Подключение библиотек

Основные уравнения, алгоритмы, зависимости и ф-и

▶ Параметры расчета

▾Исходные данные

Коэф. запаса: $safety = 1.3$

Горючее: $Fuel = \text{"Керосин"}$ $turbine = \text{"ТВД"}$

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

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

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

	1
1	32.30
2	0.11
3	3.24

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Абс. скорость перед Т (м/с):

Абс. скорость после Т (м/с):

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

	1
1	100.0
2	180.0

[1, с.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):

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

Исходные данные

Основне размеры Т

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

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

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

Массовый расход перед Т (кг/с): $G_{\text{Г}} = G_{\text{г}} - G_{\text{leak}} = 32.2$

Массовый расход после Т (кг/с): $G_{\text{т}} = G_{\text{г}} + G_{\text{cooling}} = 35.4$

Удельная работа Т (Дж/кг): $L^*_{\text{Т}} = \dfrac{N_{\text{Т}}}{\text{mean}\left(G_{\text{г}}, G_{\text{т}}\right)} = 440.4 \cdot 10^3$

$L^*_{\text{Т}} \le 550 \cdot 10^3 = 1$

Располагаемый теплоперепад в Т (Дж/кг): $H_{\text{Т}} = \dfrac{L^*_{\text{Т}} + 0.5 c_{\text{т}}^2}{\eta_{\text{л}}} = 518.9 \cdot 10^3$

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

```
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
    $k_{г} = k'_{г}$
$\left(iteration \;\; k_{г} \;\; P_{г} \;\; T_{г}\right)^{T}$
```

=

	1
1	1.0
2	1.3
3	2705198.4
4	1769.2

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

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

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

=

	1
1	1
2	1.293
3	866477.23
4	1424.088

Количество итераций: $iteration = 1$

Показатель адиабаты после Т: $k_т = 1.293$

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

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

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

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

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

Степень понижения давления: $\pi_T = \frac{P^*_{\Gamma}}{P_{т}} = 3.15$

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

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

	1
1	0.189
2	0.474

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

$$\begin{pmatrix} F_{\Gamma} \\ F_{т} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{G_{\Gamma} \cdot v_{\Gamma}}{c_{\Gamma}} \\ \frac{G_{т} \cdot v_{т}}{c_{т}} \end{pmatrix} =$$

	1
1	60741
2	93341

$\cdot 10^{-6}$

▲ Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

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

Определение количества ступеней Т

$\begin{pmatrix} Z_{recomend} \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} =$

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

$=$

	1
1	1.000
2	0.000

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

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

Дискретизация ступеней: $i = 1..Z$

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

Определение количества ступеней Т

Выбранный материал Л: $$material\_blade_i = \left|\begin{array}{l} \text{"ВКНА-1В"} \ \ \text{if} \ \ 1523 \le T^*_{г} \\ \text{"ВЖМ7"} \ \ \text{if} \ \ 1323 \le T^*_{г} < 1523 \\ \text{"ЖС-36"} \ \ \text{if} \ \ 1123 \le T^*_{г} < 1323 \end{array}\right.$$

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

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

$material\_blade^T =$

	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): $\sqrt{\frac{\sigma\_blade\_long}{safety\cdot k_n\cdot F_{\text{г}}}} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 19539 \\ \hline\end{array}$

Max частота вращения ротора на выходе (об/мин): $n_{max} = \sqrt{\frac{\sigma\_blade\_long}{safety\cdot k_n\cdot F_{\text{т}}}} = (15762)$

Рекомендукмая ном. частота вращения (об/мин): $n = n_{max}\cdot 0.95 = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 14974 \\ \hline\end{array}$

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

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

Ср. диаметр перед Т (м):

Ср. диаметр после Т (м):

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

Длина Л первой ступени Т (м):

Длина Л последней ступени Т (м):

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

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

Диаметр периферии после Т (м):

Диаметр корня после Т (м):

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

Частота вращения Т

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

$N_{\text{ст}}{}^{T} =$

	1
1	14.89

$\cdot 10^{6}$

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

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

Определение проточной части ОТ

Линейное распределение кольцевых площадей по сечениям:

$$F = \left|\begin{array}{l} \text{for } i \in 1..2Z+1 \\ \quad F_i = \dfrac{F_\text{Т} - F_\text{Г}}{st(Z,3) - 1} \cdot i + \left(F_\text{Г} - \dfrac{F_\text{Т} - F_\text{Г}}{st(Z,3) - 1}\right) \\ \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } a \in 2..3 \\ \qquad F_{st(i,a)} = F_{st(i,a-1)} \;\; \text{if } \text{ЗППЧ}_{i,a-1} = \text{"const"} \\ F \end{array}\right.$$

$F^{T} =$

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

$\cdot 10^{-6}$

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

$D^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

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

$R^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

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

$\overline{d}^T =$

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

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

	1	2	3
1	0	0	1

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

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

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

$\cdot 10^{-6}$

$\bar{d}_1 = 0.9194$ $\bar{d}_1 \leq 0.9 = 0$

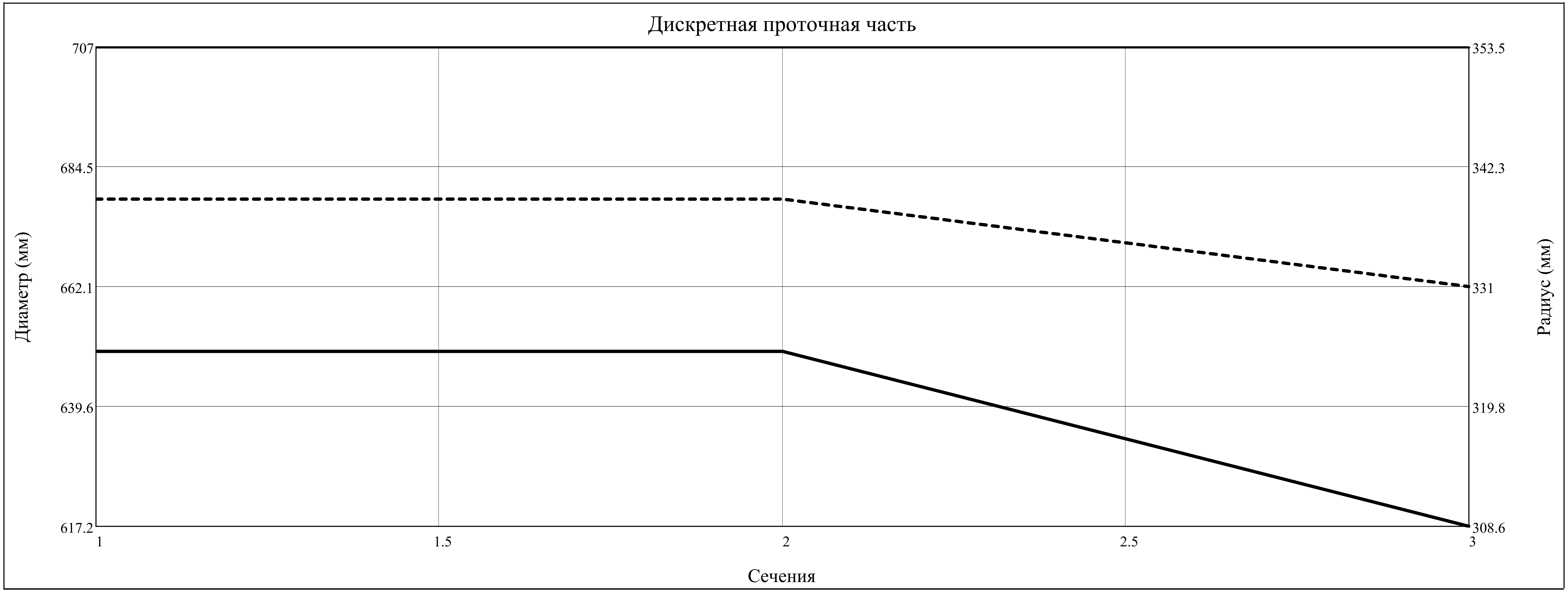
$\bar{d}^T =$

	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]:

$$\begin{pmatrix} B_{CA} \\ B_{PK} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \begin{pmatrix} B_{CA_i} \\ B_{PK_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{D_{st(i,2),av(N_r)} - 0.25\cdot h_{st(i,2)}}{16.4} \\ \dfrac{D_{st(i,3),av(N_r)}}{24} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} B_{CA} \\ B_{PK} \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

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

	1
1	40.9
2	27.6

$\cdot 10^{-3}$

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

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

	1	2
1	0.00	0.00
2	-0.00	30.70
3	0.00	-30.70

$\cdot°$

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 20\cdot° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 25\cdot° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -12\cdot° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -15\cdot° =$

