*_{i,av(N_r)}$$

$$T^*_{i,r} = T^*_{i,av(N_r)}$$

$$\rho^*_{i,r} = \frac{P^*_{i,r}}{R_{газ}\left(\alpha_{ox_i},Fuel\right)\cdot T^*_{i,r}}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $i \in 1 .. Z$

for $r \in 1 .. N_r$

$$\begin{pmatrix} \Delta c_{a} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c_{a} - c_{a} \end{pmatrix}$$

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

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

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

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

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

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

$\cdot 10^3$

$P^T =$

	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	1773.0	1759.0	1394.2						
2	1773.0	1759.0	1394.2						
3	1773.0	1759.0	1394.2						

$T^T =$

	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						

$T*_w{}^T =$

	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

$\rho^T =$

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

$k^T =$

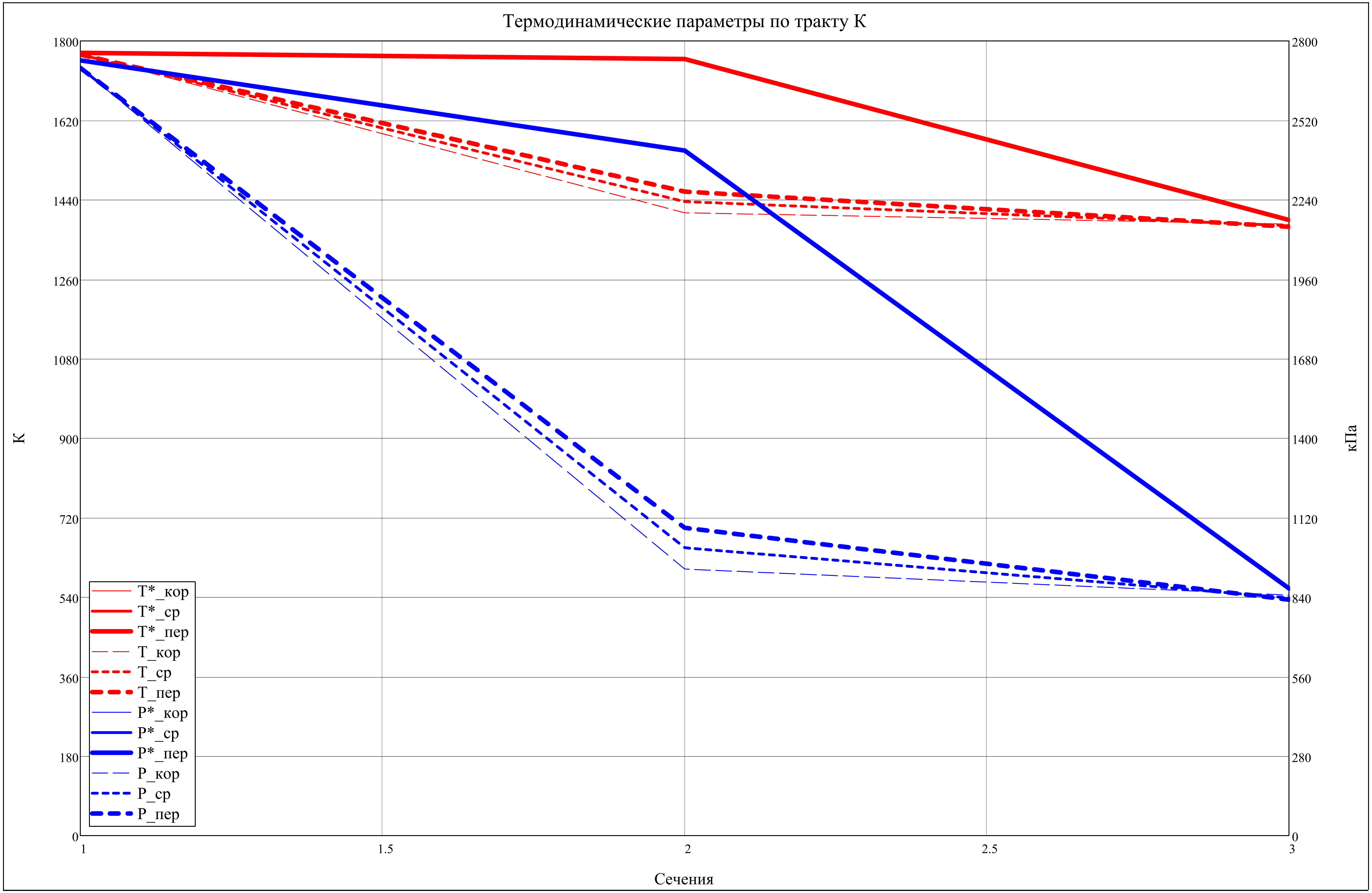
	1	2	3
1	1.305	1.305	1.316
2	1.305	1.305	1.316
3	1.305	1.305	1.316

$R_L{}^T =$

	1
1	0.0998
2	0.1767
3	0.2440

$R_L{}^T \geq 0.05 =$

	1
1	1
2	1
3	1


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

$a^*{}_c{}^T =$

	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

$w^T =$

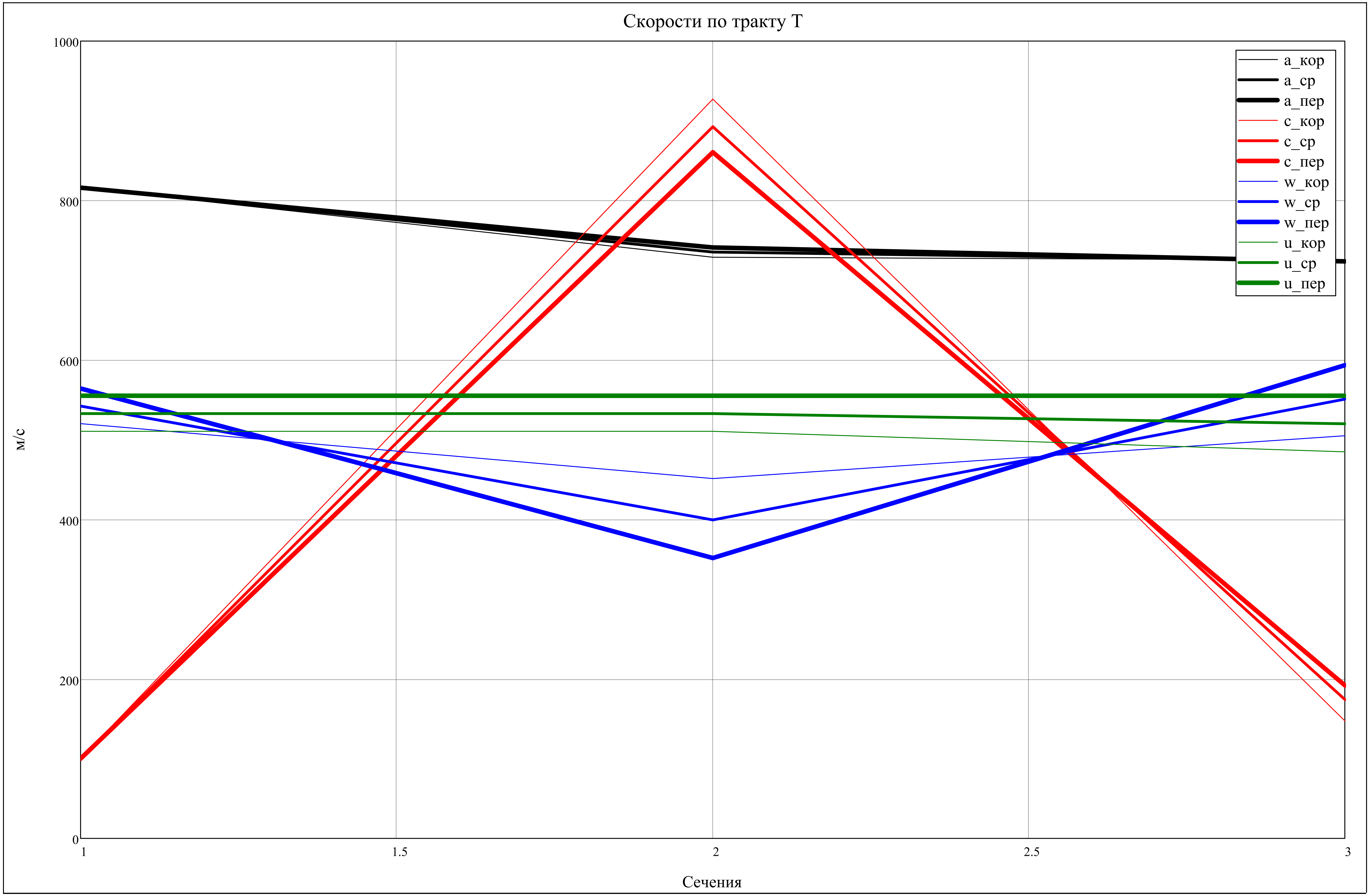
	1	2	3
1	520.2	451.4	504.9
2	542.2	399.5	550.9
3	564.2	351.6	593.4

$w_u{}^T =$

	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

$$\alpha^T = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 90.00 & 14.49 & 89.31 \\ 2 & 90.00 & 14.49 & 90.87 \\ 3 & 90.00 & 14.49 & 91.90 \end{array} \cdot {}^\circ$$

$$\beta^T = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 11.08 & 149.08 & 16.96 \\ 2 & 10.63 & 146.02 & 18.42 \\ 3 & 10.21 & 142.24 & 18.85 \end{array} \cdot {}^\circ$$

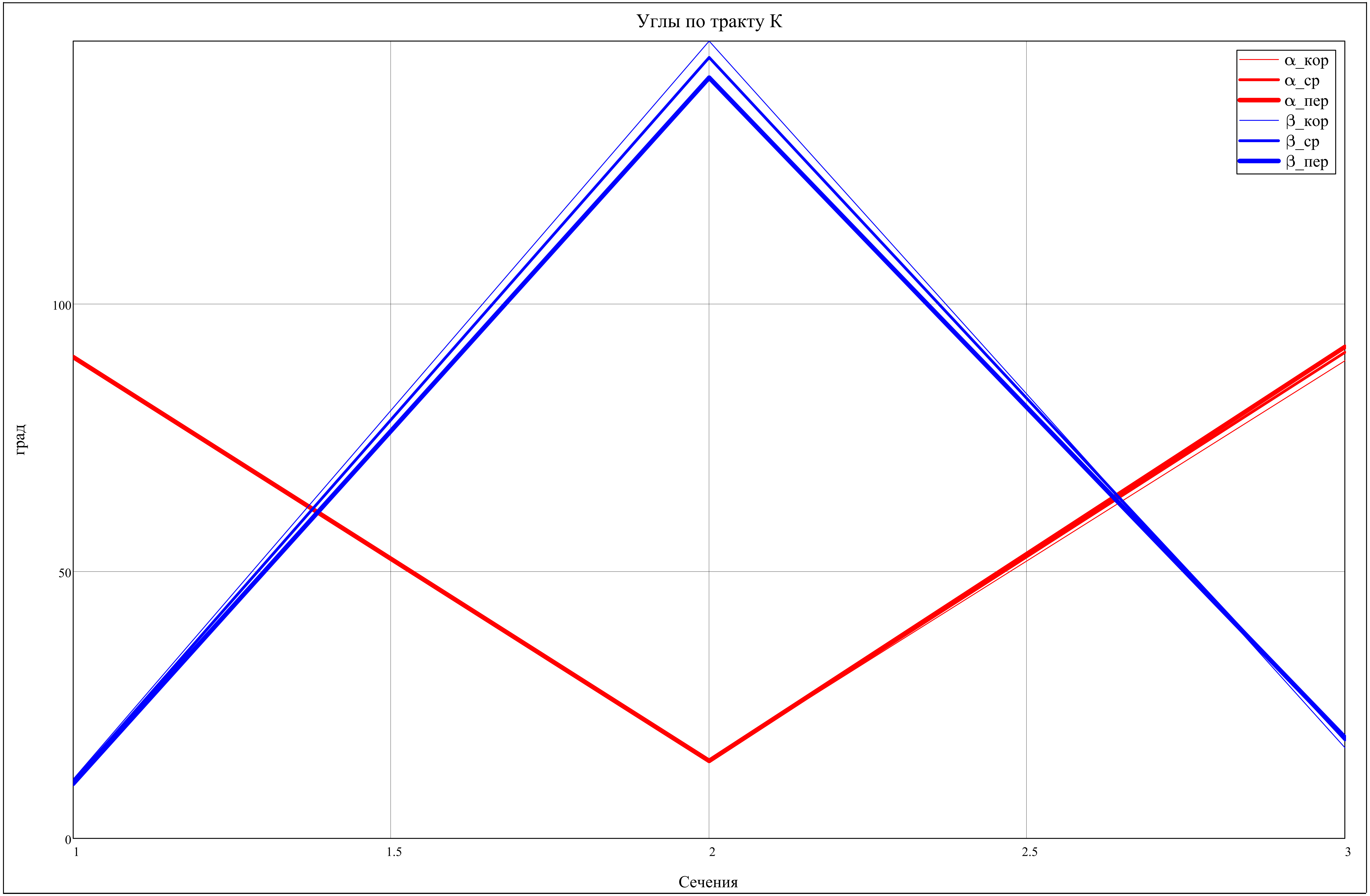
$$80 \cdot {}^\circ \le \alpha^T = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 1 & 0 & 1 \end{array}$$

[1, c.78]

Угол поворота потока:

$$\varepsilon_{stator}{}^T = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 75.51 \\ 2 & 75.51 \\ 3 & 75.51 \end{array} \cdot {}^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor}{}^T = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 132.12 \\ 2 & 127.61 \\ 3 & 123.40 \end{array} \cdot {}^\circ$$


Углы по тракту К
α_кор
α_ср
α_пер
β_кор
β_ср
β_пер
град
0
50
100
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

$M_c^T =$

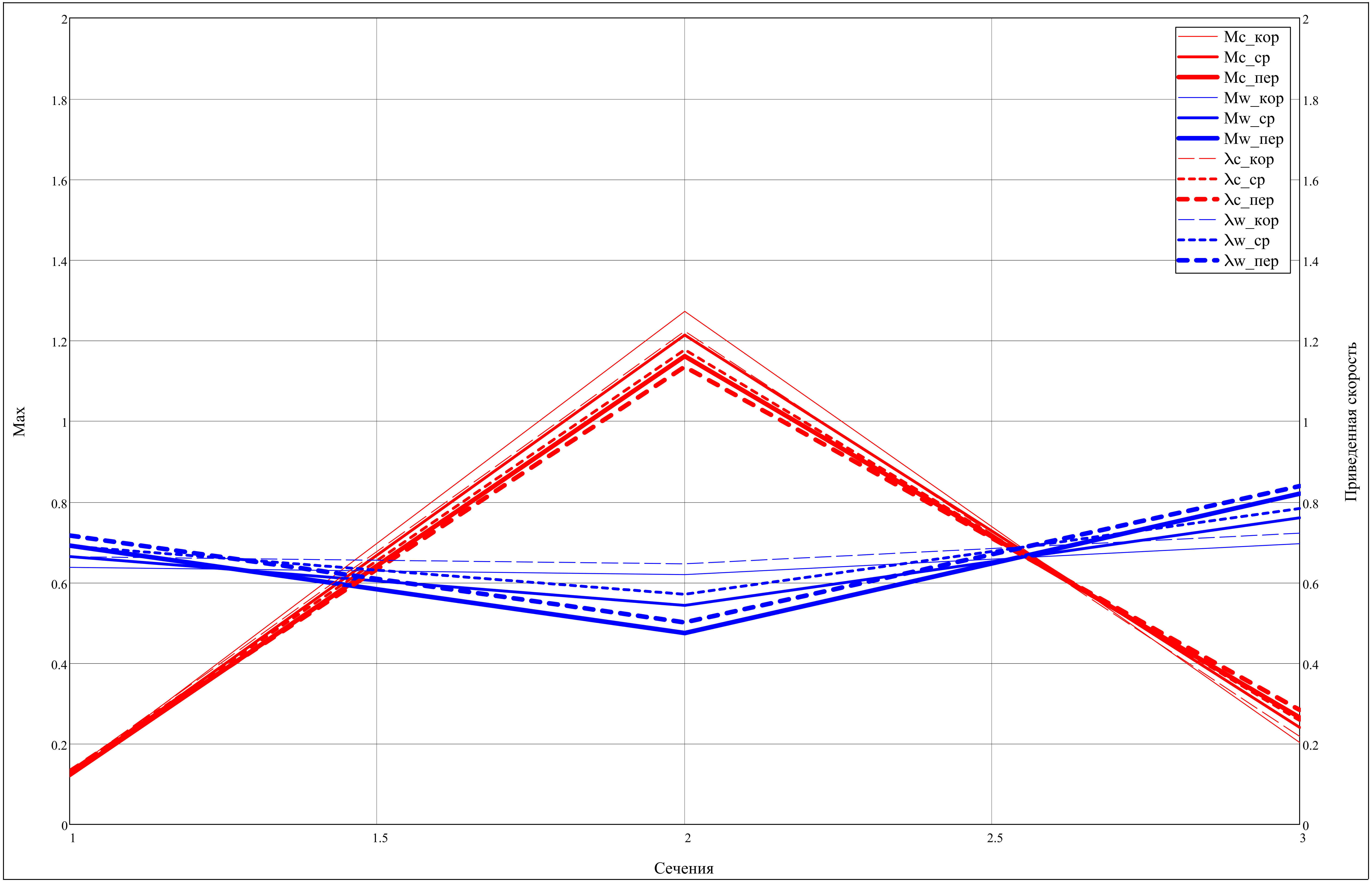
	1	2	3
1	0.123	1.272	0.203
2	0.123	1.214	0.240
3	0.123	1.161	0.265