	1	2
1	1	0

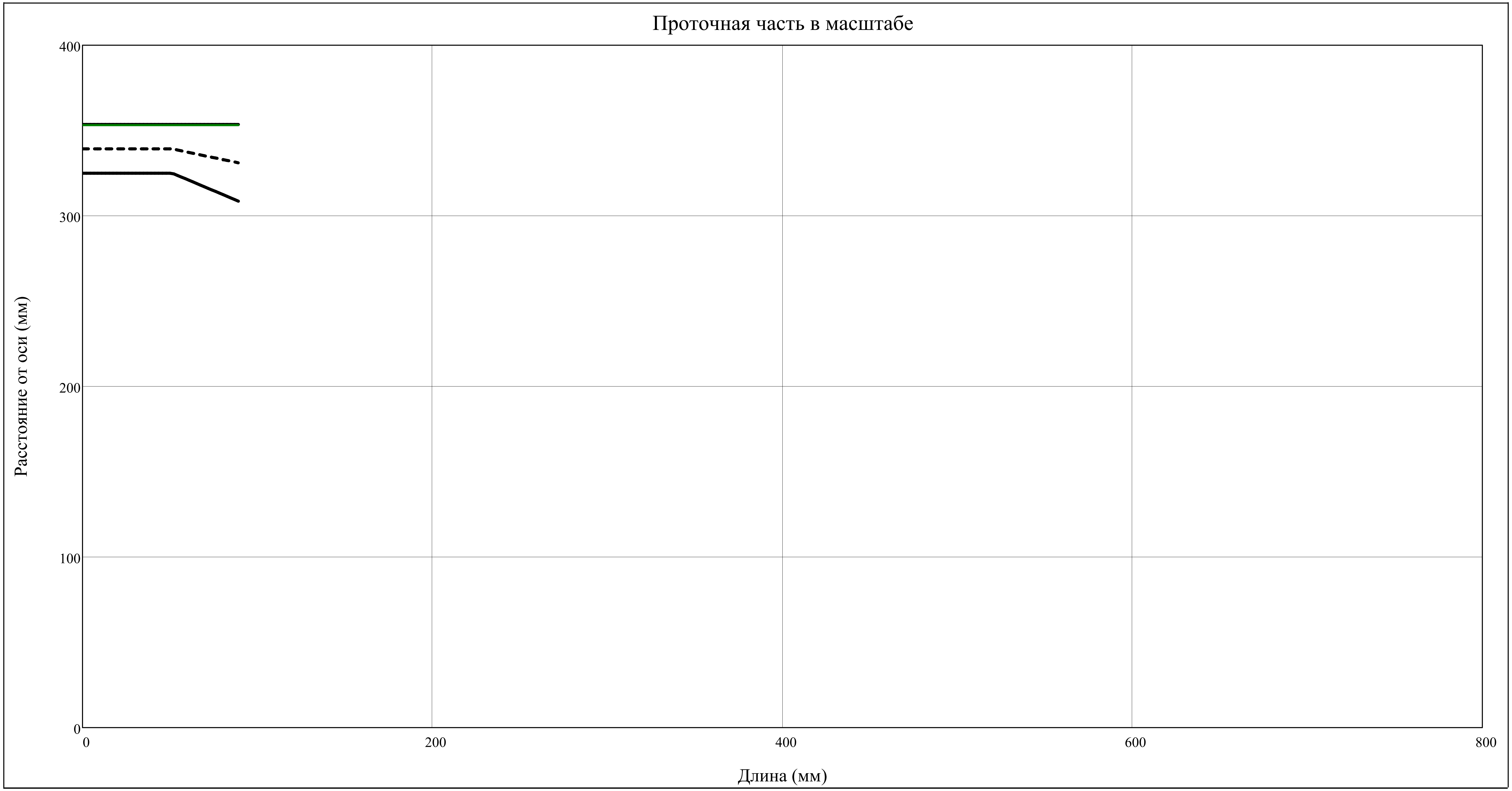
```
$\begin{pmatrix} x_{\text{ПЧ}} \\ y_{\text{ПЧпер}} \\ y_{\text{ПЧср}} \\ y_{\text{ПЧкор}} \\ y_{\text{Лпер}} \end{pmatrix} =$
    $c = 1$
    $x_{\text{ПЧ}_c} = 0$
    $y_{\text{ПЧпер}_c} = D_{st(c,1),N_r}$
    $y_{\text{Лпер}_c} = y_{\text{ПЧпер}_c} - \Delta_{r_c}$
    $y_{\text{ПЧср}_c} = D_{st(c,1),av(N_r)}$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

$$Length = \sum_{i=1}^{Z} B_{CA_i} + \sum_{i=1}^{Z} \Delta_{a_i} + \sum_{i=1}^{Z} B_{PK_i} = 78.8\cdot 10^{-3}$$

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

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

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



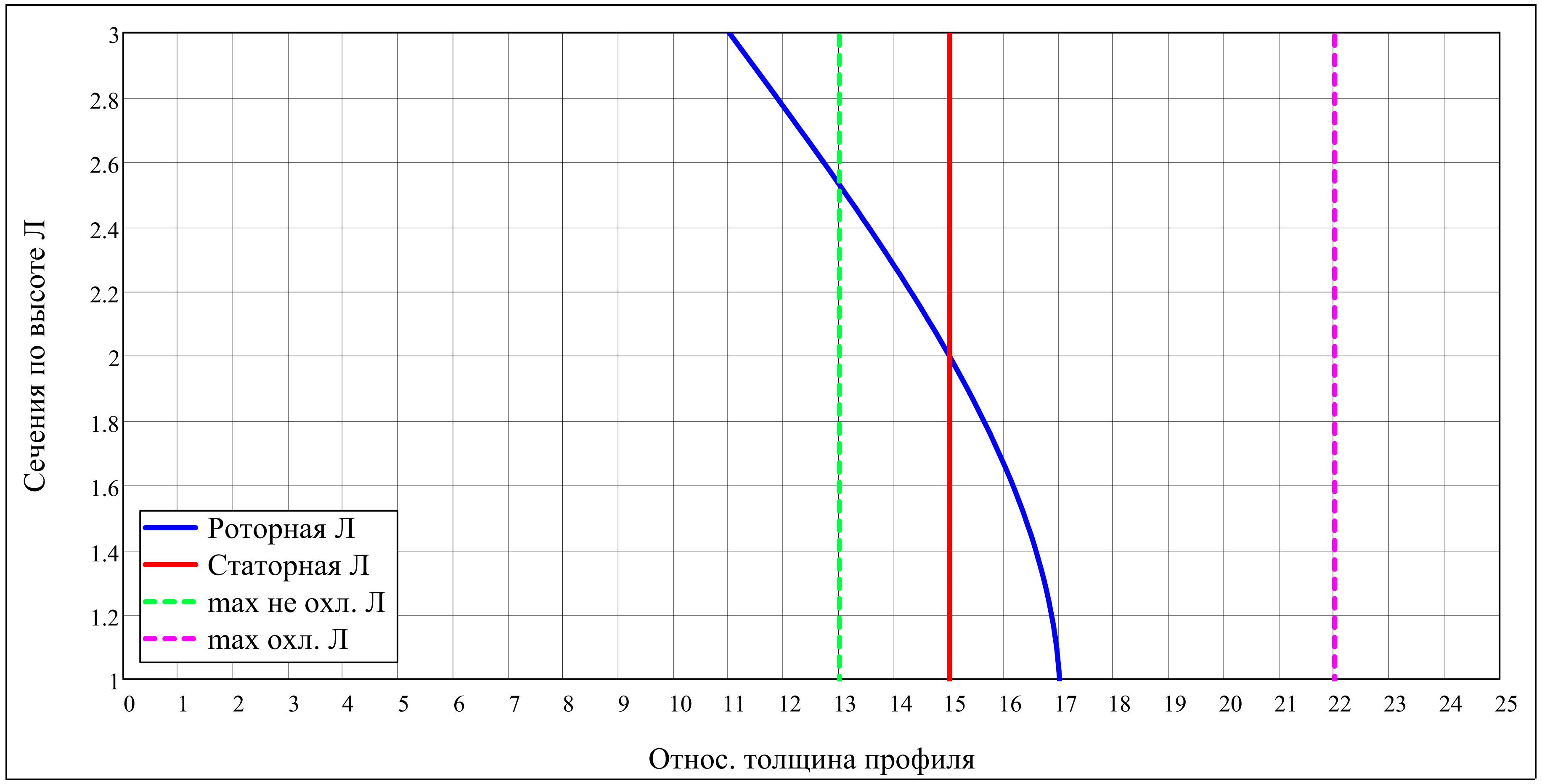
Определение проточной части ОТ

▾ Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

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

$$\bar{c}_{rotor.}(r) = \left| \begin{array}{ll} \text{interp}\left[\text{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix},\begin{pmatrix}17\\15\\11\end{pmatrix}\%\right],\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix},\begin{pmatrix}17\\15\\11\end{pmatrix}\%,r\right] & \text{if } T_{Л.доп} < T^*_г \\ \text{interp}\left[\text{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix},\begin{pmatrix}13\\11\\7\end{pmatrix}\%\right],\begin{pmatrix}1\\ av(N_r)\\ N_r\end{pmatrix},\begin{pmatrix}13\\11\\7\end{pmatrix}\%,r\right] & \text{otherwise} \end{array}\right.$$



```
(c̄stator)  =  | for i ∈ 1 .. Z
(c̄rotor )     |   for r ∈ 1 .. Nr
              |     (c̄stator[i,r])  =  (c̄stator.(r))
              |     (c̄rotor[i,r] )     (c̄rotor.(r) )
              | (c̄stator)
              | (c̄rotor )
```

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

	1
1	15.00
2	15.00
3	15.00

$\cdot\%$

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

	1
1	17.00
2	15.00
3	11.00

$\cdot\%$

```
$\begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{rotor} & \overline{r\_inlet}_{stator} \\ \overline{r\_outlet}_{rotor} & \overline{r\_outlet}_{stator} \end{pmatrix} =$
  for $i \in 1..Z$
    for $r \in 1..N_r$
      $\begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{stator_{i,r}} \\ \overline{r\_outlet}_{stator_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix} \cdot \overline{c}_{stator.}(r)$
      $\begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{rotor_{i,r}} \\ \overline{r\_outlet}_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.1 \end{pmatrix} \cdot \overline{c}_{rotor.}(r)$
  $\begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{rotor} & \overline{r\_inlet}_{stator} \\ \overline{r\_outlet}_{rotor} & \overline{r\_outlet}_{stator} \end{pmatrix}$
```

$\overline{r\_inlet}_{stator}{}^{T} =$

	1
1	6.000
2	6.000
3	6.000

$\cdot\%$

$\overline{r\_inlet}_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	5.100
2	4.500
3	3.300

$\cdot\%$

$\overline{r\_outlet}_{stator}{}^{T} =$

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

$\overline{r\_outlet}_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	1.700
2	1.500
3	1.100

$\cdot\%$

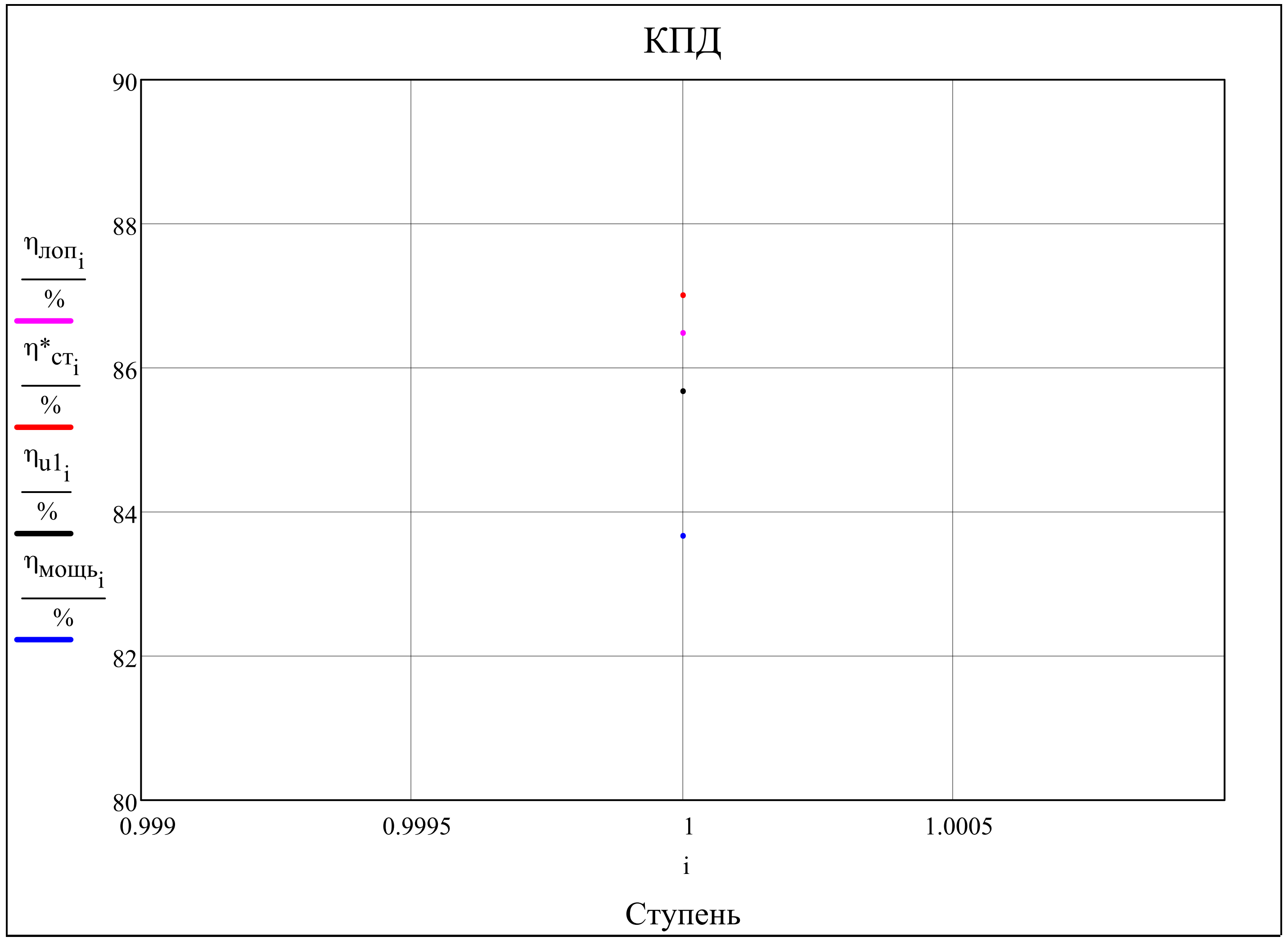
▲ Относ. толщины и радиусы профилей

Вывод результатов поступенчатого расчета продольной геометрии ОТ в EXCEL:

$$R_{L.cp} = \begin{pmatrix} \left| \begin{array}{ll} 0.16 & \text{if turbine = "ТВД"} \\ 0.13 & \text{otherwise} \end{array} \right. & 0.15 & 0.18 & 0.185 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}^T$$

Поступенчатый расчет ОТ

Параметры турбины



$$\eta_{лоп}^{T} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 86.49 \\ \hline\end{array} \cdot\%$$

$$\eta^{*}{}_{ст}^{T} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 87.01 \\ \hline\end{array} \cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\eta_{u1}^{T}, \eta_{u2}^{T}\right) = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 85.68 \\ \hline 2 & 86.99 \\ \hline\end{array} \cdot\%$$

$$\eta_{мощь}^{T} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 83.67 \\ \hline\end{array} \cdot\%$$

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

Степень понижения полного давления Т:
Степень понижения давления Т:

$$\begin{pmatrix}\pi^*_{T}\\ \pi_{T}\end{pmatrix} = P^*_{st(1,1),av(N_r)}\cdot\begin{bmatrix}\left(P^*_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{-1}\\ \left(P_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{-1}\end{bmatrix} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1\\ \hline 1 & 3.13\\ \hline 2 & 3.25\\ \hline\end{array}$$

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

$$\begin{pmatrix}H^*_{T}\\ H_{T}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\sum_{i=1}^{Z} H^*_{ст_i}\\ \sum_{i=1}^{Z} H_{ст_i}\end{pmatrix} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1\\ \hline 1 & 515.3\\ \hline 2 & 535.8\\ \hline\end{array}\cdot 10^{3}$$

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

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

Лопаточный КПД Т: $$\eta_{Tлоп} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} + \frac{\left(c_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^{2}}{2}}{H_T} = 86.53\cdot\%$$

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

Адиабатный КПД Т: $\eta^*_T = \frac{L_T}{H^*_T} = 87.06\cdot\%$

Политропический КПД Т: $\eta^*_{T.п} = \eta^*_{п}\left(\text{"расширение"}, \eta^*_T, \pi^*_T, k_{T.cp}\right) = 85.53\cdot\%$

Мощностной КПД Т: $$\eta_{Tмощь} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)}}{H_T} = 83.72\cdot\%$$

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

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

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

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

$$H_{\text{ст}}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 535.8 \end{array} \cdot 10^{3}$$

$$\text{stack}\left(H_{\text{stator}}{}^{T}, H_{\text{rotor}}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 450.1 \\ 2 & 86.8 \end{array} \cdot 10^{3}$$

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