$\lambda_w^T =$

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

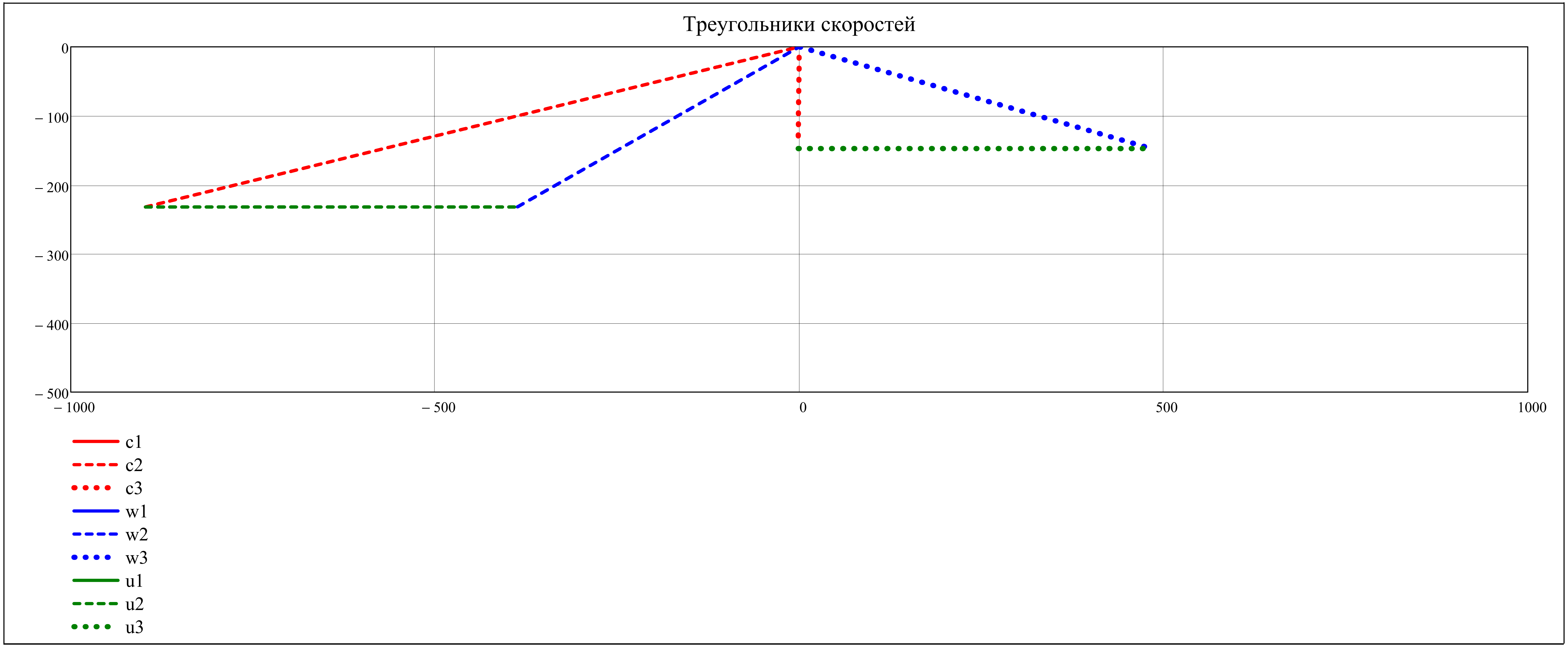
$M_w^T =$

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

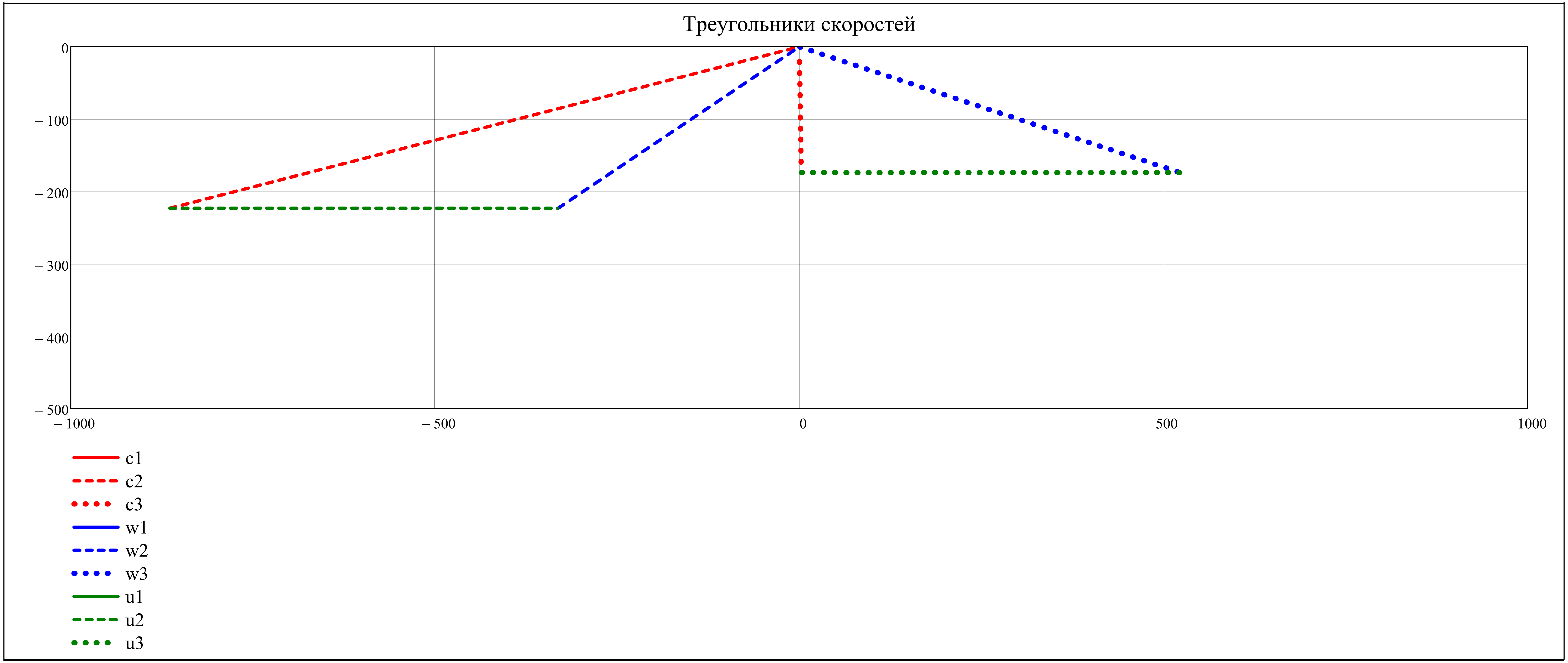


Результаты расчета Л по высоте

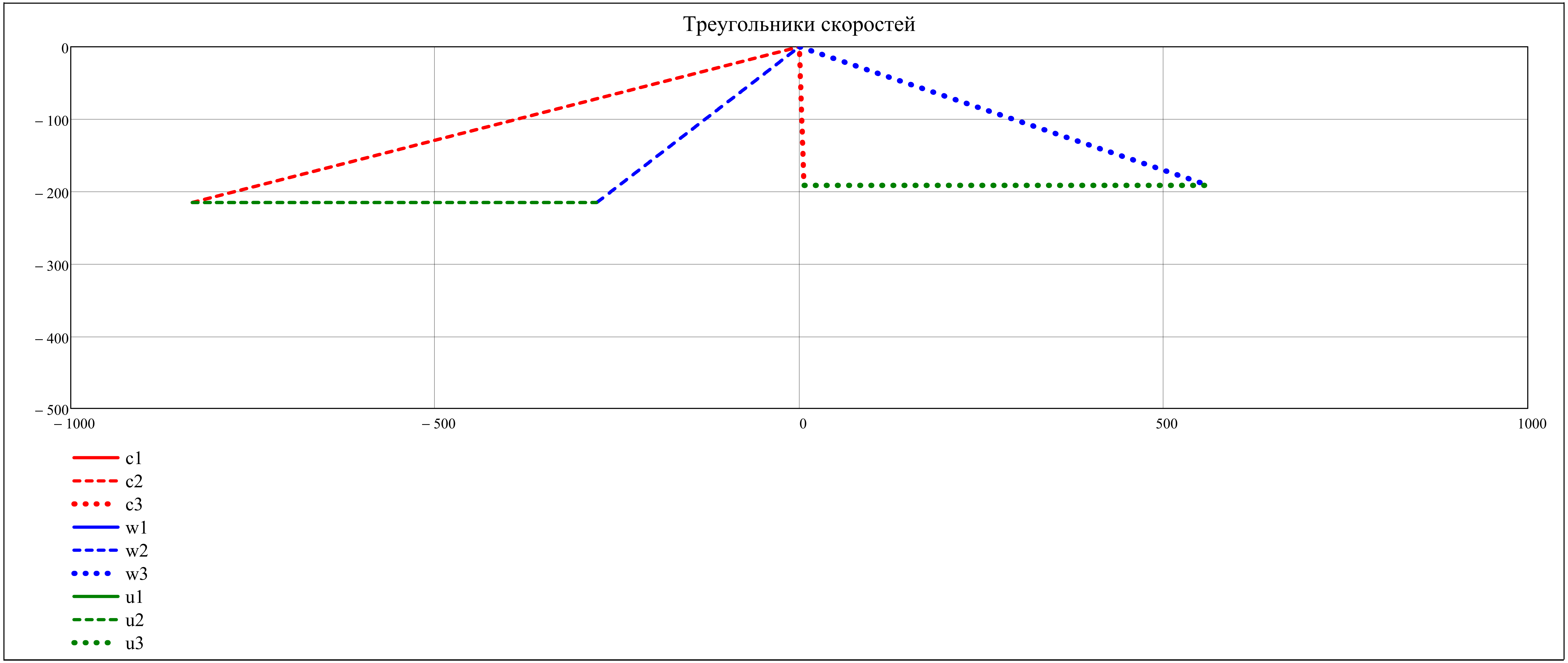
$r = 1$


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

Длины хорд РК и СА (м):

$chord_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 68.0 \\ 2 & 68.0 \\ 3 & 68.0 \end{array} \cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 38.4 \\ 2 & 34.2 \\ 3 & 31.4 \end{array} \cdot 10^{-3}$

Расчет хорд Л по парусности

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

$\overline{x}_f = 0.45$

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

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

$\dfrac{\pi}{2}$ 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]:

$$chord_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 68.0 \\ 2 & 68.0 \\ 3 & 68.0 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$chord_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 38.4 \\ 2 & 34.2 \\ 3 & 31.4 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Радиусы профилей:

$$r\_inlet_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 4.08 \\ 2 & 4.08 \\ 3 & 4.08 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$r\_inlet_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 2.28 \\ 2 & 1.56 \\ 3 & 1.21 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$r\_outlet_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 2.04 \\ 2 & 2.04 \\ 3 & 2.04 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$r\_outlet_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.98 \\ 2 & 0.67 \\ 3 & 0.52 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Толщина профиля [м]:

$$c_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 10.20 \\ 2 & 10.20 \\ 3 & 10.20 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$c_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 6.52 \\ 2 & 4.45 \\ 3 & 3.46 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Шаг решетки [м]:

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

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

Угол поворота потока:

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

	1
1	75.51
2	75.51
3	75.51

$\cdot ^\circ$

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

	1
1	132.12
2	127.61
3	123.40

$\cdot ^\circ$

Угол установки профиля:

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

	1
1	117.3
2	117.3
3	117.3

$\cdot ^\circ$

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

	1
1	112.0
2	114.0
3	115.4

$\cdot ^\circ$

Угол изгиба профиля:

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

	1
1	104.5
2	104.5
3	104.5

$\cdot ^\circ$

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

	1
1	47.9
2	52.4
3	56.6

$\cdot ^\circ$

▲ Результаты расчета параметров решеток

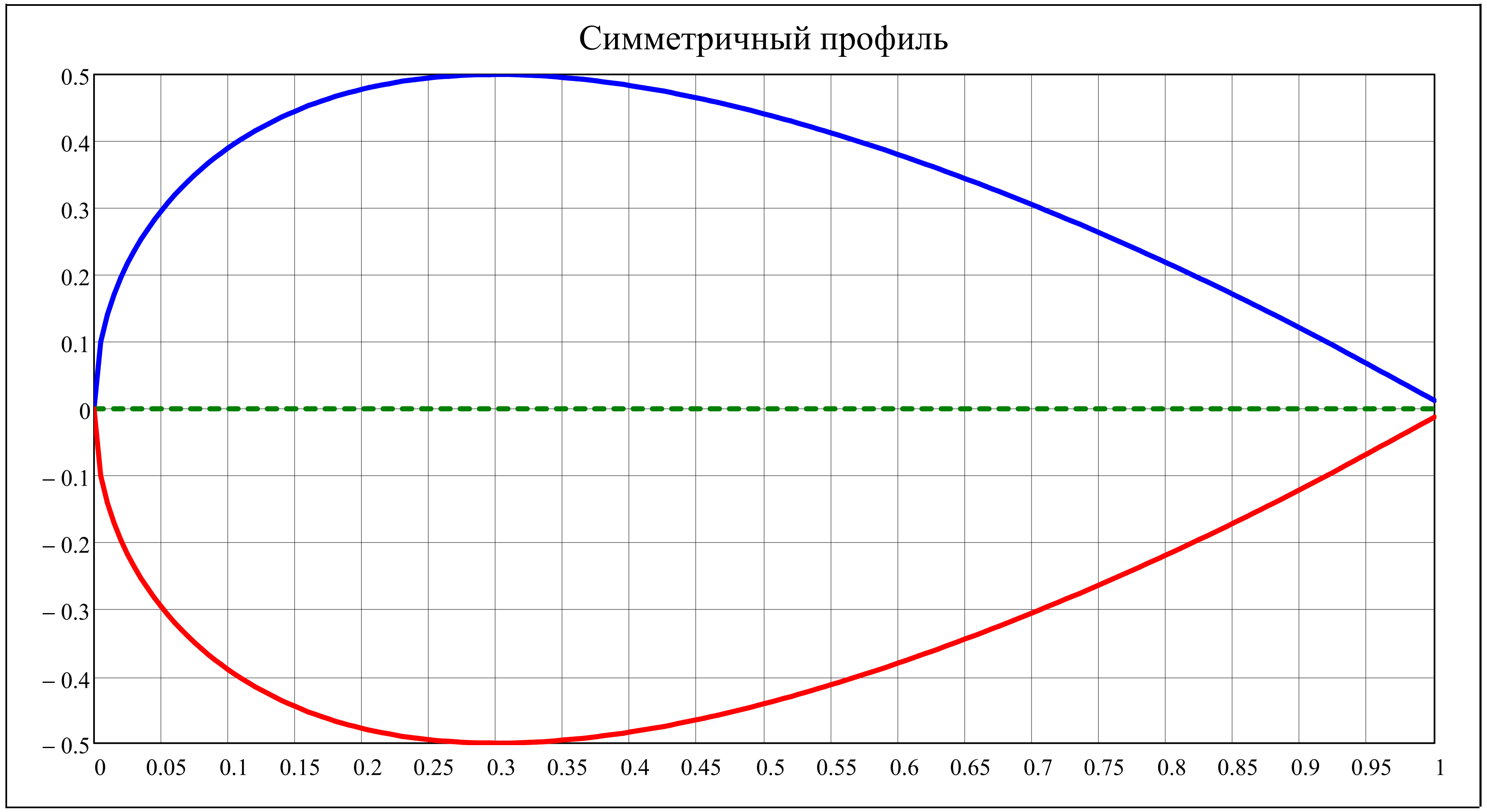
Подключение симметричного профиля

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

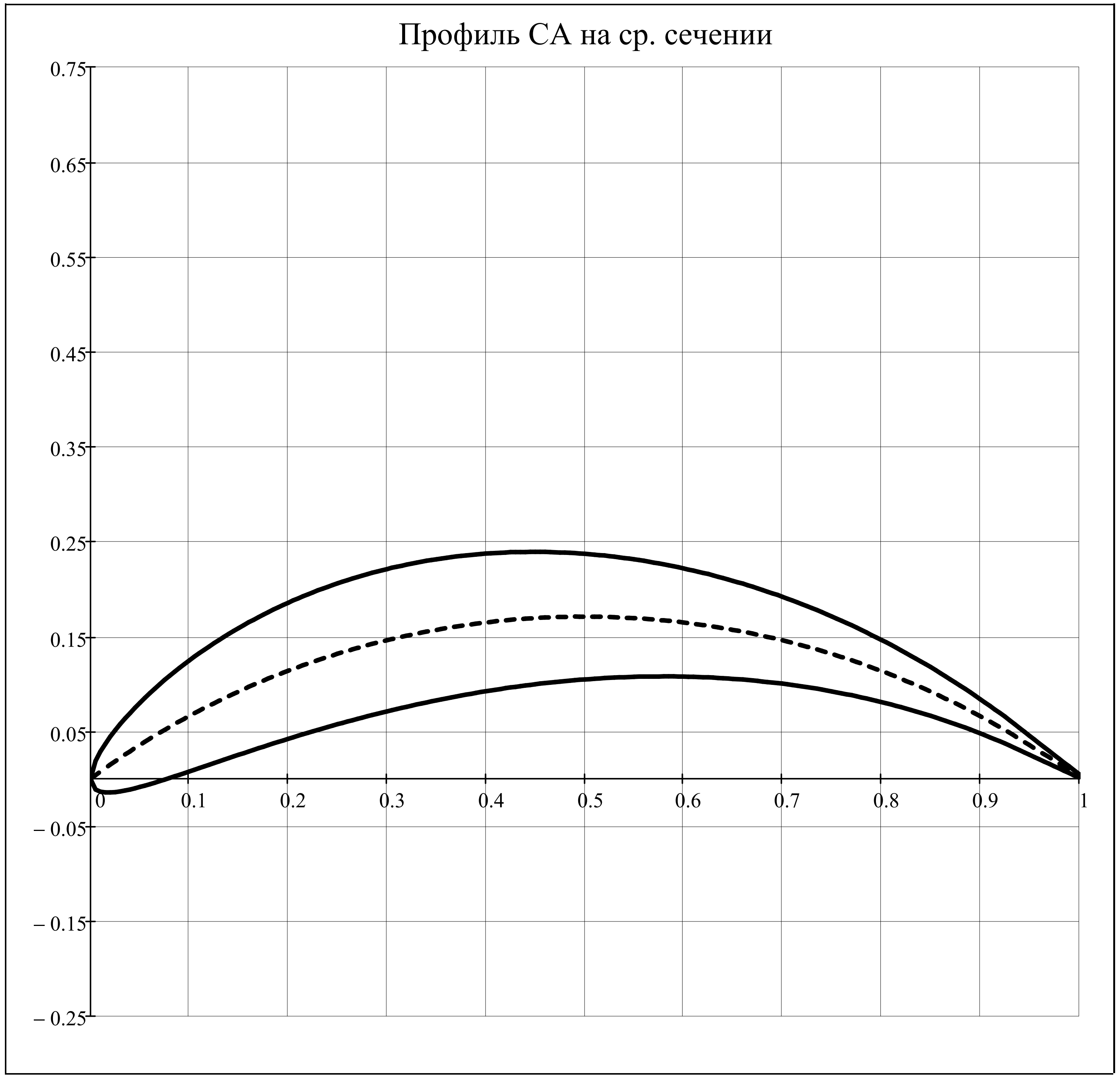
Относ. координаты профиля РК и СА:

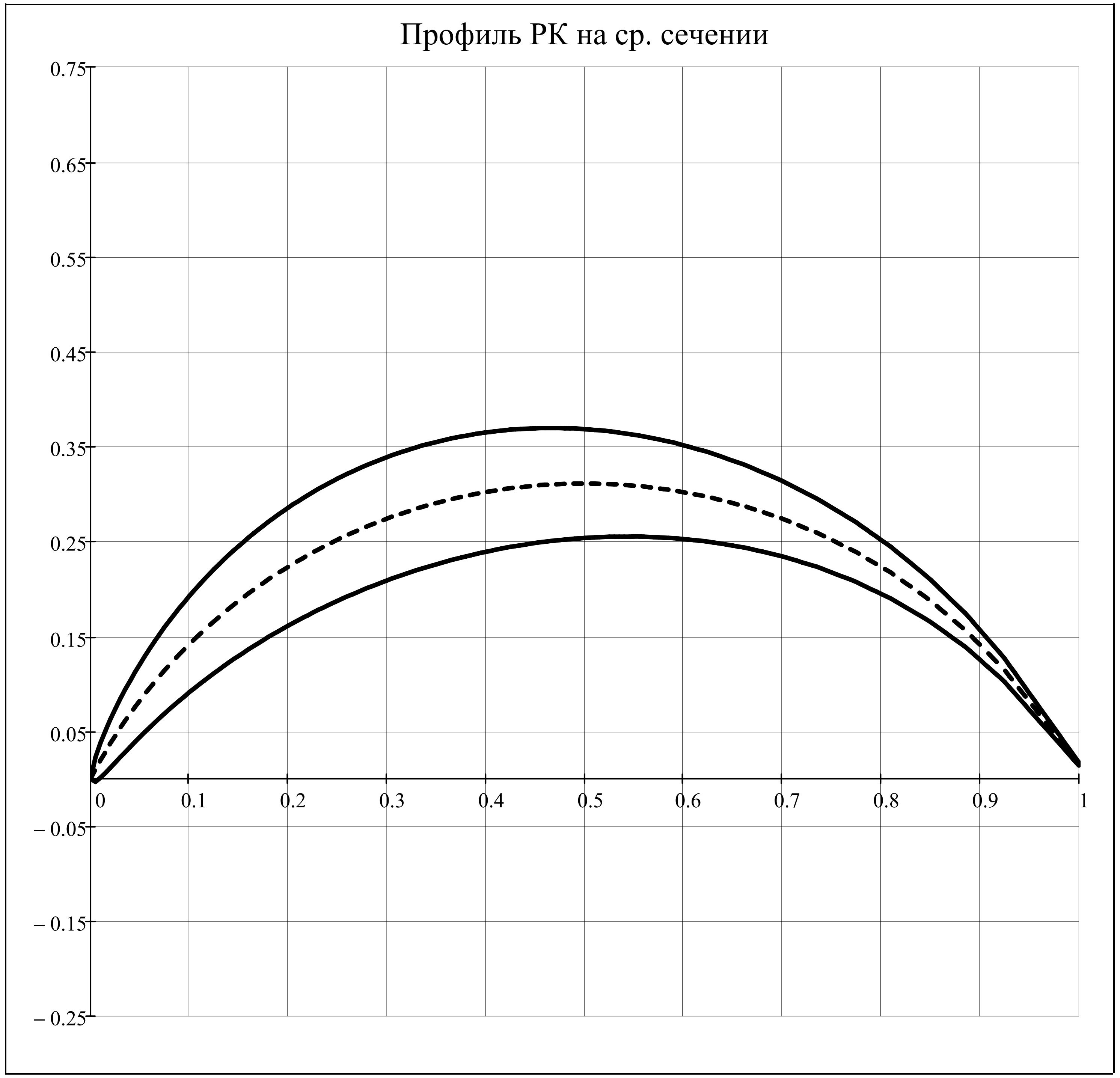
$$\mathrm{AIRFOIL}_0\left(x, line, \overline{f}, \overline{x}_f, \overline{c}\right) = \left|\begin{array}{l} \text{if } 0 \le x \le 1 \\ \quad \left|\begin{array}{ll} \mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) & \text{if } line = \text{"+"} \\ \dfrac{\mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) + \mathrm{linterp}\left(X_L, Y_L, x\right)}{2} & \text{if } line = \text{"0"} \\ \mathrm{linterp}\left(X_L, Y_L, x\right) & \text{if } line = \text{"-"} \end{array}\right. \\ \mathrm{NaN} \quad \text{otherwise} \end{array}\right.$$

$x = 0, 0.005 .. 1$



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





Подключение симметричного профиля

Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

$l\_upper_{stator}{}^{T} =$

	1
1	78.07
2	78.07
3	78.07

$\cdot 10^{-3}$

$l\_lower_{stator}{}^{T} =$

	1
1	70.64
2	70.64
3	70.64

$\cdot 10^{-3}$

$area_{stator}{}^{T} =$

	1
1	473.87
2	473.87
3	473.87

$\cdot 10^{-6}$

$Sx_{stator}{}^{T} =$

	1
1	4232.2
2	4232.2
3	4232.2

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{stator}{}^{T} =$

	1
1	13563.5
2	13563.5
3	13563.5

$\cdot 10^{-9}$

$x0_{stator}{}^{T} =$

	1
1	28.6
2	28.6
3	28.6

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{stator}{}^{T} =$

	1
1	8.9
2	8.9
3	8.9

$\cdot 10^{-3}$

$l\_upper_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	52.01
2	44.78
3	40.21

$\cdot 10^{-3}$

$l\_lower_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	44.26
2	39.55
3	36.21

$\cdot 10^{-3}$

$area_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	171.14
2	103.96
3	74.28

$\cdot 10^{-6}$

$Sx_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	1711.6
2	883.3
3	554.2

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	2765.3
2	1497.1
3	983.0

$\cdot 10^{-9}$

$x0_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	16.2
2	14.4
3	13.2

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	10.0
2	8.5
3	7.5

$\cdot 10^{-3}$

$Jx_{stator}{}^{T} =$

	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

$\cdot {}^{\circ}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

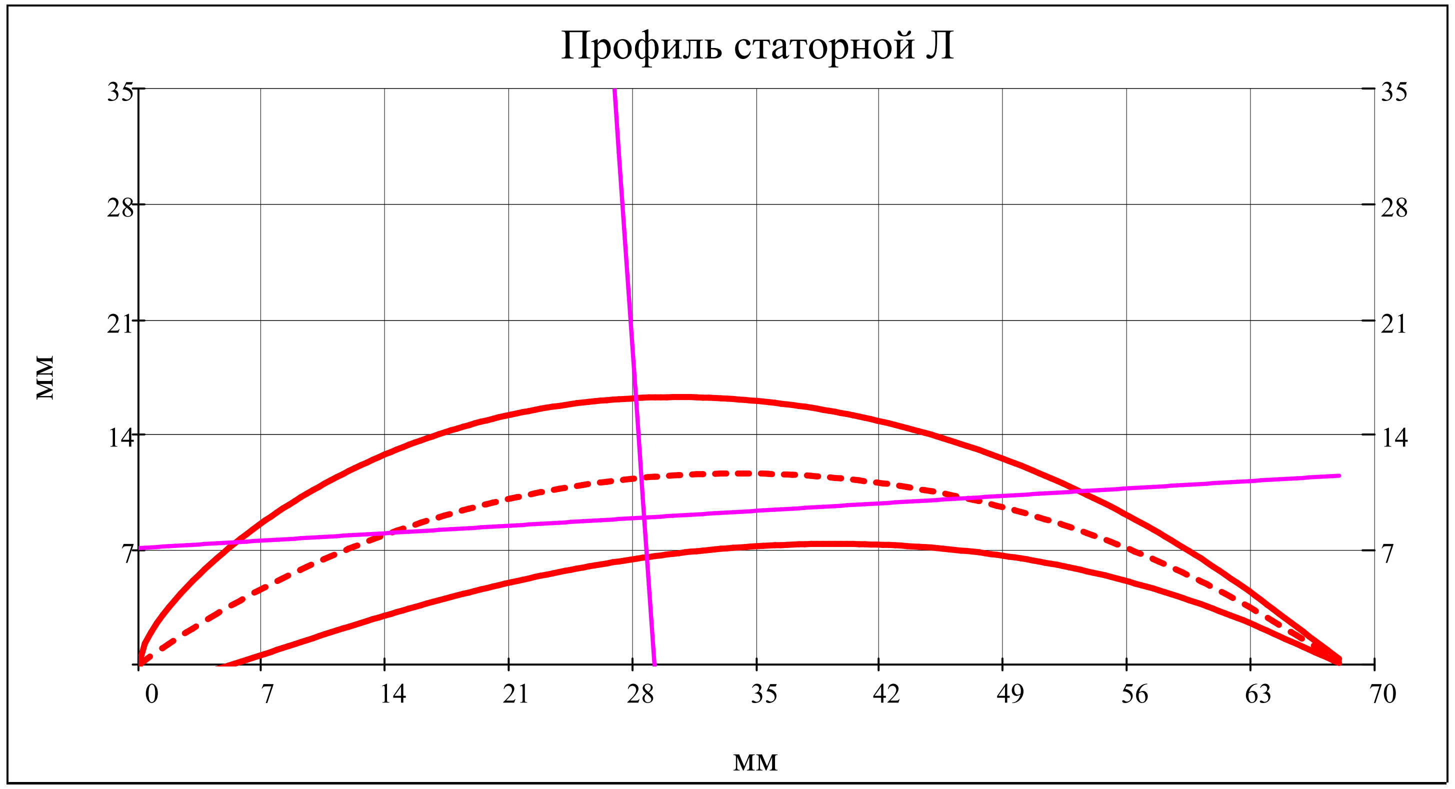
$$CPx_{rotor}^{\,T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 13.430 \\ \hline 2 & 11.969 \\ \hline 3 & 10.999 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

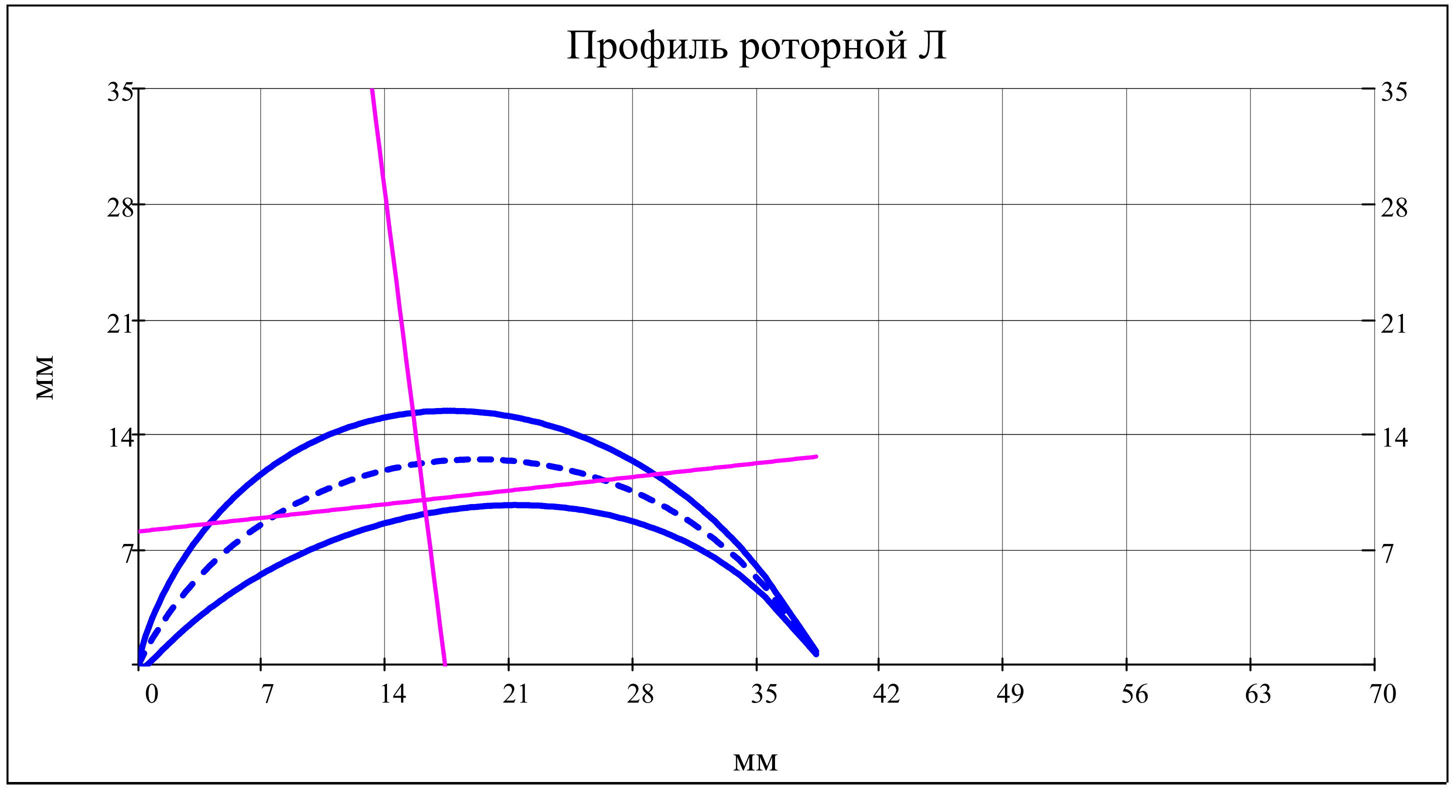
$$CPy_{stator}^{\,T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 0.0000 \\ \hline 2 & 0.0000 \\ \hline 3 & 0.0000 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

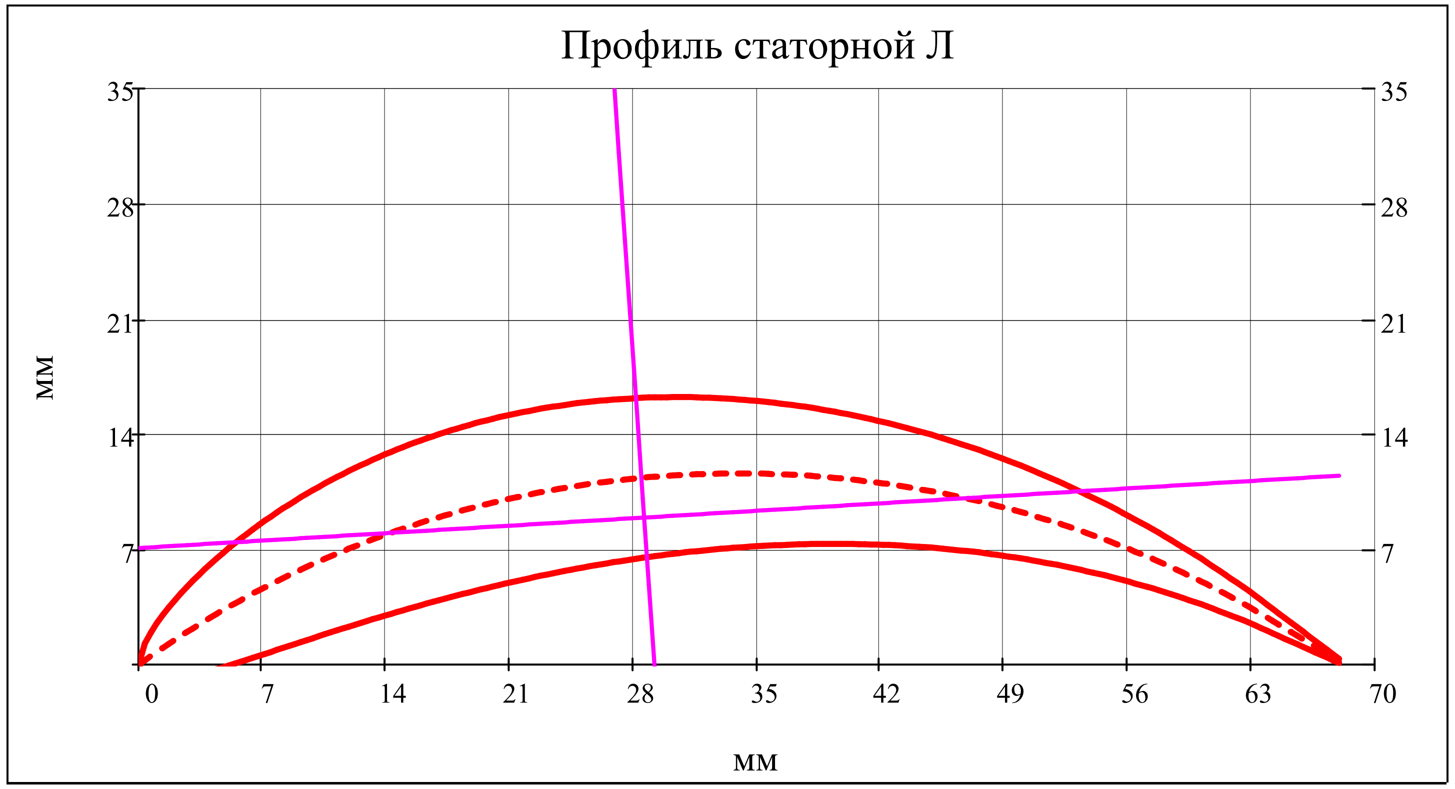
▲ Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