$$G^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 32.193 & 33.050 & 33.351 \end{array}$$

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

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

$$\text{stack}\left(g_{\text{охлCA}}{}^{T}, g_{\text{охлPK}}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 26.61 \\ 2 & 9.11 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

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

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

$$G_{\text{cooling}} = 3.2$$

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

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

	1
1	2
2	2

$\text{submatrix}\left(k^{T},\text{av}\left(N_{r}\right),\text{av}\left(N_{r}\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	1.3	1.3	1.3

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

	1	2	3
1	2731.8	2414.3	872.3

$\cdot 10^{3}$

$\text{submatrix}\left(P^{T},\text{av}\left(N_{r}\right),\text{av}\left(N_{r}\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	2705.2	1019.2	840.1

$\cdot 10^{3}$

$\text{submatrix}\left(T{*}^{T},\text{av}\left(N_{r}\right),\text{av}\left(N_{r}\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	1773.0	1759.0	1394.2

$\text{submatrix}\left(T^{T},\text{av}\left(N_{r}\right),\text{av}\left(N_{r}\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	1769.2	1447.5	1382.3

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

	1	2	3
1	0.0	1509.9	1500.3

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

	1	2	3
1	0.0	1429.1	1379.3

$\text{submatrix}\left(v^{T},\text{av}\left(N_{r}\right),\text{av}\left(N_{r}\right),1,2Z+1\right) =$

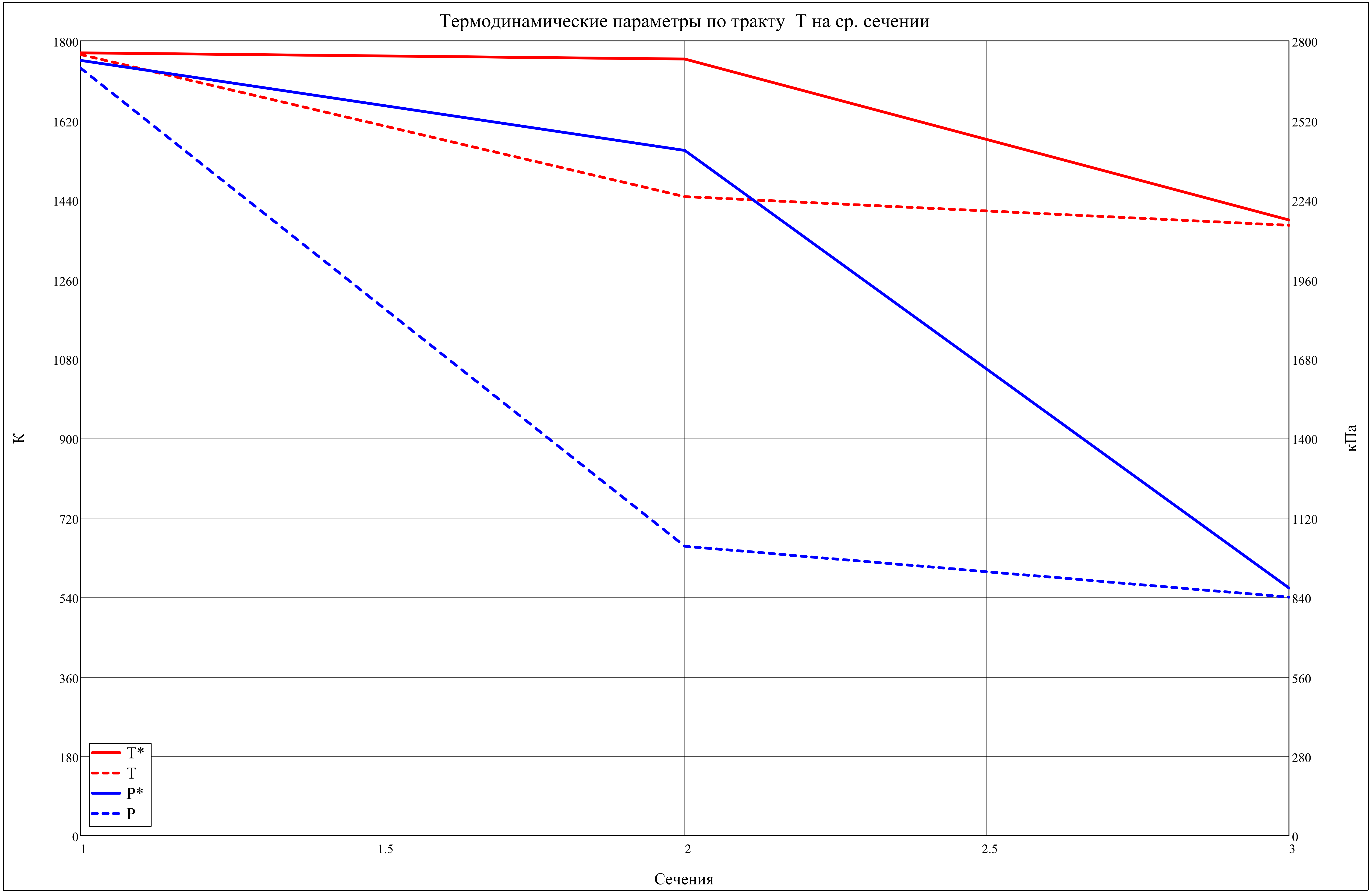
	1	2	3
1	0.189	0.410	0.486

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

	1	2	3
1	5.341	4.758	2.169

$\text{submatrix}\left(\rho^{T},\text{av}\left(N_{r}\right),\text{av}\left(N_{r}\right),1,2Z+1\right) =$

	1	2	3
1	5.300	2.441	2.058


Термодинамические параметры по тракту Т на ср. сечении
K
кПа
Сечения
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
T*
T
P*
P

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

	1	2	3
1	809.2	734.8	718.8

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

	1	2	3
1	758.2	756.5	673.8

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

	1	2	3
1	0.0	700.9	699.0

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

	1	2	3
1	100.0	891.8	173.6

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

	1	2	3
1	0.0	863.5	-1.9

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

	1	2	3
1	100.0	222.9	173.6

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

	1	2	3
1	0.0	398.7	546.4

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

	1	2	3
1	0.0	330.6	518.1

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

	1	2	3
1	0.0	222.9	173.6

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

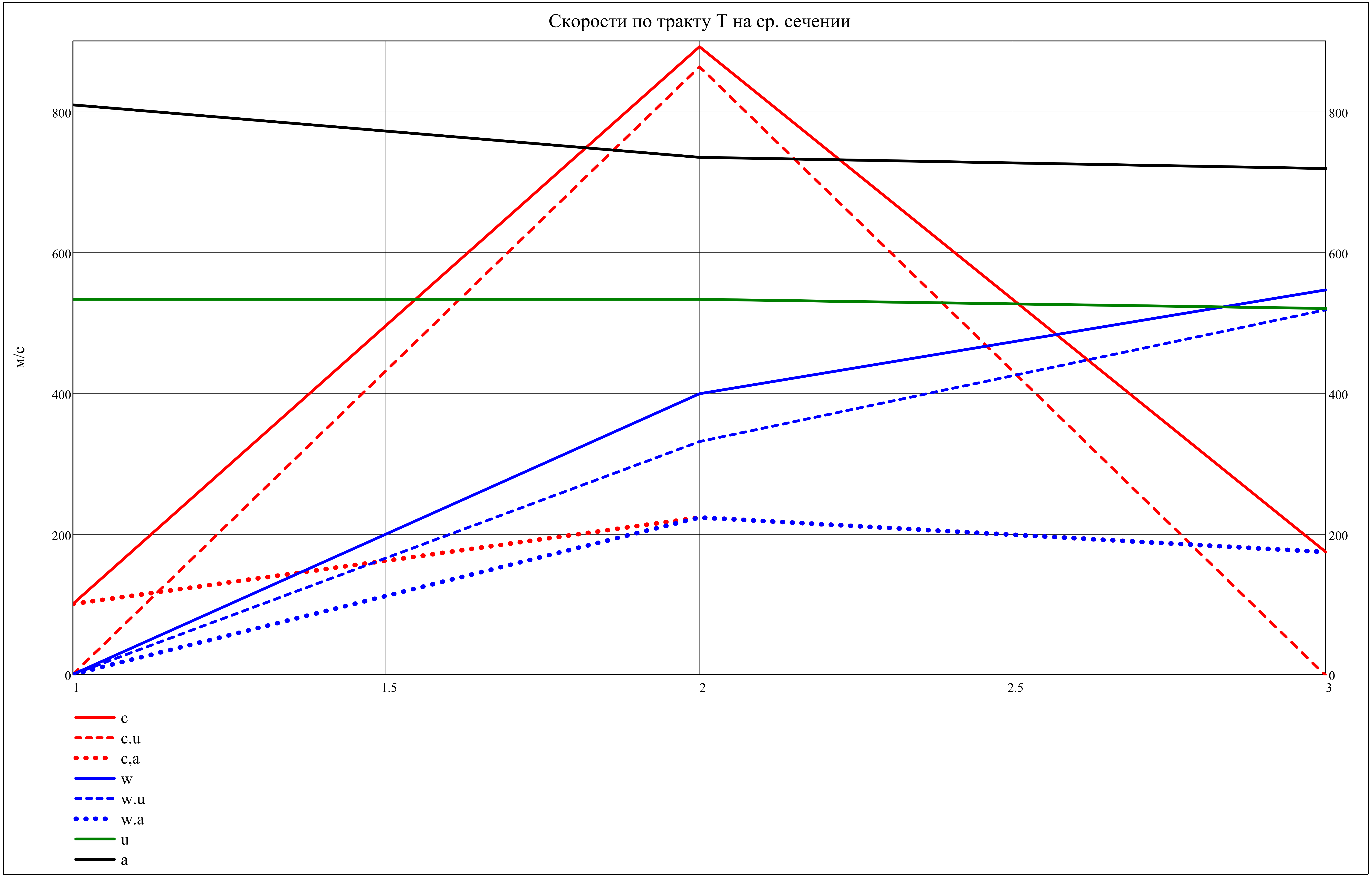
	1	2
1	1035.2	948.8

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

	1	2	3
1	0.0	0.0	564.9

$u^{T} =$

	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	14.48	90.64						

$\cdot°$

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.00	33.99	18.53										

$\cdot°$

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

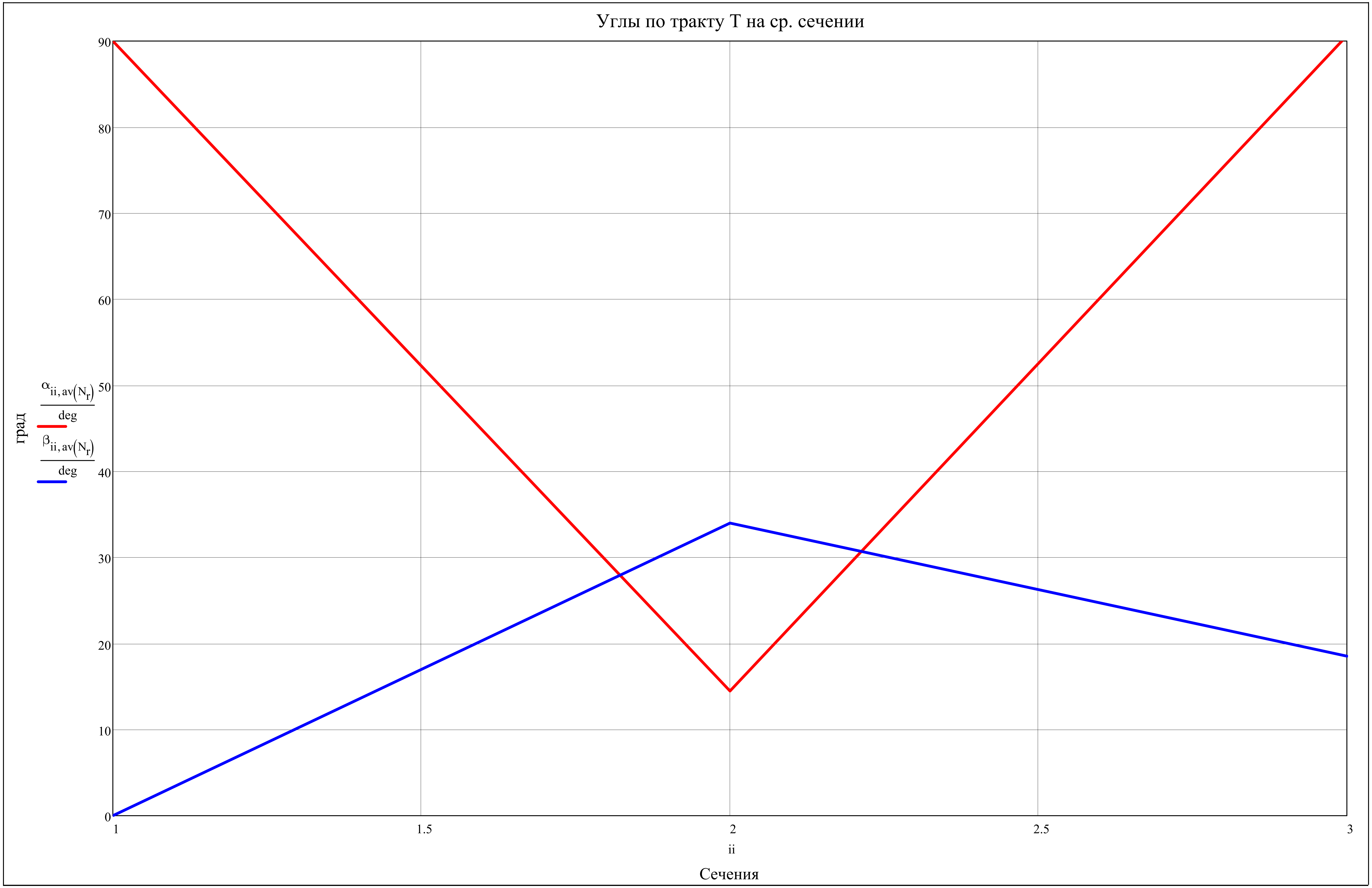
	1	2	3	4	5	6
1	-75.52					

$\cdot°$

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

	1	2	3	4	5	6
1	-15.47					

$\cdot°$


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

$$\mathrm{submatrix}\left(\lambda_c, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.1319 & 1.1789 & 0.2577 \\ \hline \end{array}$$

$$\mathrm{submatrix}\left(\lambda_w, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.0000 & 0.5689 & 0.7817 \\ \hline \end{array}$$

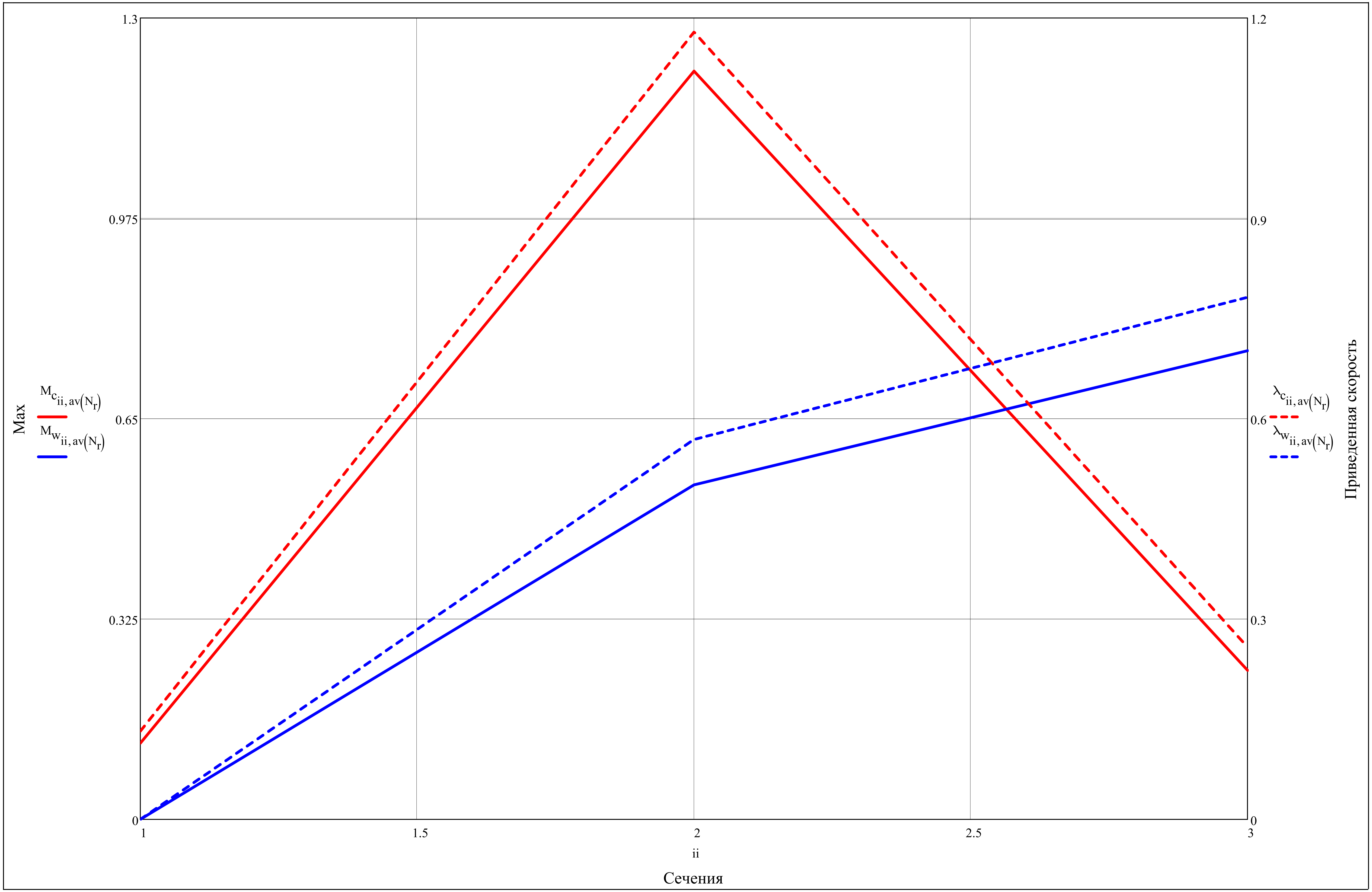
$$\mathrm{submatrix}\left(M_c, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.1236 & 1.2137 & 0.2416 \\ \hline \end{array}$$

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

$$\mathrm{submatrix}\left(M_w, 1, 2Z+1, \mathrm{av}\left(N_r\right), \mathrm{av}\left(N_r\right)\right)^T = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0.0000 & 0.5427 & 0.7602 \\ \hline \end{array}$$

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

$$\mathrm{stack}\left({\upsilon_{stator}}^T, {\upsilon_{rotor}}^T\right) = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 37.02 \\ \hline 2 & 67.06 \\ \hline \end{array} \cdot ^\circ$$


1.3
0.975
0.65
0.325
0
Max
$M_{c_{ii,av}}(N_r)$
$M_{w_{ii,av}}(N_r)$
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

$$t_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 56.7 \\ 2 & 59.2 \\ 3 & 61.7 \end{array} \cdot 10^{-3} \qquad t_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 20.5 \\ 2 & 21.7 \\ 3 & 22.9 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

$$\mathrm{submatrix}\left(chord_{rotor}^{T}, av\left(N_r\right), av\left(N_r\right), 1, Z\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 30.0 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{stack}\left(Z_{stator}^{T}, Z_{rotor}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 36 \\ 2 & 97 \end{array}$$

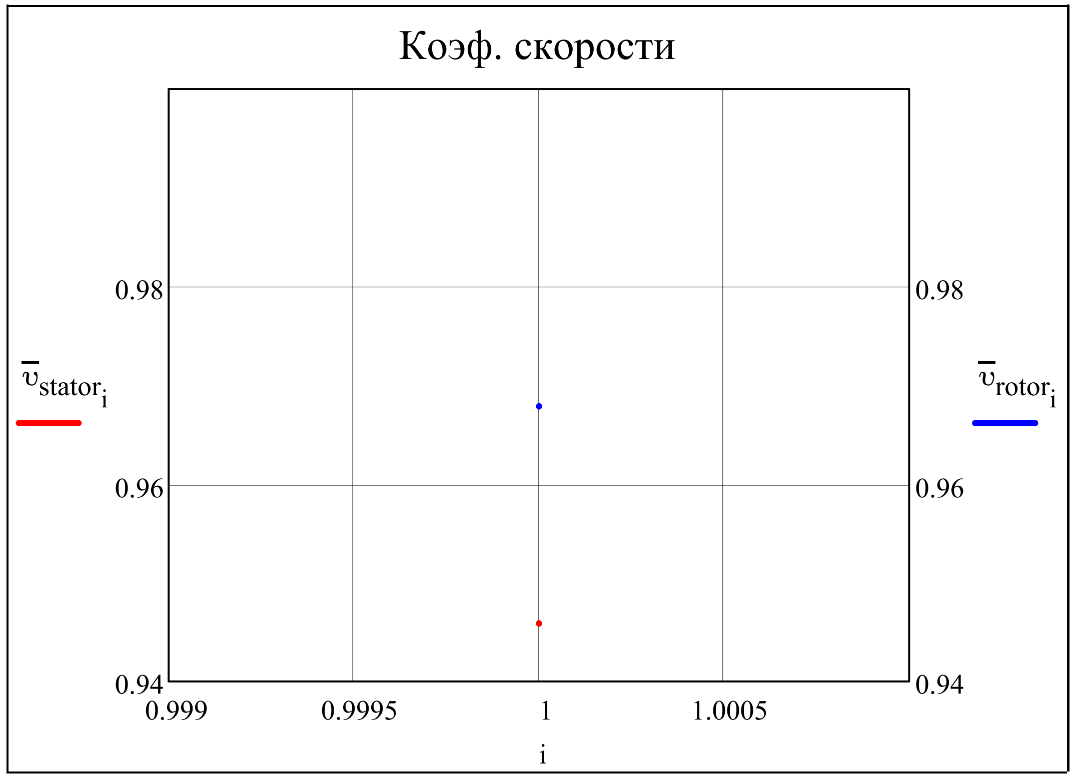
$$\mathrm{stack}\left(t_{оптCA}^{T}, t_{оптPK}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.872 \\ 2 & 0.725 \end{array}$$

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

$$\frac{t_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}}{chord_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}} = \boxed{0.725} \qquad 0.7 \le \frac{t_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}}{chord_{rotor_{i,av\left(N_r\right)}}} \le 1 = \boxed{1}$$

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

	1
1	0.9459
2	0.9679



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

	1
1	1.398
2	2.622

$\cdot\%$

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

	1
1	2.756
2	1.303

$\cdot\%$

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

	1
1	-0.135
2	0.111

$\cdot\%$

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

	1
1	2.415
2	0.023

$\cdot\%$

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

	1
1	1.452
2	0.806

$\cdot\%$

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

	1
1	1.857
2	1.207

$\cdot\%$

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

	1
1	0.784
2	0.249

$\cdot\%$

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

	1
1	8.731
2	1.880

$\cdot\%$

$\xi_{\text{вых}}{}^{T} =$

	1
1	2.814

$\cdot\%$

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

	1
1	2.480

$\cdot\%$

$\xi_{\text{тр.в}}{}^{T} =$

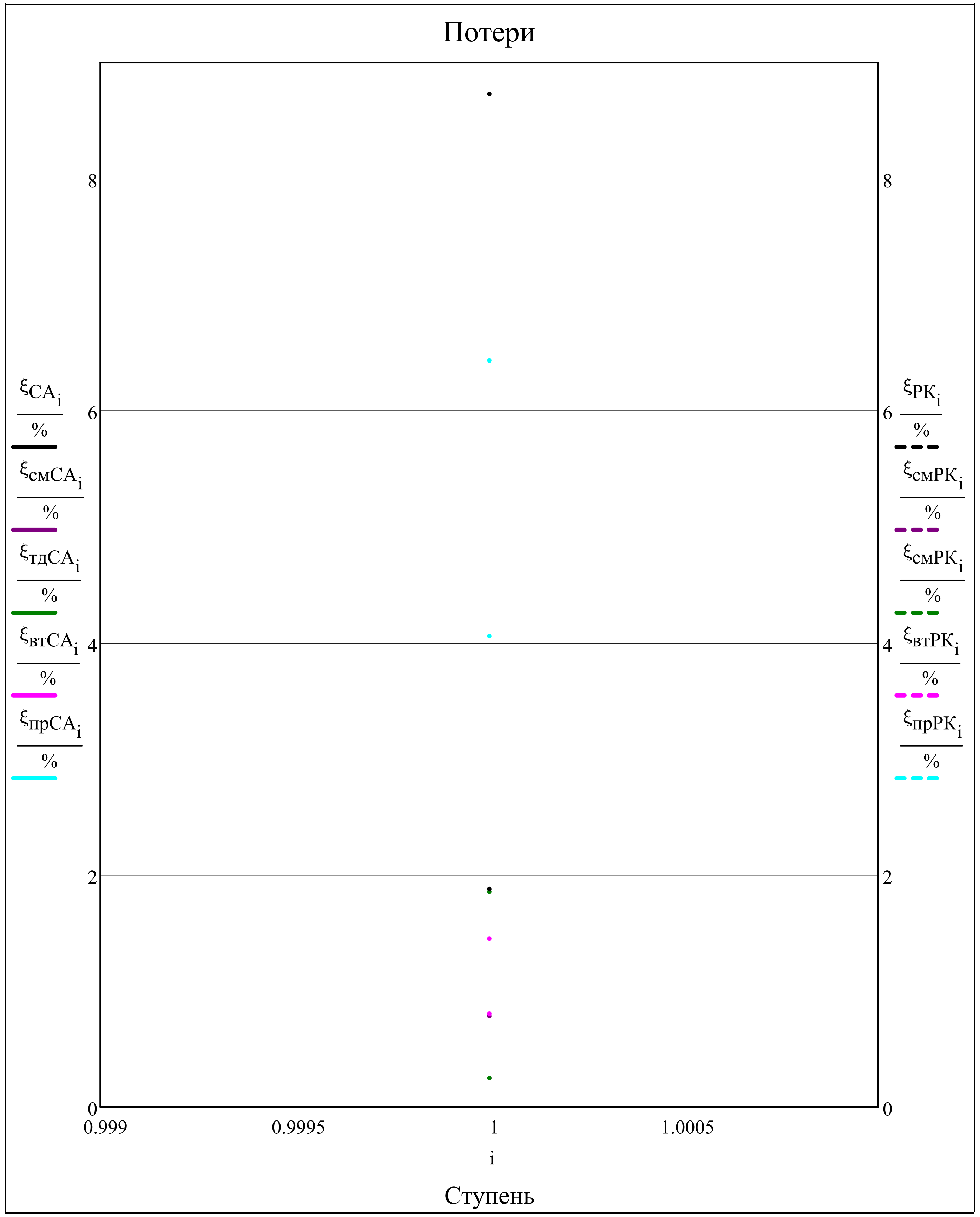
	1
1	0.834

$\cdot\%$

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

	1
1	6.434
2	4.059

$\cdot\%$



▲ Параметры турбины

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

▼ Выбор закона профилирования Л по высоте

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

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

$m^T =$

	1	2	3	4	5	6
1	0.8868	-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 $r \in 1..N_r$
      $A_{st(i,a),r} = \left(1 - R_{L_{i,av(N_r)}}\right)\cdot\omega\cdot\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{m_i+1}$
      $B_{st(i,a),r} = \dfrac{Lu_{ст_i}}{2\cdot\omega}$
      $c_{u_{st(i,a),r}} =$
        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 $(a = 2)$
          $\dfrac{u_{st(i,a-1),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}} + u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}} - u_{st(i,a-1),r}\cdot c_{u_{st(i,a-1),r}}}{u_{st(i,a),r}}$   if $(a = 1) \vee (a = 3)$
        otherwise
          $\dfrac{A_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)}$   if $(a = 2)$
          $-\dfrac{A_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)}$   if $(a = 1) \vee (a = 3)$
      $c_{a_{st(i,a),r}} =$
        if $m_i = -1$
          $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a),r}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] - 4\cdot A_{st(i,a),r}\cdot B_{st(i,a),r}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}$   if $(a = 2)$
          $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a),r}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] + 4\cdot A_{st(i,a),r}\cdot B_{st(i,a),r}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}$   if $(a = 1) \vee (a = 3)$
```