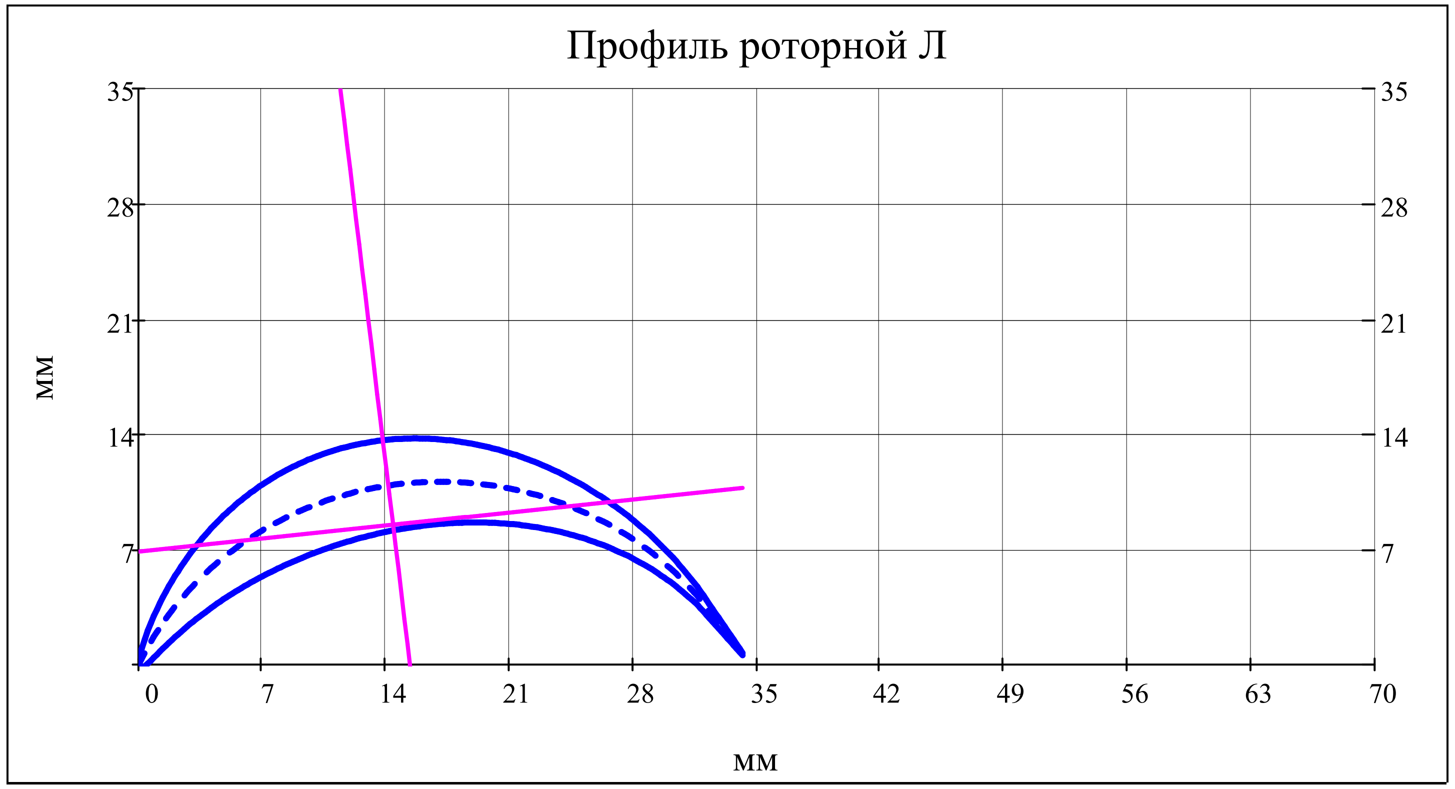
$r = 1$


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

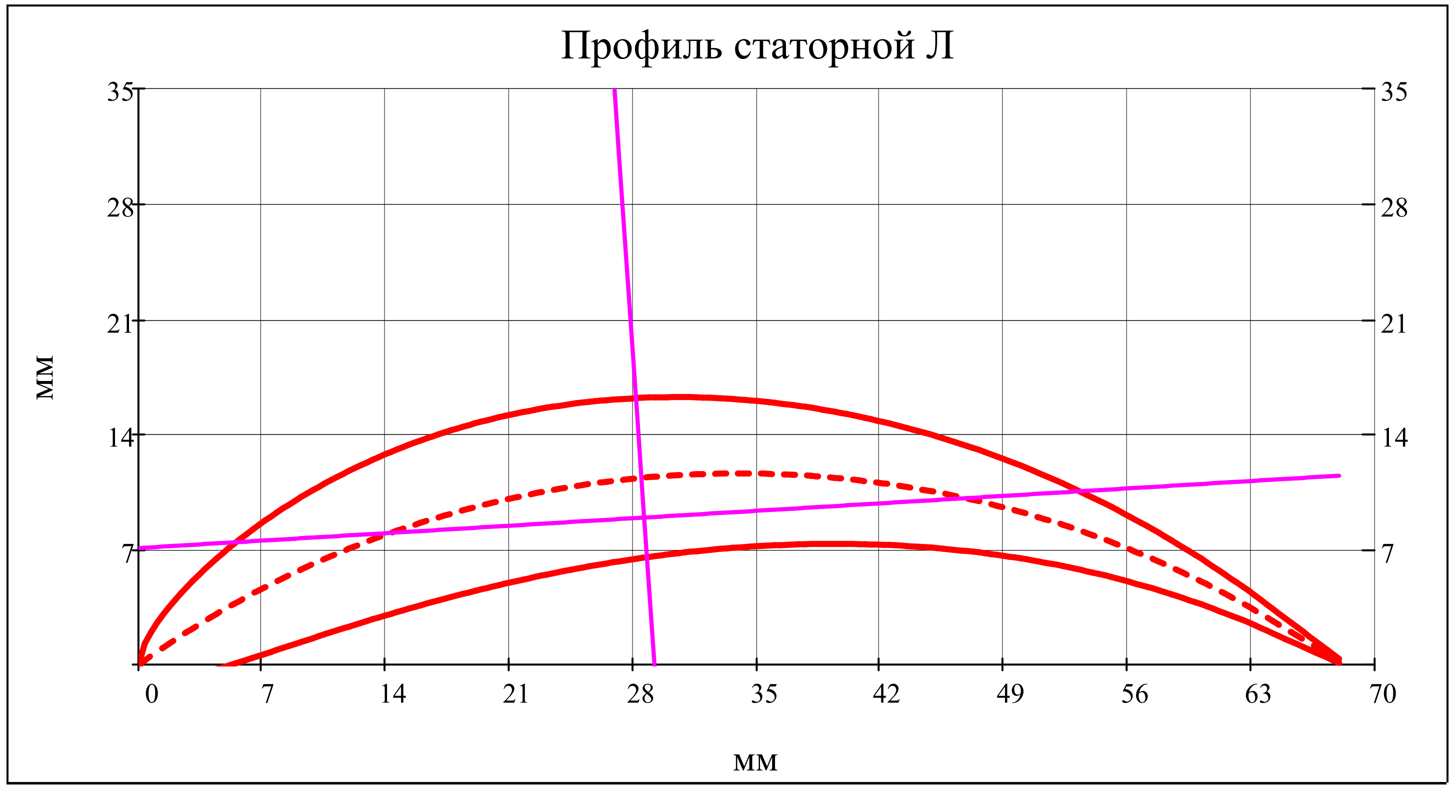

Профиль роторной Л
мм
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70

$r = av(N_r)$

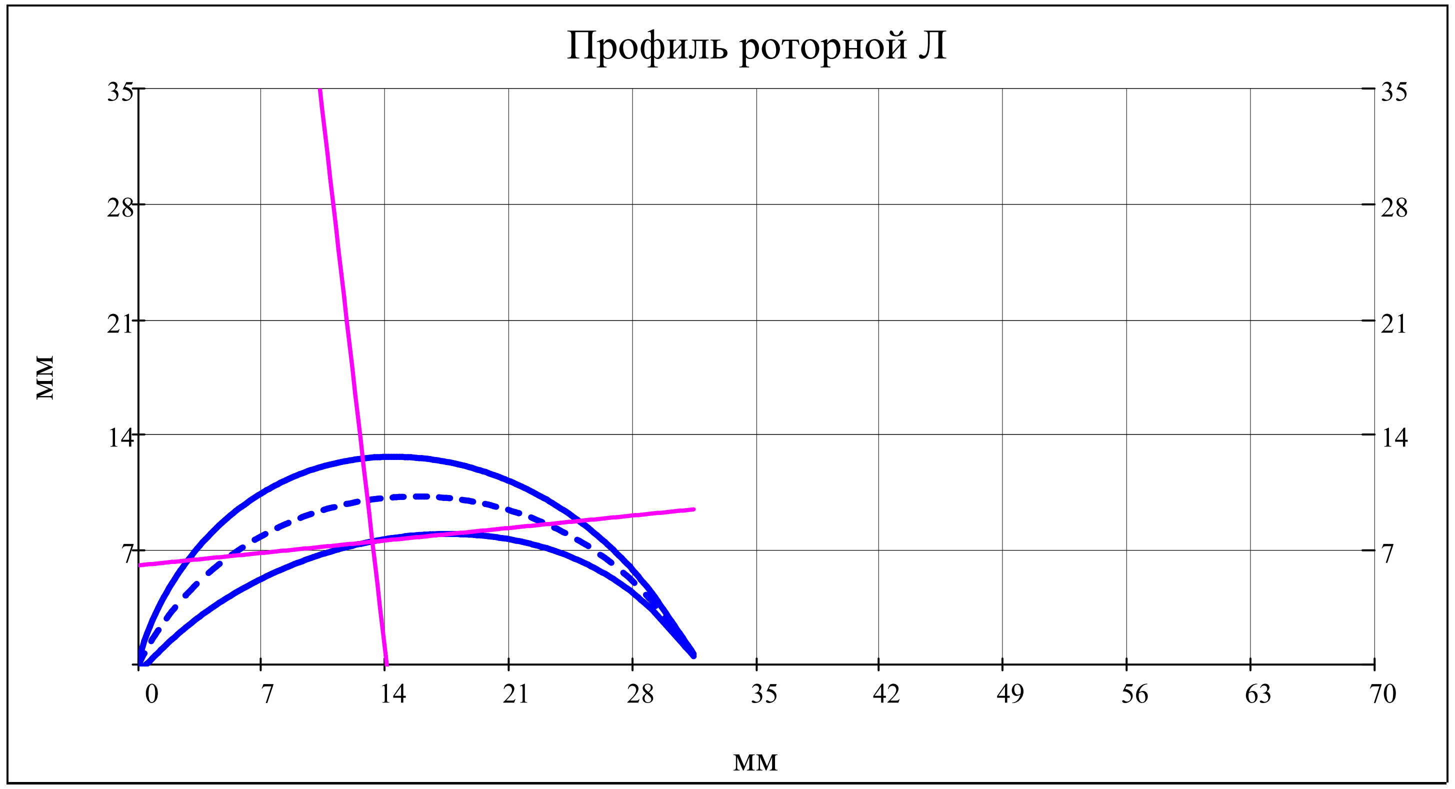

Профиль статорной Л
мм
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70


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

$r = N_r$



Профиль статорной Л



Профиль роторной Л

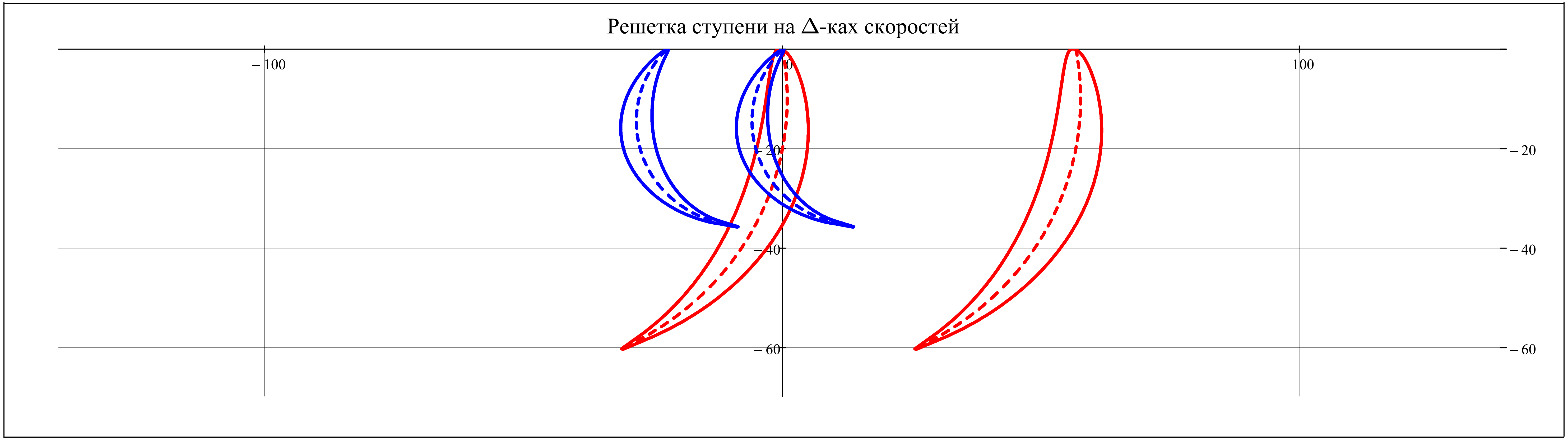
Построение профилей Л РК и НА

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

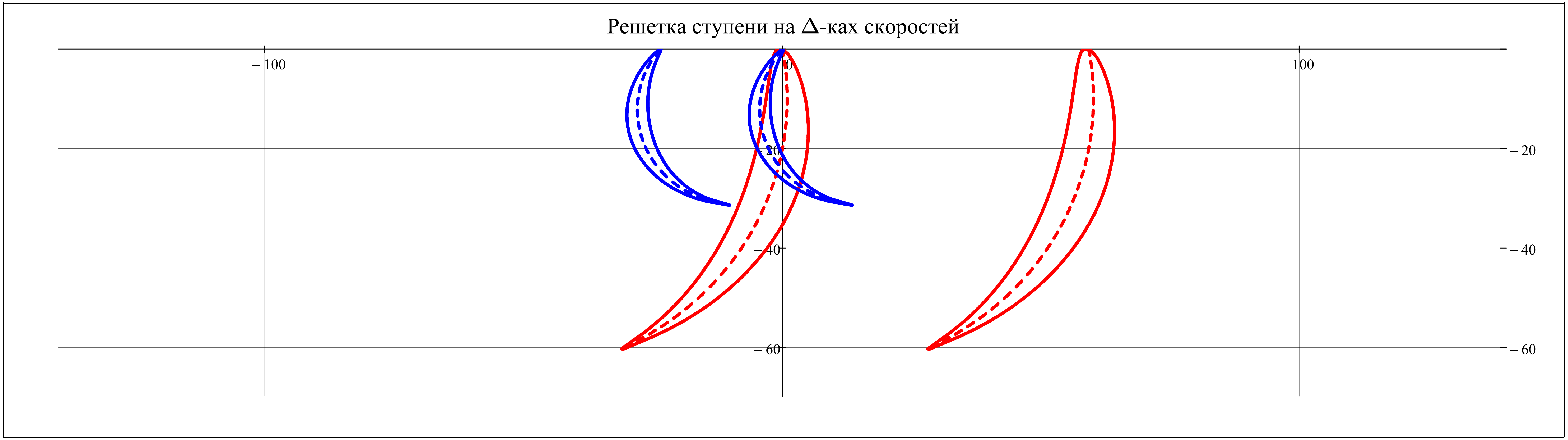
$$b_{lim} := \frac{\operatorname{ceil}\left(\max\left(\text{chord}_{\text{rotor}_{j,N_r}}, \text{chord}_{\text{stator}_{j,N_r}}\right)\cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0\cdot 10^{-3}$$

Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

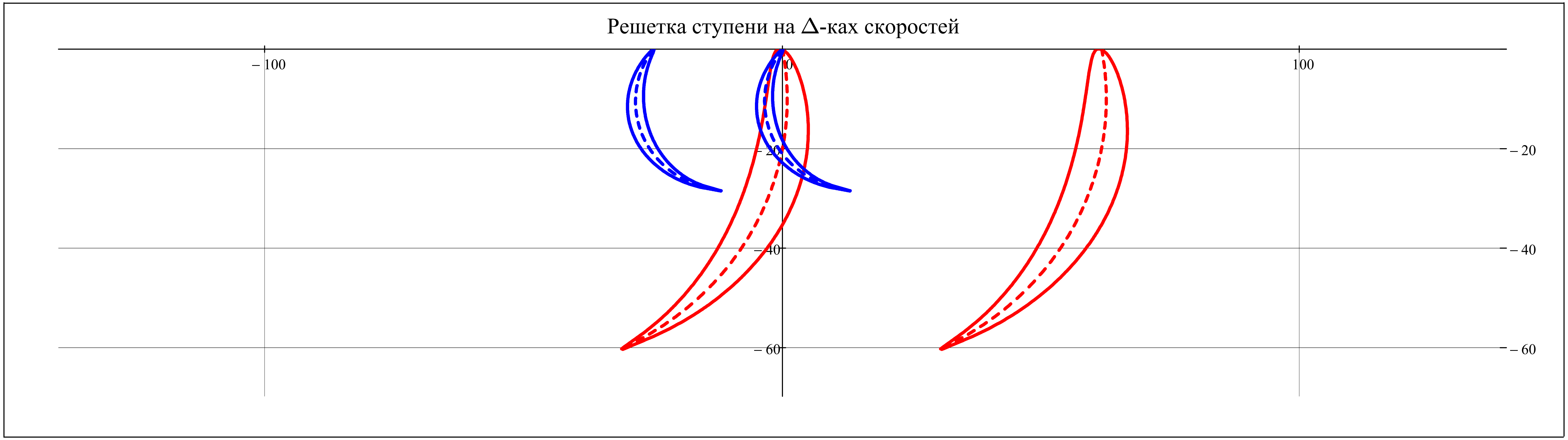
$r := 1$



$r = av(N_r)$

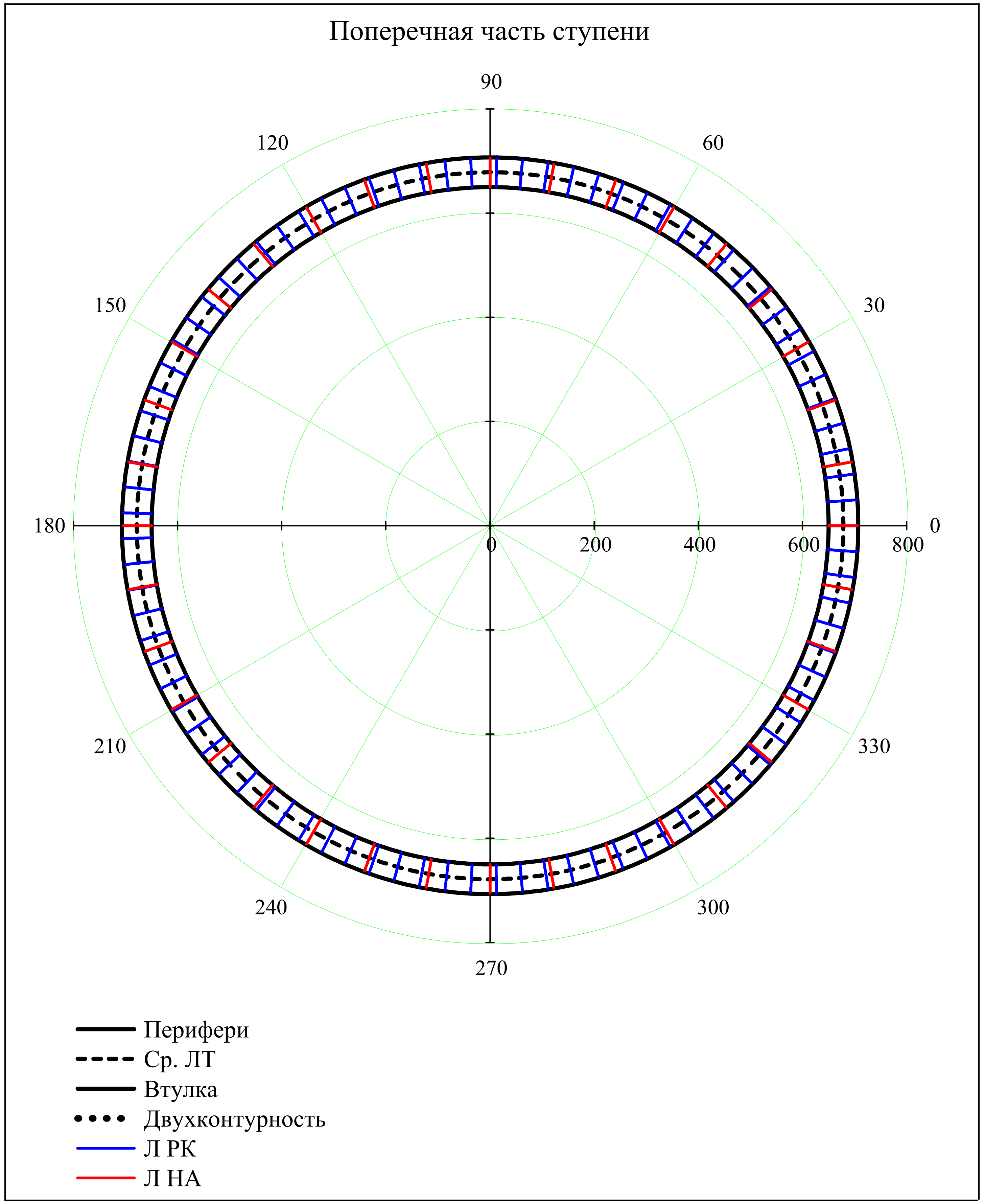


$r = N_r$



Решетка ступени на Δ-ках скоростей

▲ Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей


Поперечная часть ступени
90
60
30
0
330
300
270
240
210
180
150
120
0
200
400
600
800
Перифери
Ср. ЛТ
Втулка
Двухконтурность
Л РК
Л НА