if $m_i = 0$

$$\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a),r}\right)^2\cdot\left(\ln\left(R_{st(i,a),r}\right) - \ln\left(R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\right)\right) + 2\cdot A_{st(i,a),r}\cdot B_{st(i,a),r}\cdot\left(\frac{1}{R_{st(i,a),r}} - \frac{1}{R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)} \quad \text{if } (a = 2)$$

$$\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a),r}\right)^2\cdot\left(\ln\left(R_{st(i,a),r}\right) - \ln\left(R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\right)\right) - 2\cdot A_{st(i,a),r}\cdot B_{st(i,a),r}\cdot\left(\frac{1}{R_{st(i,a),r}} - \frac{1}{R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)} \quad \text{if } (a = 1) \vee (a = 3)$$

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

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

$$\sqrt{\begin{aligned}&\left(c_{a_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^2 \ldots\\
&+\left[1 - \left(\overline{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[\left(u_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\right)^2\cdot\left[1 - \left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^2\right] - 2\cdot c_{u_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\cdot u_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\cdot\left[1 - \left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^{1-m_i}\right]\right] \ldots\\
&+\left[1 - \left(\overline{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[1 - \frac{1}{\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^2}\right]\cdot\left(c_{u_{st(i,a-1),av\left(N_r\right)}} + c_{u_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^2 \ldots\\
&+ -2\cdot c_{u_{st(i,a-1),av\left(N_r\right)}}\cdot\left(c_{u_{st(i,a-1),av\left(N_r\right)}} + c_{u_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)\cdot\left[1 - \frac{2}{m_i + 1}\cdot\left(\overline{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2\right]\cdot\left[1 - \frac{1}{\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^{m_i+1}}\right] \ldots\\
&+\left(c_{u_{st(i,a-1),av\left(N_r\right)}}\right)^2\cdot\left[1 - \frac{\left(\overline{\upsilon}_{stator_i}\right)^2\cdot\left(\overline{\upsilon}_{rotor_i}\right)^2}{m_i}\right]\cdot\left[1 - \frac{1}{\left(\frac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}}\right)^{2\cdot m_i}}\right]\end{aligned}} \quad \text{if } (a = 1) \vee (a = 3)$$

otherwise

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

$$\sqrt{\left(c\right)^2 + \frac{A_{st(i,a),r}\cdot\left(m_i - 1\right)\cdot\left[\begin{aligned}&A_{st(i,a),r}\cdot\left(1 + m_i\right)\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^{2\cdot m_i+1}\cdot\left(R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\right) - \left(R_{st(i,a),r}\right)\cdot\left(R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\right)^{2\cdot m_i+1}\right] \ldots\\ &+ -2\cdot B_{st(i,a),r}\cdot m_i\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^{2\cdot m_i+1}\cdot\left(R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\right)^{m_i} - \left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}\cdot\left(R_{st(i,a),av\left(N_r\right)}\right)^{2\cdot m_i+1}\right]\end{aligned}\right]}{}} \quad \text{if } (a = 1) \vee (a = 3)$$

```
$\left(-a_{st(i,a),av(N_r)}\right)$                    $m_i\cdot(m_i+1)\cdot\left(R_{st(i,a),r}\cdot R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{2\cdot m_i+1}$
for $i \in 1..2\cdot Z+1$
  for $r \in 1..N_r$
    $\begin{pmatrix} c_{u_{i,r}} \\ c_{a_{i,r}} \end{pmatrix} = c_{i,av(N_r)}\cdot\begin{pmatrix} \cos(\alpha_{i,av(N_r)}) \\ \sin(\alpha_{i,av(N_r)}) \end{pmatrix}$ if $(i = 1)$
    $P*_{i,r} = P*_{i,av(N_r)}$
    $T*_{i,r} = T*_{i,av(N_r)}$
    $\rho*_{i,r} = \dfrac{P*_{i,r}}{R_{газ}(\alpha_{ox_i}, Fuel)\cdot T*_{i,r}}$
    $k_{i,r} = k_{ад}\left(Cp_{воздух}(P*_{i,r}, T*_{i,r}), R_{газ}(\alpha_{ox_i}, Fuel)\right)$
    $a*_{c_{i,r}} = \sqrt{\dfrac{2\cdot k_{i,r}}{k_{i,r}+1}\cdot R_{газ}(\alpha_{ox_i}, Fuel)\cdot T*_{i,r}}$
    $\alpha_{i,r} = triangle\left(c_{a_{i,r}}, c_{u_{i,r}}\right)$
    $c_{i,r} = \dfrac{c_{a_{i,r}}}{\sin(\alpha_{i,r})}$
    $\lambda_{c_{i,r}} = \dfrac{c_{i,r}}{a*_{c_{i,r}}}$
    $\begin{pmatrix} T_{i,r} \\ P_{i,r} \\ \rho_{i,r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T*_{i,r}\cdot ГДФ("T", \lambda_{c_{i,r}}, k_{i,r}) \\ P*_{i,r}\cdot ГДФ("P", \lambda_{c_{i,r}}, k_{i,r}) \\ \rho*_{i,r}\cdot ГДФ("\rho", \lambda_{c_{i,r}}, k_{i,r}) \end{pmatrix}$
    $a_{зв_{i,r}} = \sqrt{k_{i,r}\cdot R_{газ}(\alpha_{ox_i}, Fuel)\cdot T_{i,r}}$
    $M_{c_{i,r}} = \dfrac{c_{i,r}}{a_{зв_{i,r}}}$
    $\beta_{i,r} = triangle\left(c_{a_{i,r}}, u_{i,r} - c_{u_{i,r}}\right)$
    $w_{i,r} = \dfrac{c_{a_{i,r}}}{\sin(\beta_{i,r})}$
    $\begin{pmatrix} w_{u_{i,r}} \\ w_{a_{i,r}} \end{pmatrix} = w_{i,r}\cdot\begin{pmatrix} \cos(\beta_{i,r}) \\ \sin(\beta_{i,r}) \end{pmatrix}$
    $(c_{i,r})^2 - (w_{i,r})^2$
```

```
        $T^*_{w_{i,r}} = T^*_{i,r} - \frac{}{2 \cdot \frac{k_{i,r}}{k_{i,r} - 1} \cdot R_{газ}\left(\alpha_{ox_i}, Fuel\right)}$
        $a^*_{w_{i,r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_{i,r}}{k_{i,r} + 1} \cdot R_{газ}\left(\alpha_{ox_i}, Fuel\right) \cdot T^*_{w_{i,r}}}$
        $\lambda_{w_{i,r}} = \frac{w_{i,r}}{a^*_{w_{i,r}}}$
        $M_{w_{i,r}} = \frac{w_{i,r}}{a_{зв_{i,r}}}$
for $i \in 1..Z$
    for $r \in 1..N_r$
        $\begin{pmatrix} \Delta c_{a_{st(i,1),r}} \\ \Delta c_{a_{st(i,2),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{a_{st(i,2),r}} - c_{a_{st(i,1),r}} \\ c_{a_{st(i,3),r}} - c_{a_{st(i,2),r}} \end{pmatrix}$
        $R_{L_{i,r}} = 1 - \frac{c_{u_{st(i,2),r}} - c_{u_{st(i,3),r}}}{u_{st(i,2),r} + u_{st(i,3),r}}$
        $\varepsilon_{stator_{i,r}} =$
            $\alpha_{st(i,2),r} - \alpha_{st(i,1),r}$  if $\alpha_{st(i,2),r} \geq \frac{\pi}{2}$
            $\alpha_{st(i,1),r} - \alpha_{st(i,2),r}$  otherwise
        $\varepsilon_{rotor_{i,r}} =$
            $\beta_{st(i,3),r} - \beta_{st(i,2),r}$  if $\beta_{st(i,3),r} \geq \frac{\pi}{2}$
            $\beta_{st(i,2),r} - \beta_{st(i,3),r}$  otherwise
$\begin{pmatrix} P^* & T^* & T & \rho^* & k & a^*_c & a_{зв} & c & c_u & c_a & \Delta c_a & \alpha & \lambda_c & \lambda_w & \varepsilon_{stator} \\ P & T^*_w & T & \rho & R_L & a^*_w & a_{зв} & w & w_u & w_a & \Delta c_a & \beta & M_c & M_w & \varepsilon_{rotor} \end{pmatrix}^T$
```