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]:

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

	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:

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

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

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

	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

Расчетный узел: type = "turbine"

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

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

▶ Расчет Л на прочность

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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor} & \sigma\_n_{rotor} \\ \sigma\_p_{stator} & \sigma\_n_{stator} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1 .. Z \\ \quad \text{for } r \in 1 .. N_r \\ \qquad \begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor_{i,r}} & \sigma\_n_{rotor_{i,r}} \\ \sigma\_p_{stator_{i,r}} & \sigma\_n_{stator_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{Mu_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Ju_{rotor_{i,r}}} \cdot v\_u_{rotor_{i,r}} - \dfrac{Mv_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Jv_{rotor_{i,r}}} \cdot u\_u_{rotor_{i,r}} & \dfrac{Mu_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Ju_{rotor_{i,r}}} \cdot v\_l_{rotor_{i,r}} - \dfrac{Mv_{rotor}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Jv_{rotor_{i,r}}} \cdot u\_l_{rotor_{i,r}} \\ \dfrac{Mu_{stator}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Ju_{stator_{i,r}}} \cdot v\_u_{stator_{i,r}} - \dfrac{Mv_{stator}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Jv_{stator_{i,r}}} \cdot u\_u_{stator_{i,r}} & \dfrac{Mu_{stator}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Ju_{stator_{i,r}}} \cdot v\_l_{stator_{i,r}} - \dfrac{Mv_{stator}\left(i, R_{st(i,2),r}\right)}{Jv_{stator_{i,r}}} \cdot u\_l_{stator_{i,r}} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor} & \sigma\_n_{rotor} \\ \sigma\_p_{stator} & \sigma\_n_{stator} \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

	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

$\cdot 10^6$

```
$\begin{pmatrix} safety_{rotor} \\ safety_{stator} \end{pmatrix}$ =
  for $i \in 1..Z$
    for $r \in 1..N_r$
      $safety_{rotor_{i,r}} = $
        $\dfrac{\sigma\_blade\_long_i}{\sigma_{rotor_{i,r}}}$  if $\sigma_{rotor_{i,r}} \neq 0$
        $\infty$  otherwise
      $safety_{stator_{i,r}} = $
        $\dfrac{\sigma\_blade\_long_i}{\sigma_{stator_{i,r}}}$  if $\sigma_{stator_{i,r}} \neq 0$
        $\infty$  otherwise
  $\begin{pmatrix} safety_{rotor} \\ safety_{stator} \end{pmatrix}$
```

$safety_{rotor}{}^T =$

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

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

Расстояния от оси ЛМ до рассматриваемой ступени (м): $Rj = \text{submatrix}\left(R, 2\cdot j - 1, 2\cdot j + 1, 1, N_r\right) =$

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

$\cdot 10^{-3}$

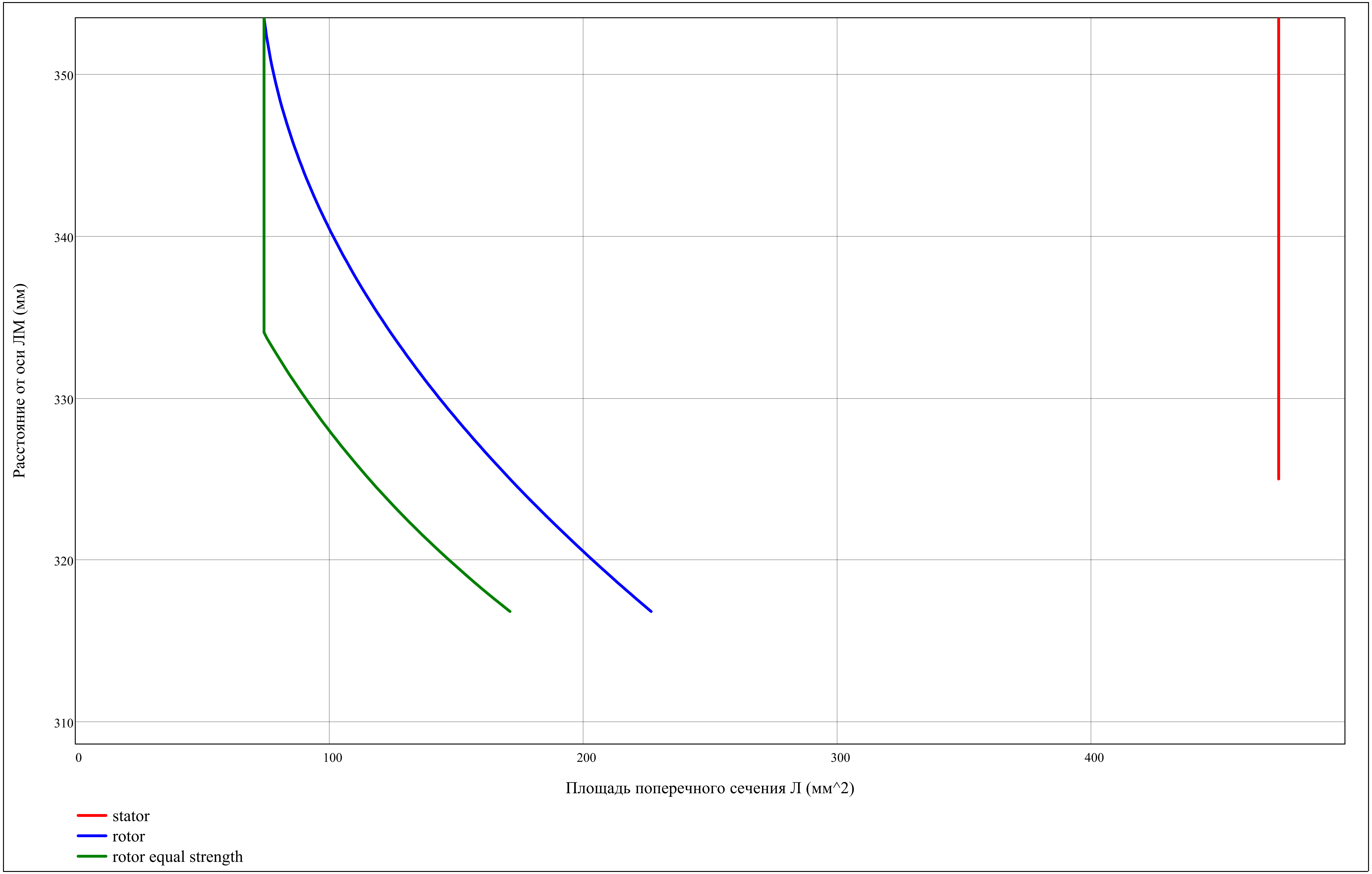
Дискретизация по высоте Л:

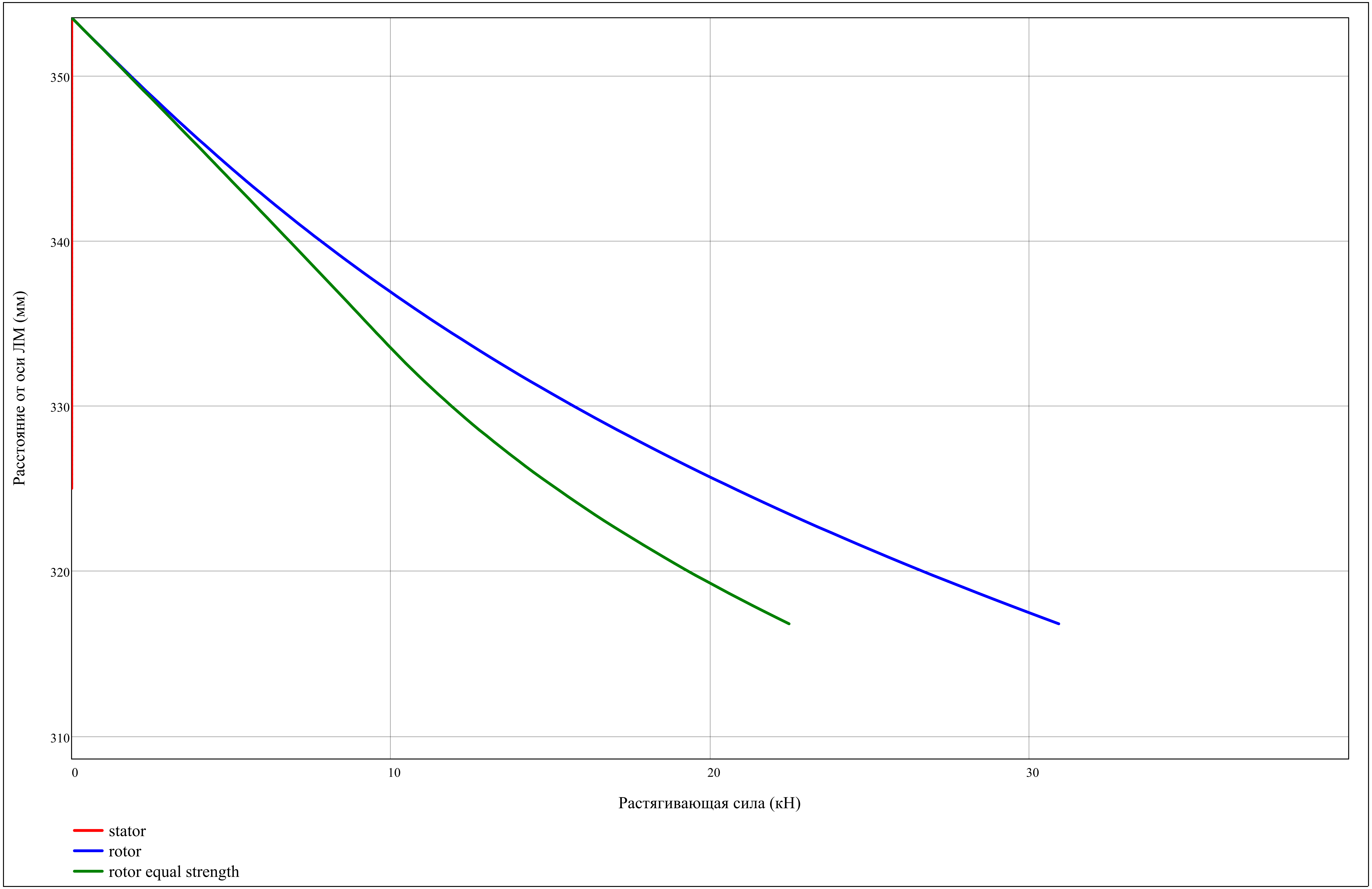
$$z = \min(Rj), \min(Rj) + \frac{\max(Rj) - \min(Rj)}{100} \,..\, \max(Rj)$$

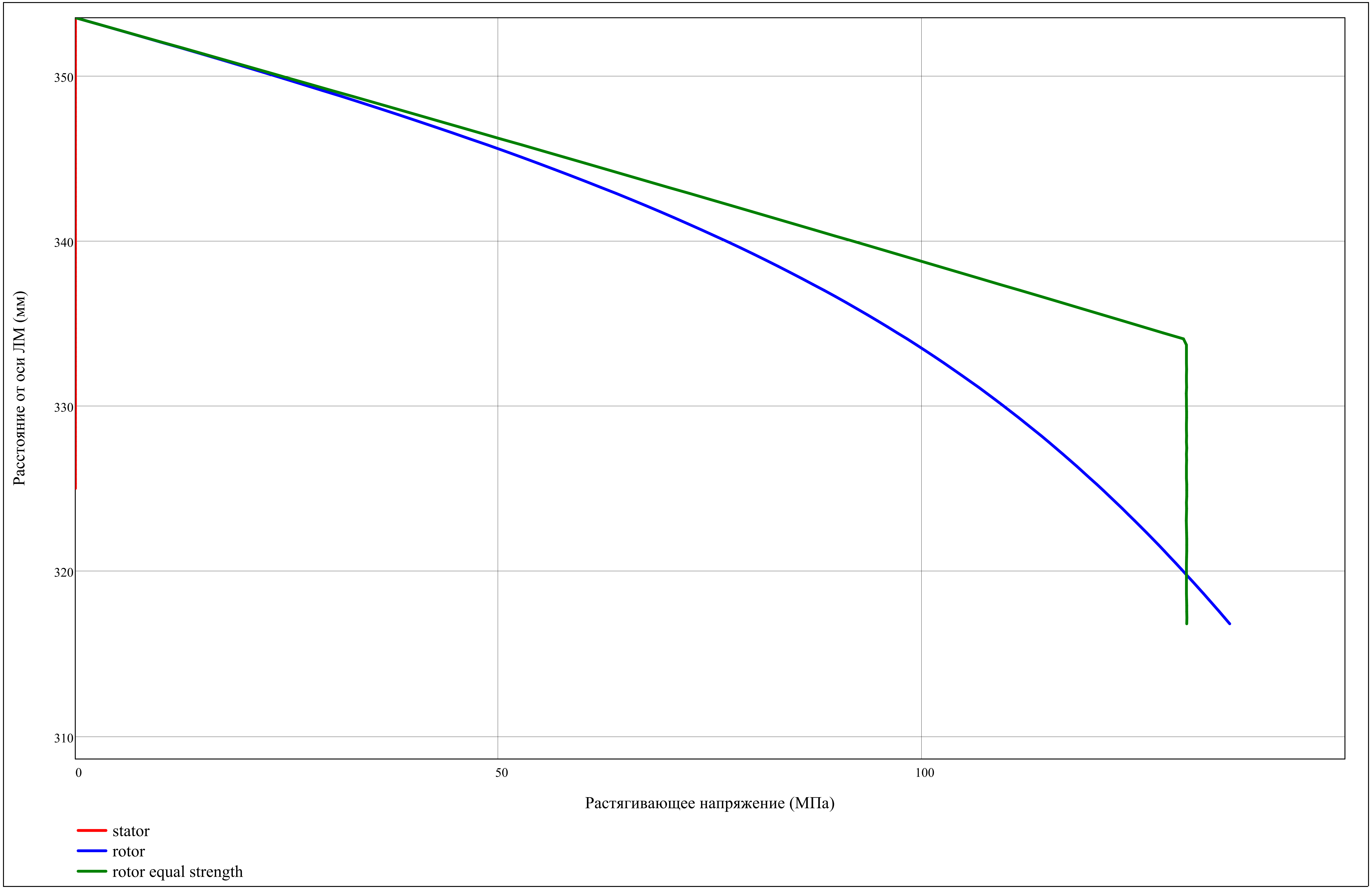
$$z_{rotor} = \left| \begin{array}{l} \text{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right), \text{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right) + \dfrac{\text{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) - \text{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right)}{100} \,..\, \text{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) \ \text{if } type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

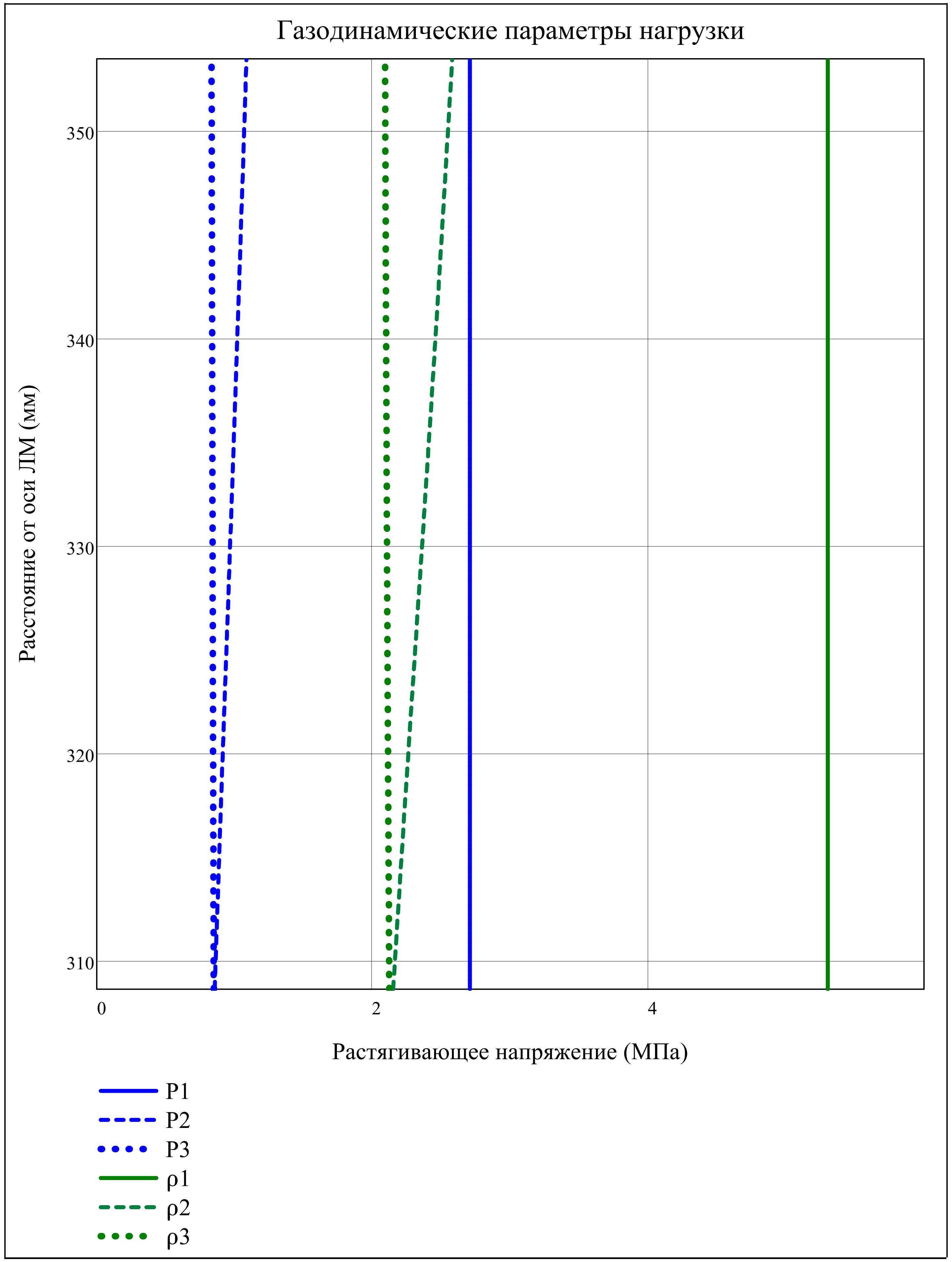
$$z_{stator} = \left| \begin{array}{l} \text{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right), \text{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right) + \dfrac{\text{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) - \text{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right)}{100} \,..\, \text{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) \ \text{if } type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

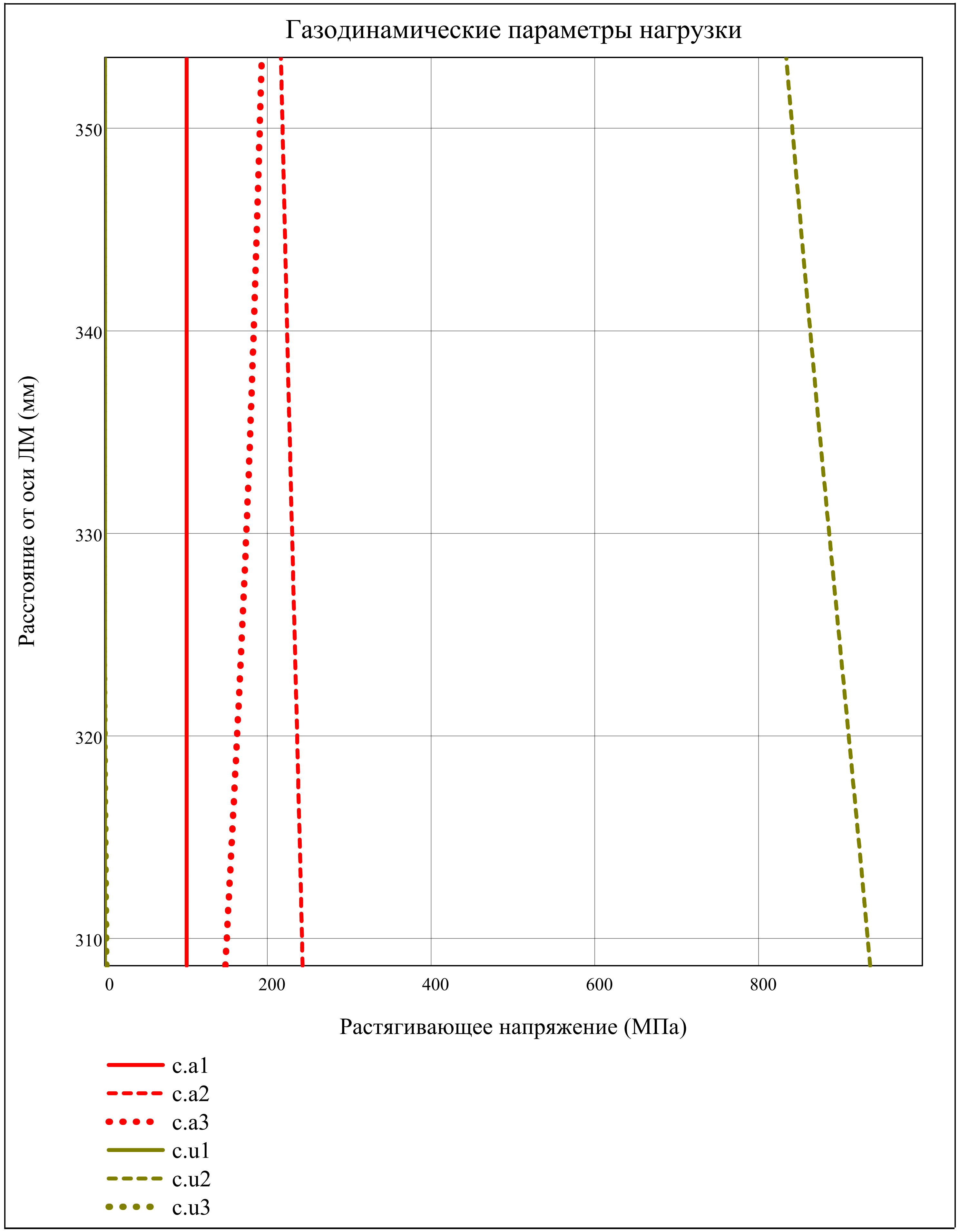
▼ Результаты расчета на прочность Л

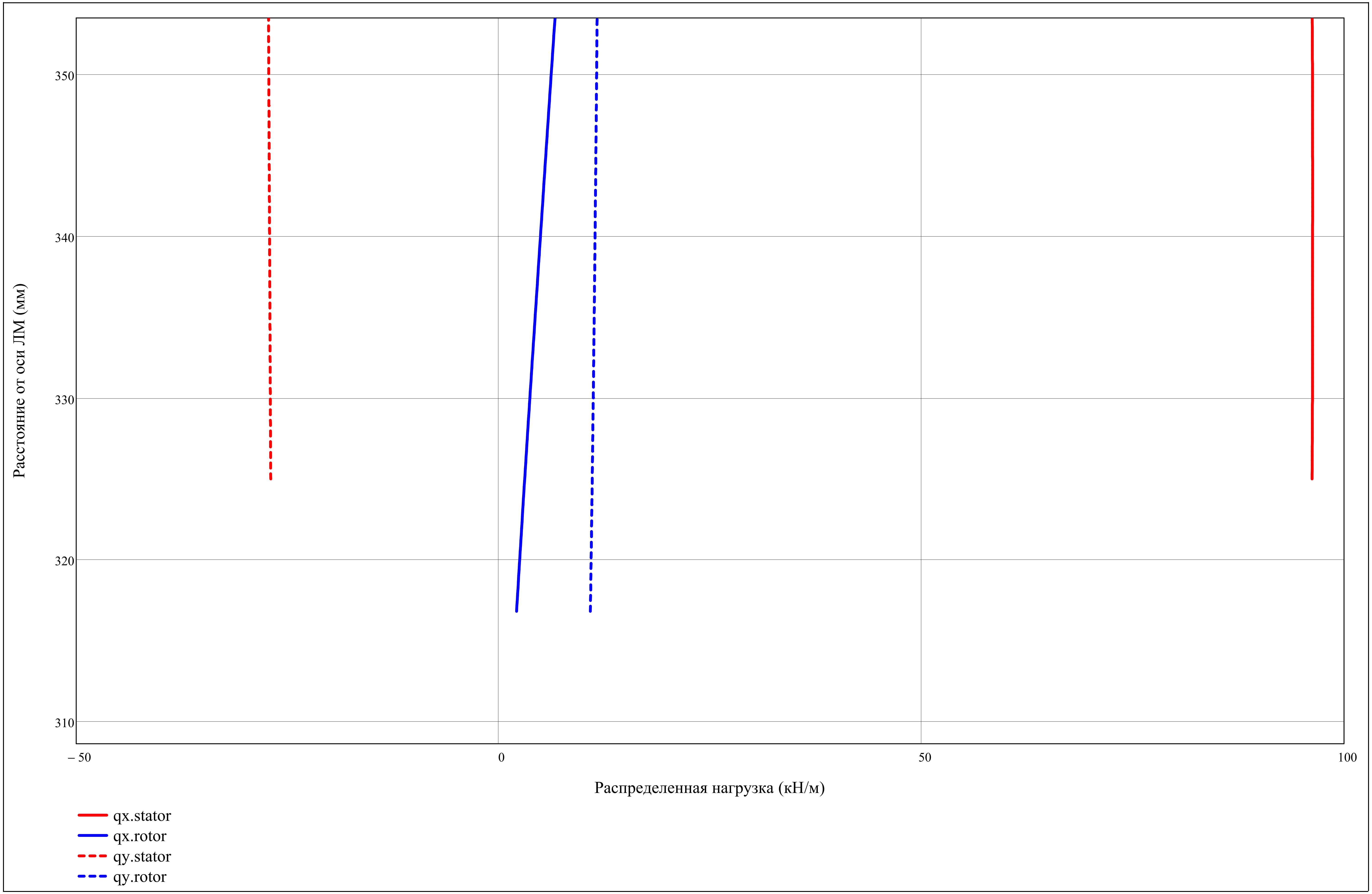

350
340
330
320
310
0
100
200
300
400
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength


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

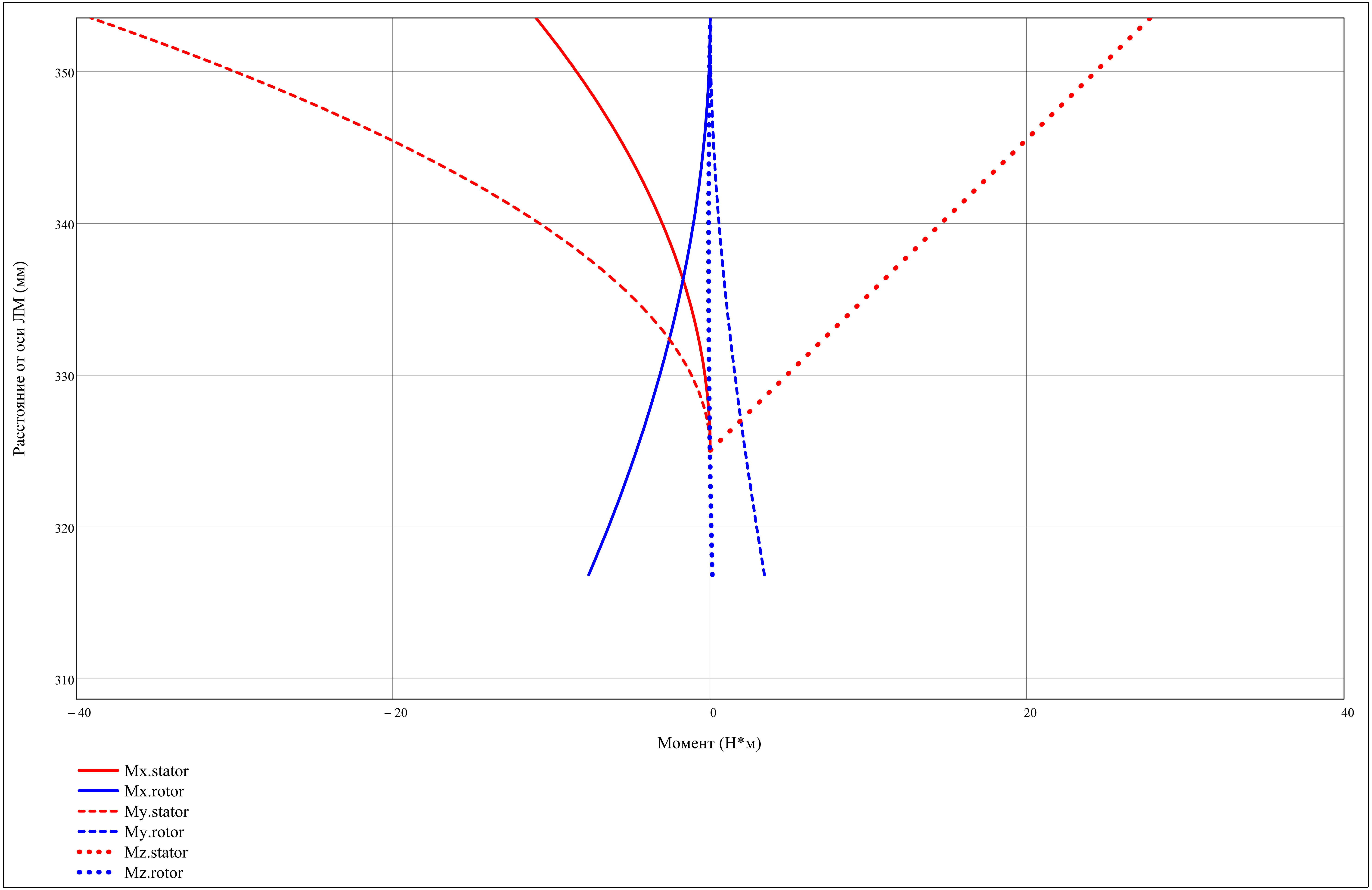

350
340
330
320
310
0
50
100
Растягивающее напряжение (МПа)
Расстояние от оси ЛМ (мм)
stator
rotor
rotor equal strength

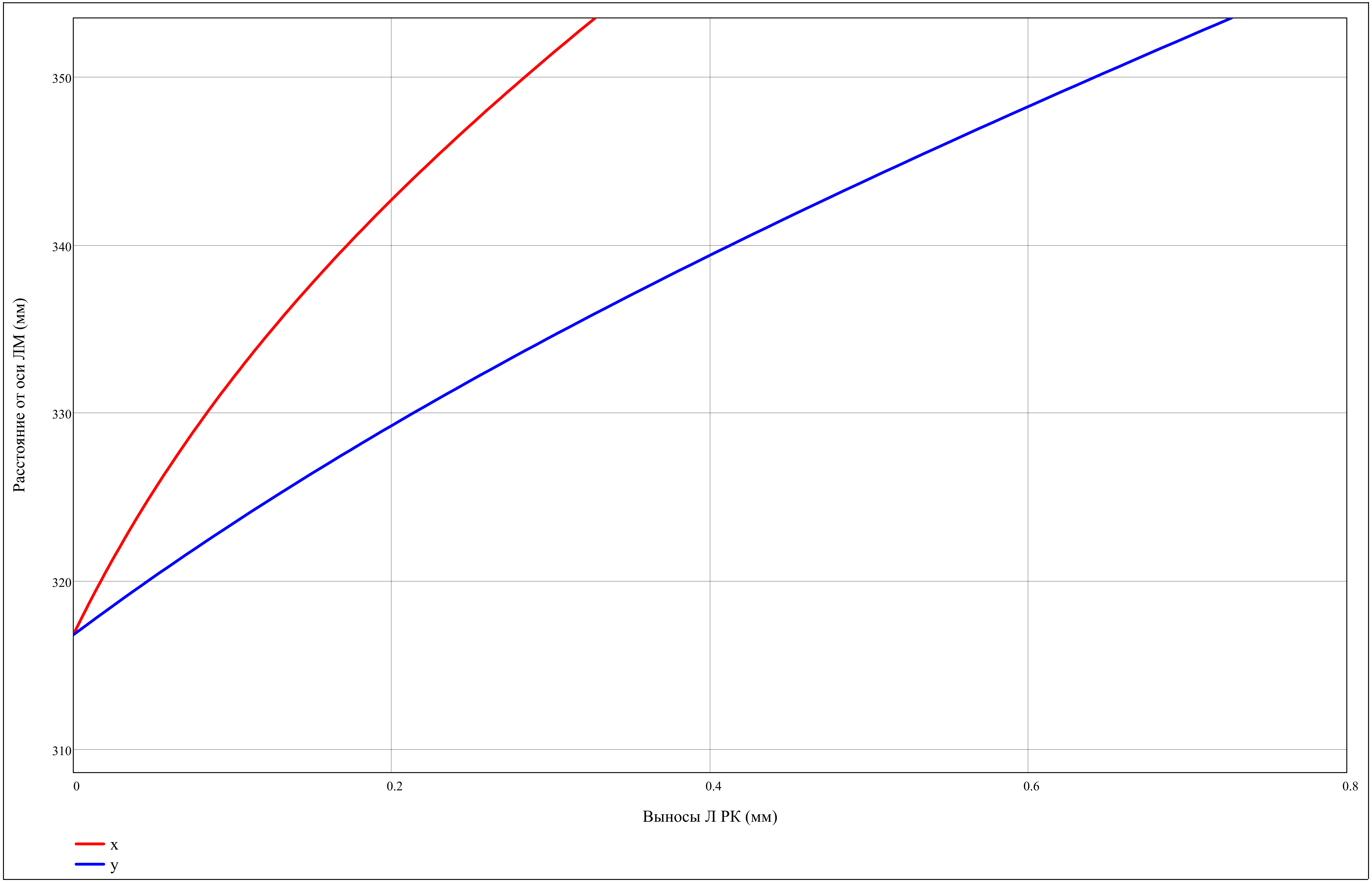

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
2
4
Растягивающее напряжение (МПа)
P1
P2
P3
ρ1
ρ2
ρ3

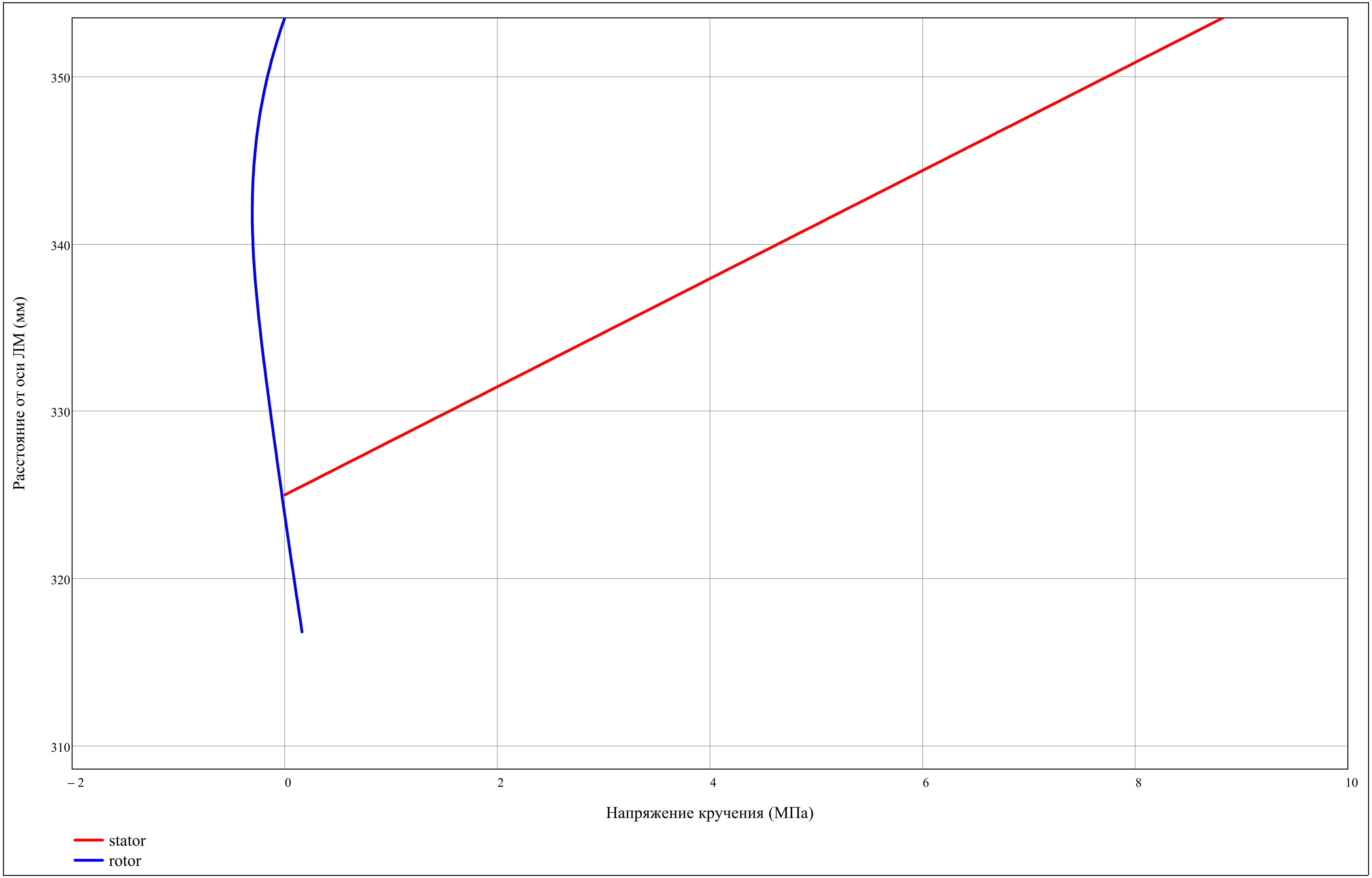

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
200
400
600
800
Растягивающее напряжение (МПа)
c.a1
c.a2
c.a3
c.u1
c.u2
c.u3