▲ Расчет Л по высоте

Результаты расчета Л по высоте

$$P*^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2731.8 & 2414.3 & 872.3 \\ 2 & 2731.8 & 2414.3 & 872.3 \\ 3 & 2731.8 & 2414.3 & 872.3 \end{array} \cdot 10^{3}$$

$$T*^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1773 & 1759 & 1394 \\ 2 & 1773 & 1759 & 1394 \\ 3 & 1773 & 1759 & 1394 \end{array}$$

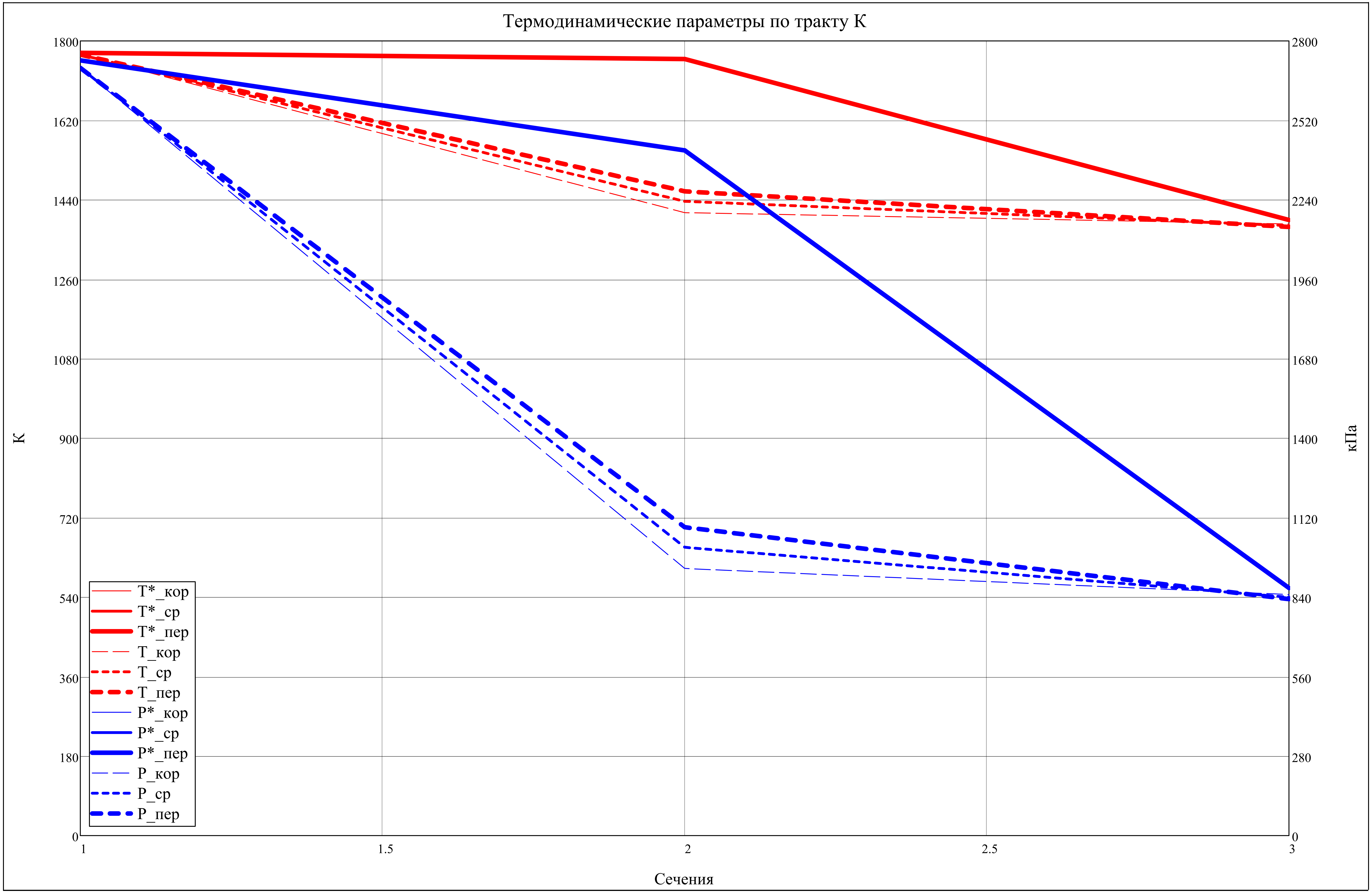
$$T*_{w}{}^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1878.6 & 1493.4 & 1491.1 \\ 2 & 1888.0 & 1501.0 & 1507.7 \\ 3 & 1897.9 & 1509.2 & 1525.3 \end{array}$$

$$\rho*^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 5.341 & 4.758 & 2.169 \\ 2 & 5.341 & 4.758 & 2.169 \\ 3 & 5.341 & 4.758 & 2.169 \end{array}$$

$$P^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2705.2 & 941.1 & 849.4 \\ 2 & 2705.2 & 1016.0 & 840.1 \\ 3 & 2705.2 & 1086.4 & 833.1 \end{array} \cdot 10^{3}$$

$$T^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1769 & 1411 & 1385 \\ 2 & 1769 & 1437 & 1382 \\ 3 & 1769 & 1459 & 1379 \end{array}$$

$$\rho^{T} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 5.301 & 2.312 & 2.125 \\ 2 & 5.301 & 2.451 & 2.108 \\ 3 & 5.301 & 2.580 & 2.094 \end{array}$$


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

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

$$R_L{}^T = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.1013 \\ 2 & 0.1780 \\ 3 & 0.2452 \end{array}$$

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

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

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

$u^T =$

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

$c^T =$

	1	2	3
1	100.0	926.4	146.2
2	100.0	891.8	173.6
3	100.0	859.8	191.9

$c_u{}^T =$

	1	2	3
1	0.0	896.9	2.5
2	0.0	863.5	-1.9
3	0.0	832.5	-5.7

$c_a{}^T =$

	1	2	3
1	100.0	231.6	146.2
2	100.0	222.9	173.6
3	100.0	215.0	191.8

$\Delta c_a{}^T =$

	1	2
1	131.6	-85.4
2	122.9	-49.3
3	115.0	-23.1

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

	1	2	3
1	783.4	698.5	699.2
2	785.3	700.3	703.1
3	787.4	702.2	707.2

$a_{зв}{}^T =$

	1	2	3
1	816.1	729.0	725.3
2	816.1	735.5	724.4
3	816.1	741.3	723.7

$w^T =$

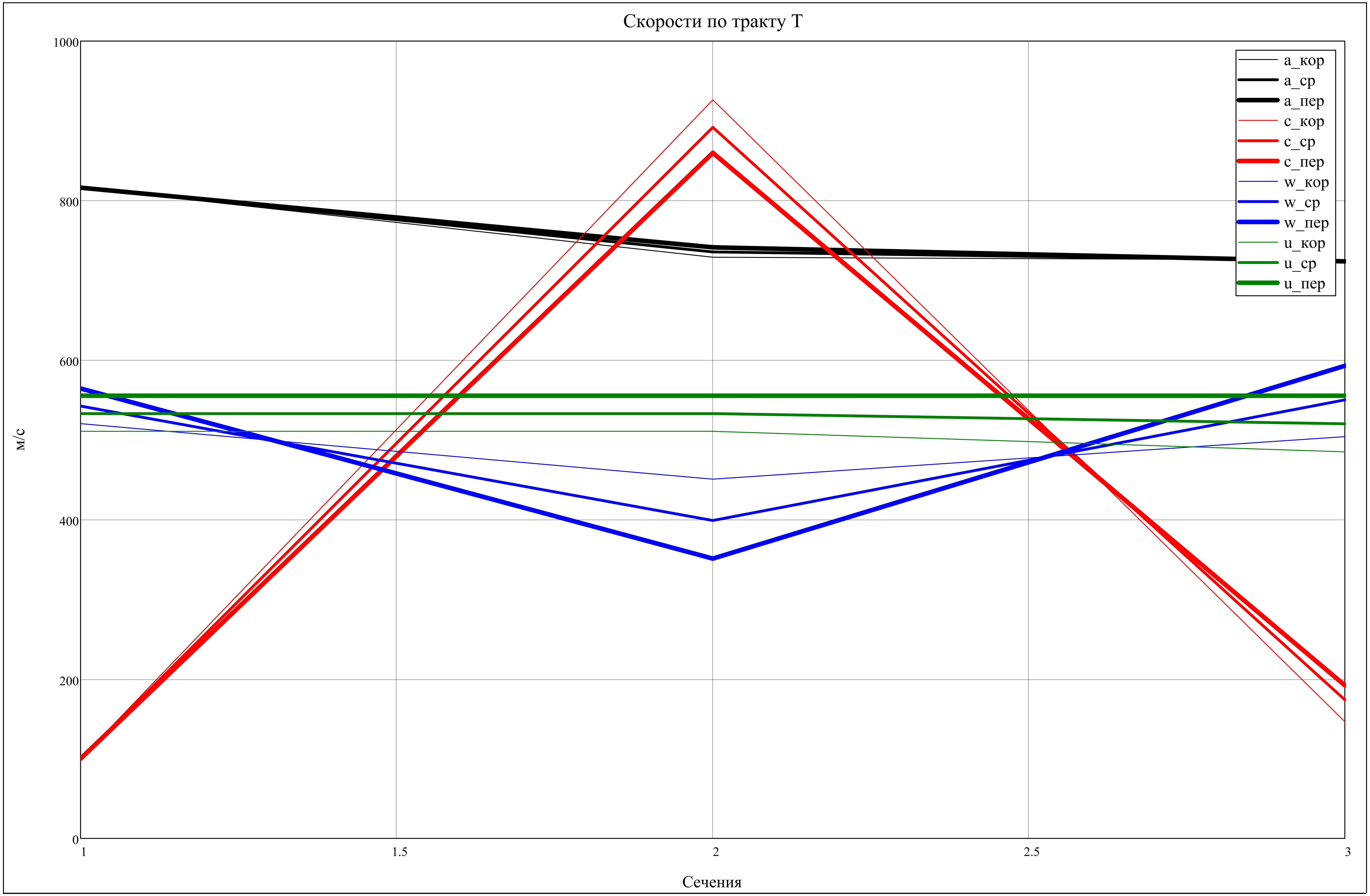
	1	2	3
1	520.2	450.5	503.9
2	542.2	398.7	550.1
3	564.2	350.8	592.8