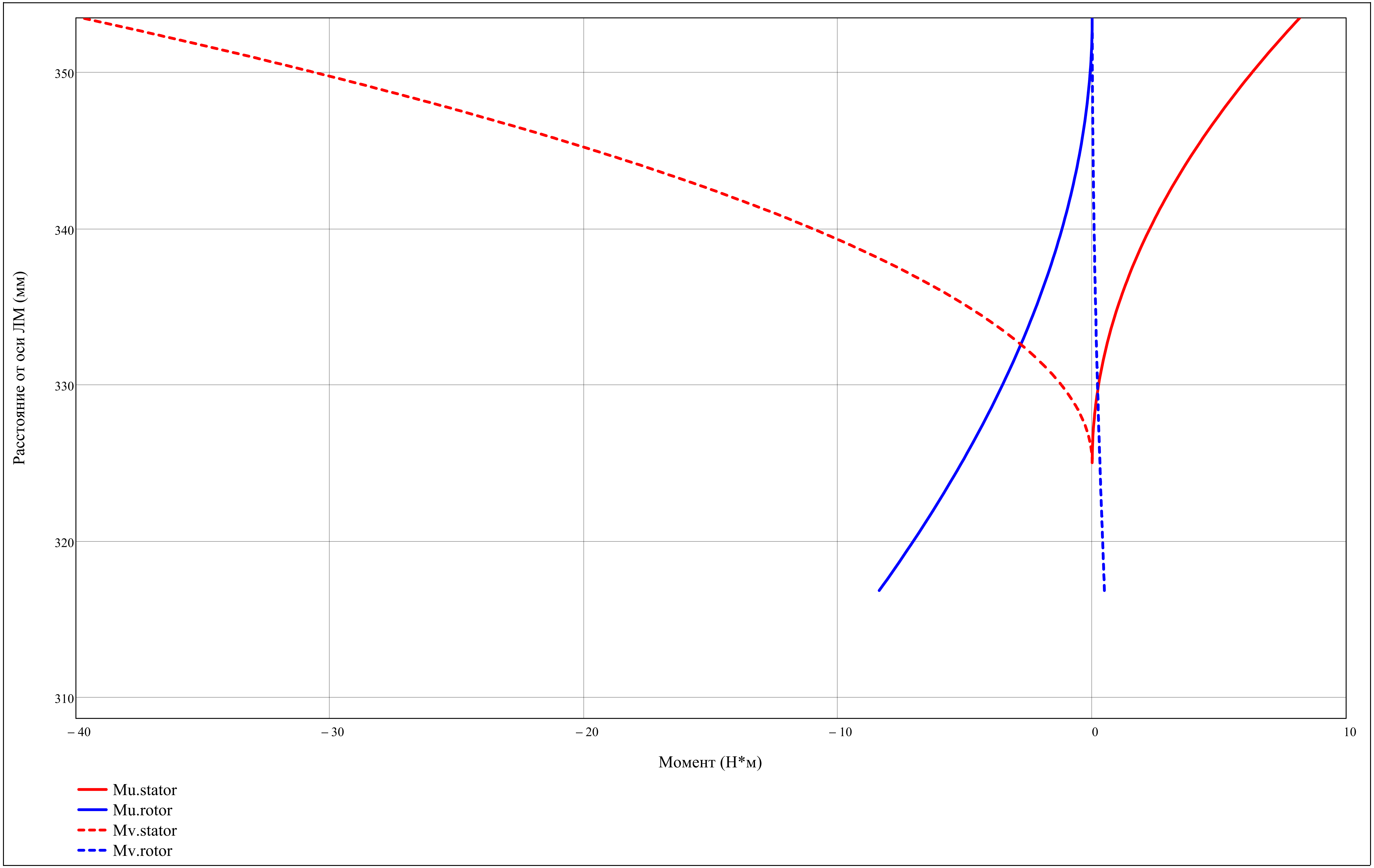
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 50
0
50
100
Распределенная нагрузка (кН/м)
qx.stator
qx.rotor
qy.stator
qy.rotor

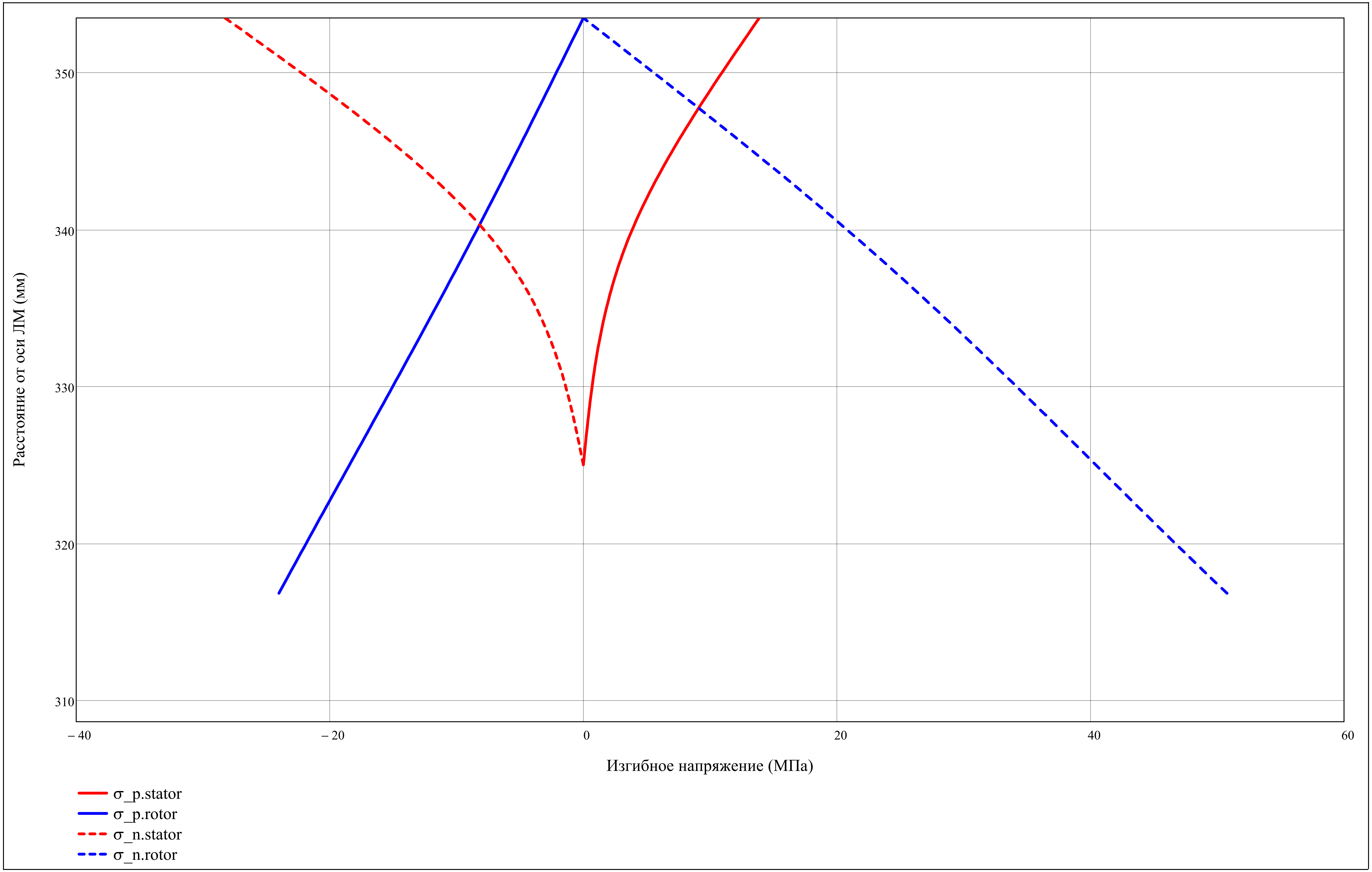

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 40
– 20
0
20
40
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor

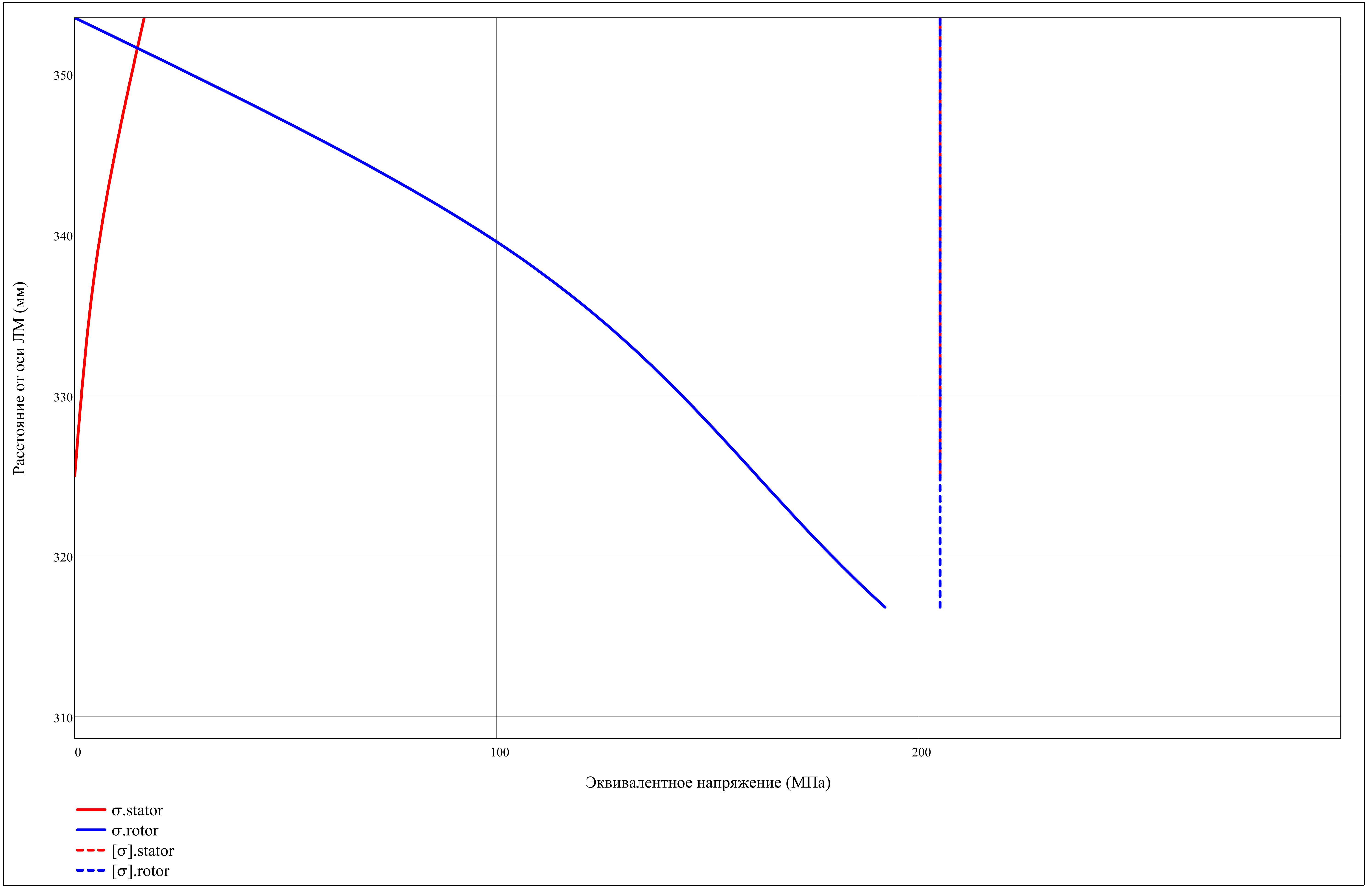

350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
Выносы Л РК (мм)
x
y



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


Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 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

$$\begin{pmatrix} \text{blade} \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"stator"} \\ 2 \end{pmatrix}$$

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	0.40	4.05
2	18.83	-10.08
3	8.16	8.19
4	-25.86	-14.47

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-8.9	3.5
2	21.9	-7.1

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	5.6
2	101.7

$\cdot 10^{6}$

Коэф. запаса: $\begin{pmatrix} safety_{stator_{j,r}} \\ safety_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} =$

	1
1	36.526
2	2.015

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	8.190
2	-14.465

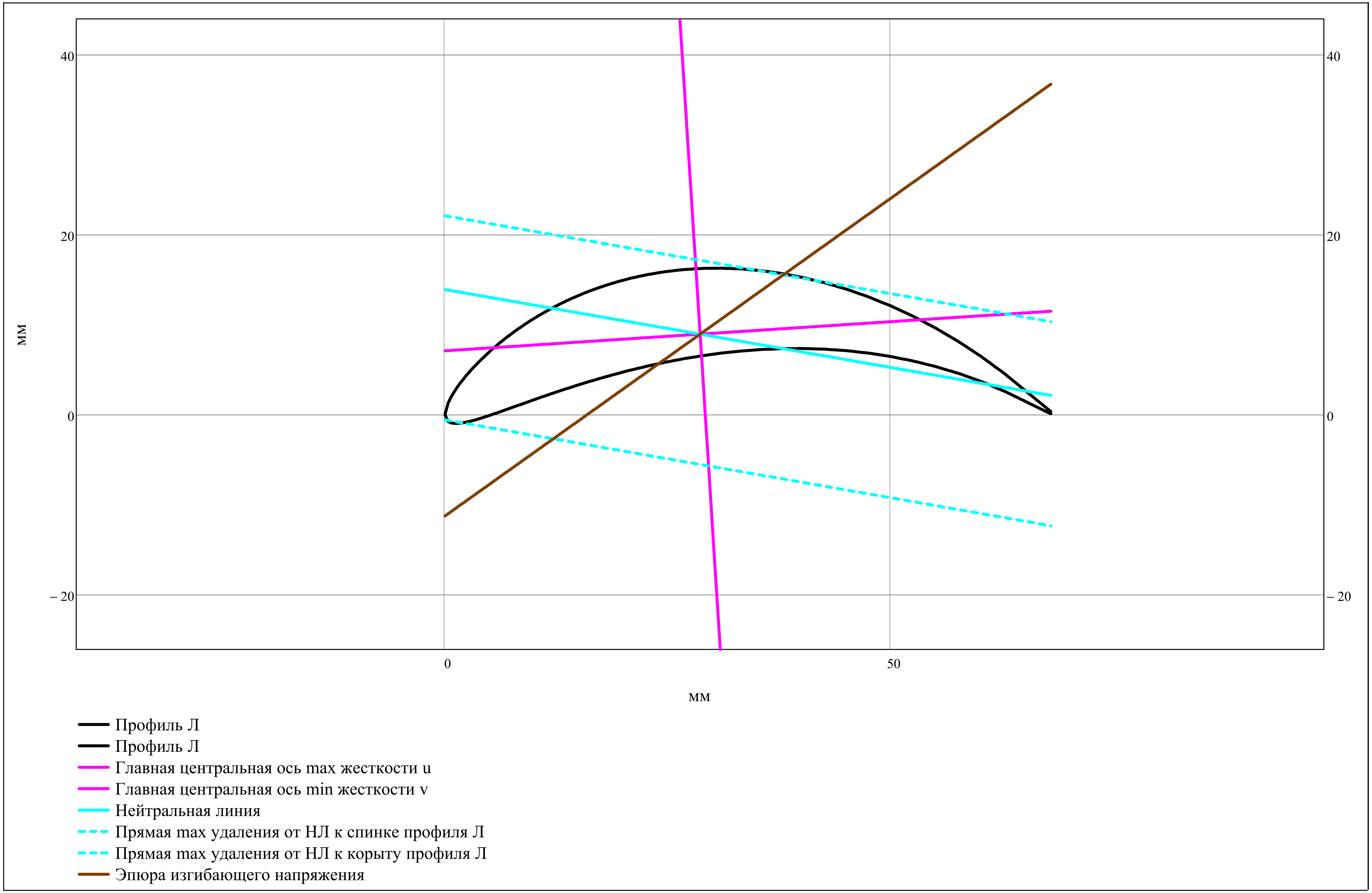
$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} x0_{rotor_{j,r}} \\ y0_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} x0_{stator_{j,r}} \\ y0_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	28.623
2	8.931

$\cdot 10^{-3}$

$$\text{chord} = \left| \begin{array}{ll} chord_{rotor_{j,r}} & \text{if blade = "rotor"} \\ chord_{stator_{j,r}} & \text{if blade = "stator"} \end{array} \right. = 68.0 \cdot 10^{-3}$$


40
20
0
– 20
40
20
0
– 20
мм
0
50
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

$$\begin{pmatrix} \text{blade} \\ \text{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"stator"} \\ 3 \end{pmatrix}$$

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$\begin{pmatrix} \text{u\_u}_{\text{rotor}_{j,r}} & \text{v\_u}_{\text{rotor}_{j,r}} \\ \text{u\_l}_{\text{rotor}_{j,r}} & \text{v\_l}_{\text{rotor}_{j,r}} \\ \text{u\_u}_{\text{stator}_{j,r}} & \text{v\_u}_{\text{stator}_{j,r}} \\ \text{u\_l}_{\text{stator}_{j,r}} & \text{v\_l}_{\text{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1	2
1	-5.99	13.96
2	-8.99	-17.32
3	8.16	8.19
4	-25.85	-14.48

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

$$\begin{pmatrix} \sigma\text{\_p}_{\text{rotor}_{j,r}} & \sigma\text{\_p}_{\text{stator}_{j,r}} \\ \sigma\text{\_n}_{\text{rotor}_{j,r}} & \sigma\text{\_n}_{\text{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1	2
1	0.0	13.9
2	0.0	-28.3

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

$$\begin{pmatrix} \sigma_{\text{stator}_{j,r}} \\ \sigma_{\text{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	16.4
2	0.0

$\cdot 10^{6}$

Коэф. запаса:

$$\begin{pmatrix} \text{safety}_{\text{stator}_{j,r}} \\ \text{safety}_{\text{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	12.470
2	00000000000000000000000000000.0

$$\begin{pmatrix} \text{v\_p} \\ \text{v\_n} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} \text{v\_u}_{\text{rotor}_{j,r}} \\ \text{v\_l}_{\text{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} \text{v\_u}_{\text{stator}_{j,r}} \\ \text{v\_l}_{\text{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	8.194
2	-14.477

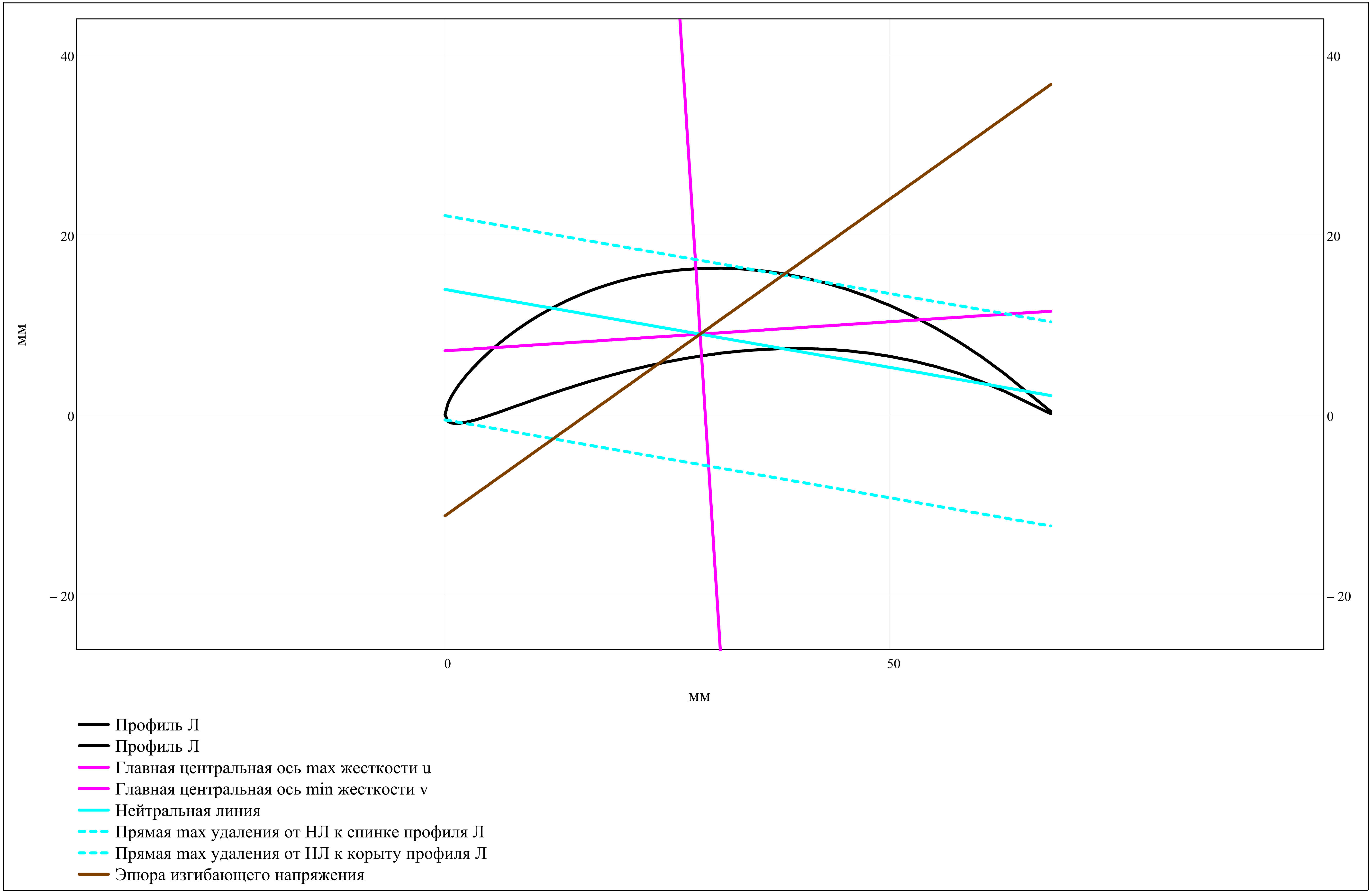
$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} \text{x0} \\ \text{y0} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} \text{x0}_{\text{rotor}_{j,r}} \\ \text{y0}_{\text{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} \text{x0}_{\text{stator}_{j,r}} \\ \text{y0}_{\text{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	28.623
2	8.931

$\cdot 10^{-3}$

$$\text{chord} = \left| \begin{array}{ll} \text{chord}_{\text{rotor}_{j,r}} & \text{if blade = "rotor"} \\ \text{chord}_{\text{stator}_{j,r}} & \text{if blade = "stator"} \end{array} \right. = 68.0 \cdot 10^{-3}$$


40
20
0
– 20
40
20
0
– 20
мм
0
50
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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$\begin{pmatrix} \mathrm{u\_u}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} & \mathrm{v\_u}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \\ \mathrm{u\_l}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} & \mathrm{v\_l}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \\ \mathrm{u\_u}_{\mathrm{stator}_{j,r}} & \mathrm{v\_u}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \\ \mathrm{u\_l}_{\mathrm{stator}_{j,r}} & \mathrm{v\_l}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

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

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

$$\begin{pmatrix} \sigma\mathrm{\_p}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} & \sigma\mathrm{\_p}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \\ \sigma\mathrm{\_n}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} & \sigma\mathrm{\_n}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1	2
1	-18.4	0.0
2	40.4	0.0

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

$$\begin{pmatrix} \sigma_{\mathrm{stator}_{j,r}} \\ \sigma_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	0.0
2	161.6

$\cdot 10^{6}$

Коэф. запаса:

$$\begin{pmatrix} \mathrm{safety}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \\ \mathrm{safety}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	)0000000000000000000000000000000.0
2	1.269

$$\begin{pmatrix} \mathrm{v\_p} \\ \mathrm{v\_n} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} \mathrm{v\_u}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \\ \mathrm{v\_l}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} \mathrm{v\_u}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \\ \mathrm{v\_l}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	5.323
2	-11.789

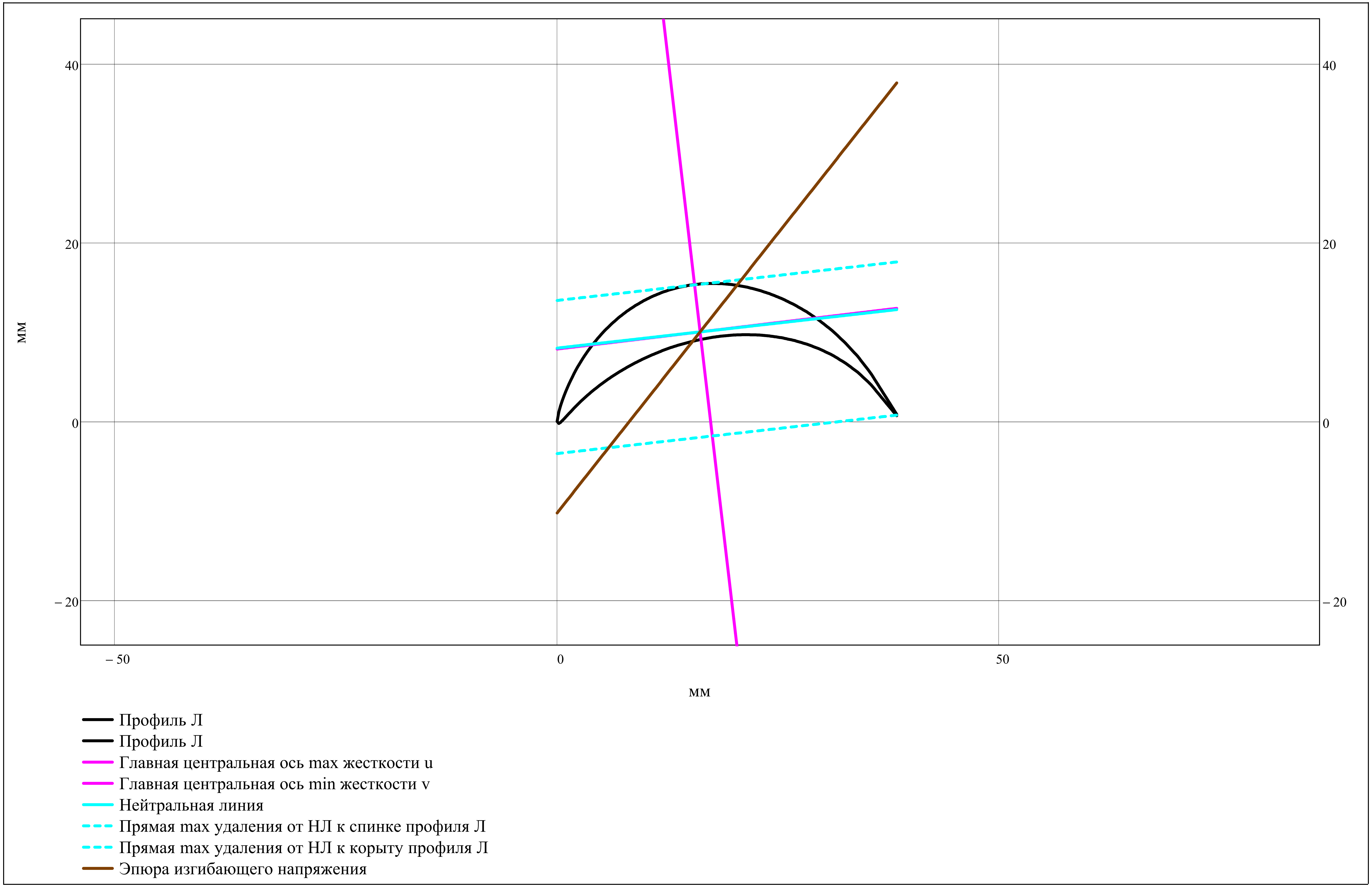
$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} \mathrm{x0} \\ \mathrm{y0} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} \mathrm{x0}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \\ \mathrm{y0}_{\mathrm{rotor}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} \mathrm{x0}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \\ \mathrm{y0}_{\mathrm{stator}_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	16.158
2	10.001

$\cdot 10^{-3}$

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


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

$$\begin{pmatrix} blade \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"rotor"} \\ 2 \end{pmatrix}$$

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	0.40	4.05
2	18.83	-10.08
3	8.16	8.19
4	-25.86	-14.47

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-8.9	3.5
2	21.9	-7.1

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	5.6
2	101.7

$\cdot 10^{6}$

Коэф. запаса:

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

	1
1	36.526
2	2.015

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	4.047
2	-10.076

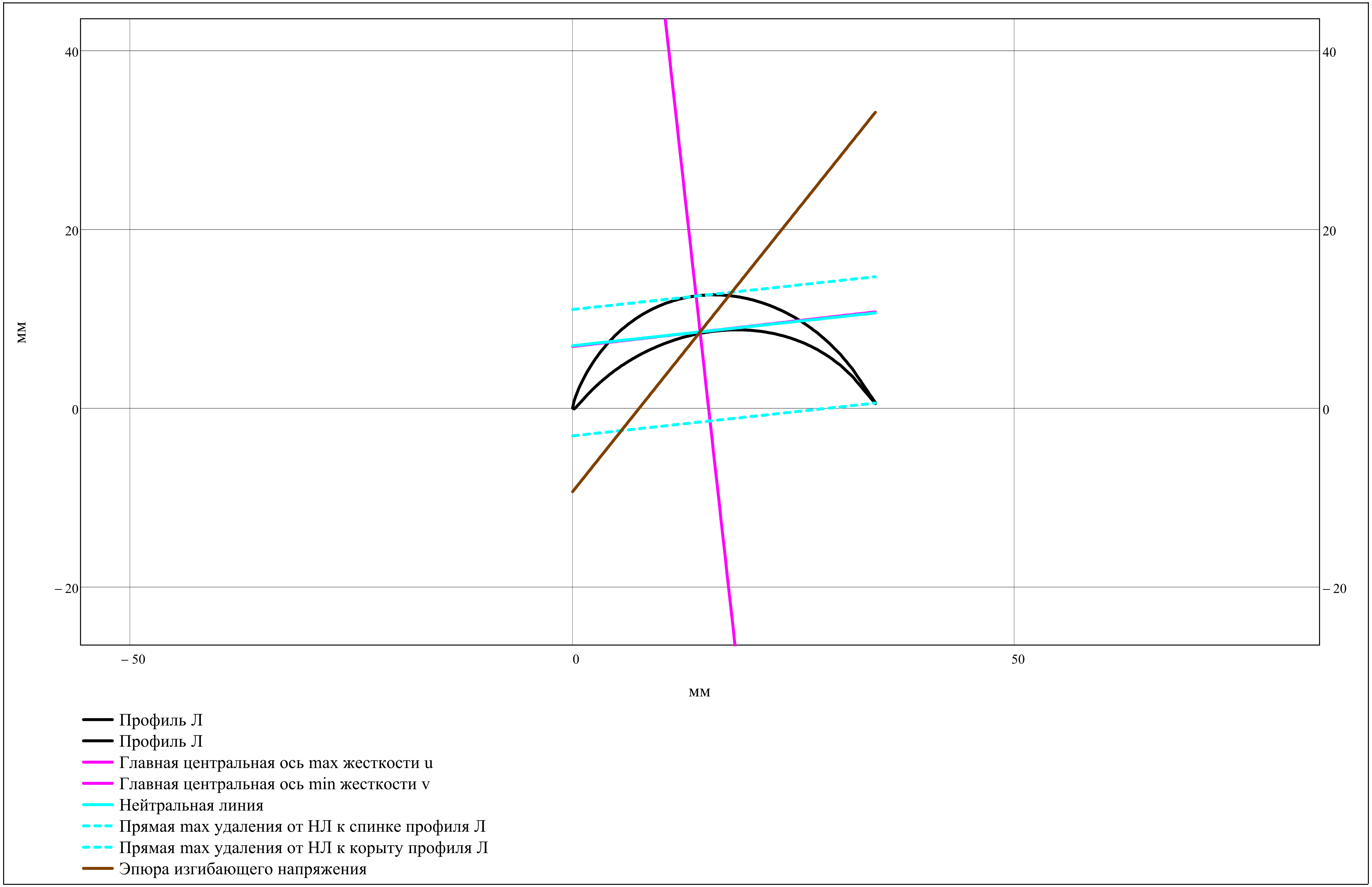
$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} x0_{rotor_{j,r}} \\ y0_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} x0_{stator_{j,r}} \\ y0_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. =$$

	1
1	14.401
2	8.496

$\cdot 10^{-3}$

$$chord = \left| \begin{array}{ll} chord_{rotor_{j,r}} & \text{if blade = "rotor"} \\ chord_{stator_{j,r}} & \text{if blade = "stator"} \end{array} \right. = 34.2 \cdot 10^{-3}$$



Результаты расчета на прочность Л

Выбор материала Д

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

Выбранный материал Д: $material\_disk_i = \left| \begin{array}{l} \text{"ВЖ175"} \;\; \text{if} \;\; turbine = \text{"ТВД"} \\ \text{"ЭП742"} \;\; \text{if} \;\; turbine = \text{"ТНД"} \end{array} \right.$

Плотность материала Д (кг/м^3):

$$\rho\_disk_i = \left| \begin{array}{l} 8266 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ВЖ175"} \\ 8320 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ЭП742"} \\ 8393 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ЖС-6К"} \\ 7900 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ВТ41"} \\ 4500 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ВТ25"} \\ 4570 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ВТ23"} \\ 4510 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ВТ9"} \\ 4430 \;\; \text{if} \;\; material\_disk_i = \text{"ВТ6"} \\ \text{NaN} \;\; \text{otherwise} \end{array} \right.$$

Предел длительной прочности Д (Па):

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

$material\_disk^T =$

	1
1	"ВЖ175"

$\rho\_disk^T =$

	1
1	8266

$\sigma\_disk\_long^T =$

	1
1	620

$\cdot 10^6$

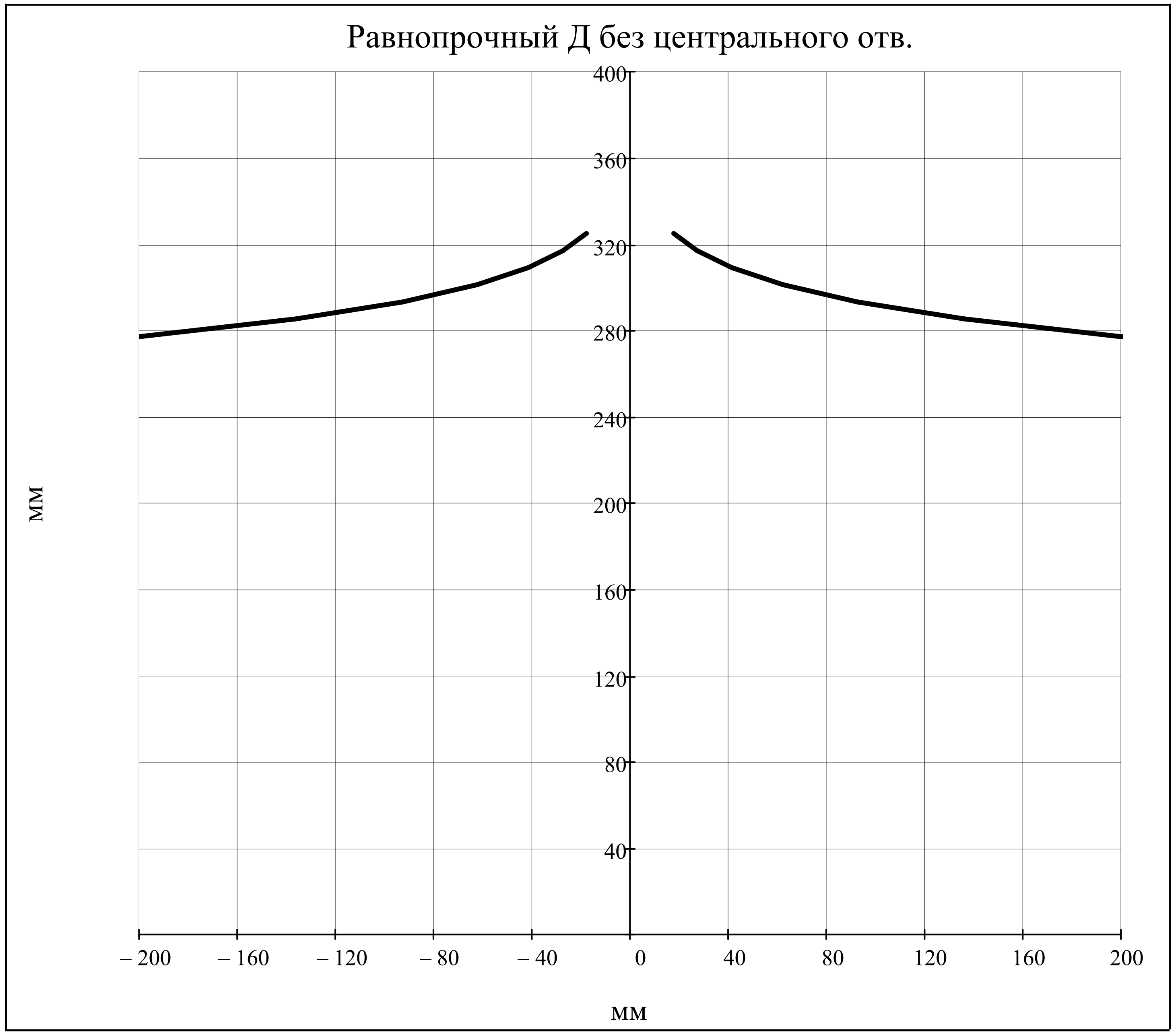
Выбор материала Д

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.

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

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



▲ Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.