$w_u{}^T =$

	1	2	3
1	510.5	-386.5	482.2
2	532.9	-330.6	521.9
3	555.2	-277.3	560.9

$w_a{}^T =$

	1	2	3
1	100.0	231.6	146.2
2	100.0	222.9	173.6
3	100.0	215.0	191.8


Скорости по тракту Т
м/с
1000
800
600
400
200
0
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

$$\alpha^{T} = \begin{array}{|c|c|c|c|}\hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 90.00 & 14.48 & 89.02 \\ \hline 2 & 90.00 & 14.48 & 90.64 \\ \hline 3 & 90.00 & 14.48 & 91.70 \\ \hline \end{array} \cdot\circ$$

$$\beta^{T} = \begin{array}{|c|c|c|c|}\hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 11.08 & 149.07 & 16.87 \\ \hline 2 & 10.63 & 146.01 & 18.40 \\ \hline 3 & 10.21 & 142.22 & 18.88 \\ \hline \end{array} \cdot\circ$$

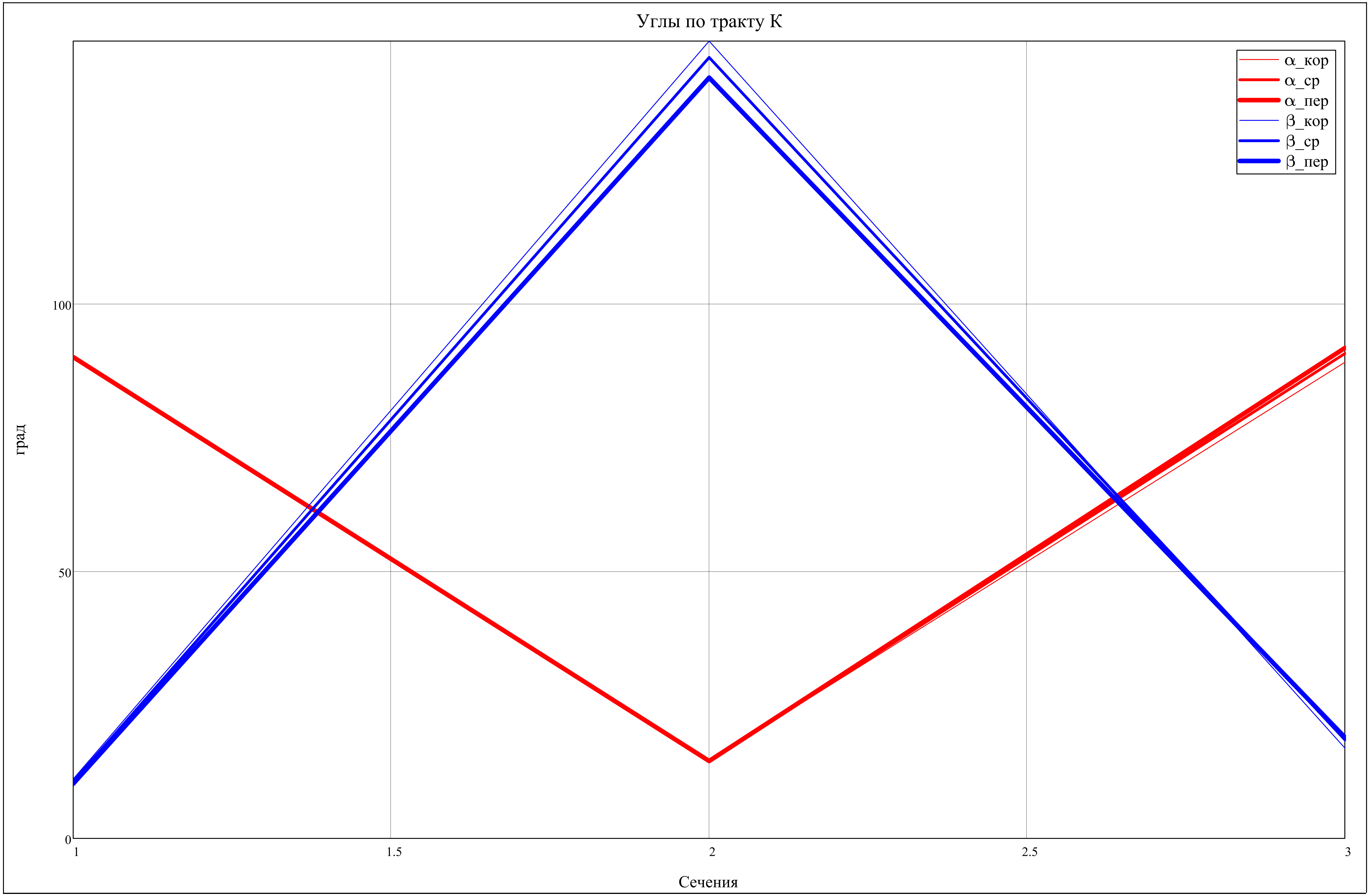
$$80\cdot\circ \le \alpha^{T} = \begin{array}{|c|c|c|c|}\hline & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 2 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 3 & 1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

[1, c.78]

Угол поворота потока:

$$\varepsilon_{stator}{}^{T} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 75.52 \\ \hline 2 & 75.52 \\ \hline 3 & 75.52 \\ \hline \end{array} \cdot\circ$$

$$\varepsilon_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{|c|c|}\hline & 1 \\ \hline 1 & 132.20 \\ \hline 2 & 127.61 \\ \hline 3 & 123.34 \\ \hline \end{array} \cdot\circ$$


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

$\lambda_c^T =$

	1	2	3
1	0.131	1.222	0.216
2	0.131	1.176	0.257
3	0.131	1.134	0.284

$M_c^T =$

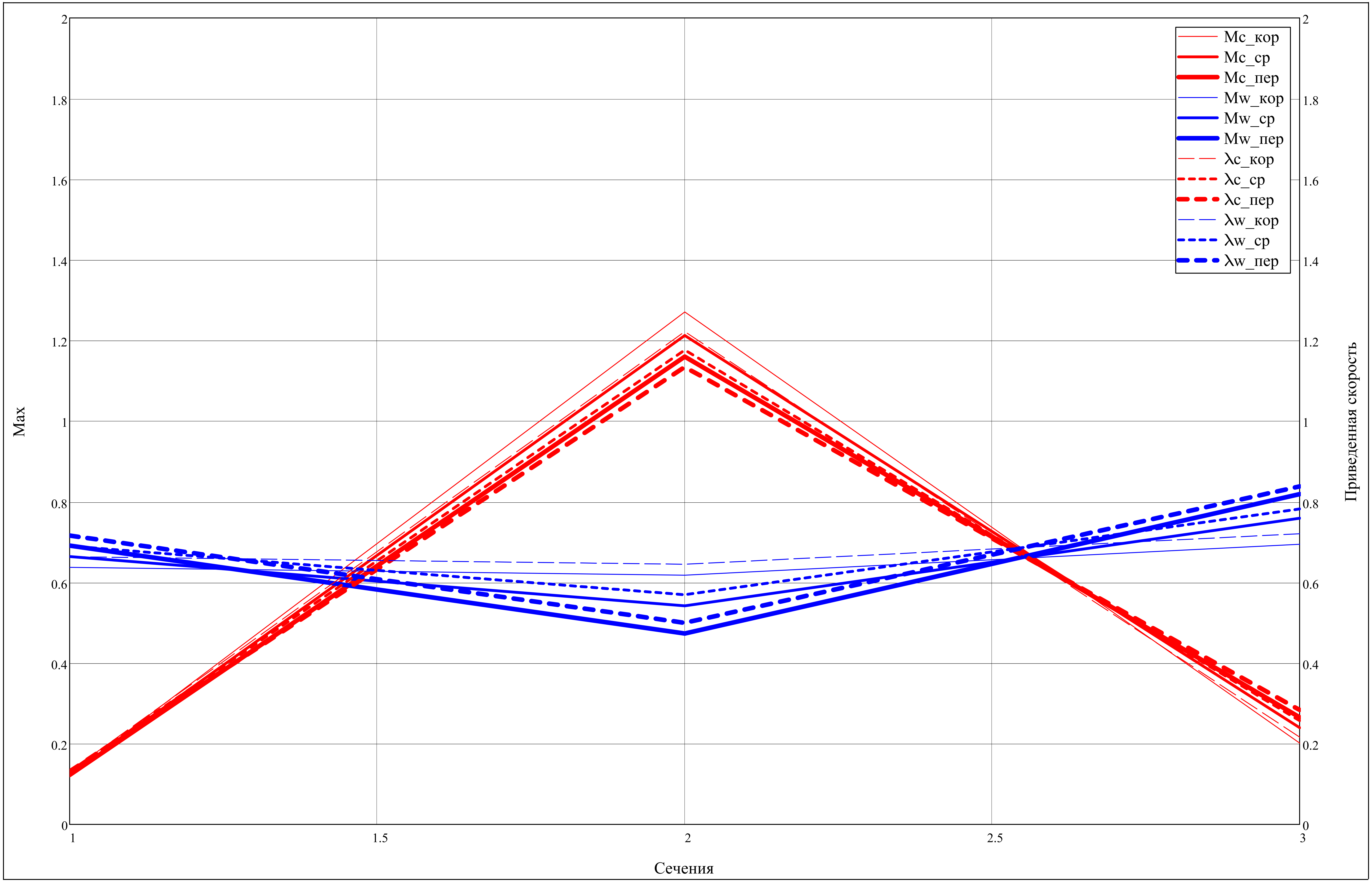
	1	2	3
1	0.123	1.271	0.202
2	0.123	1.212	0.240
3	0.123	1.160	0.265

$\lambda_w^T =$

	1	2	3
1	0.664	0.645	0.721
2	0.690	0.569	0.782
3	0.717	0.500	0.838

$M_w^T =$

	1	2	3
1	0.6	0.6	0.7
2	0.7	0.5	0.8
3	0.7	0.5	0.8


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

Результаты расчета Л по высоте

Вывод результатов расчета параметров потока по высоте Л

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

Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

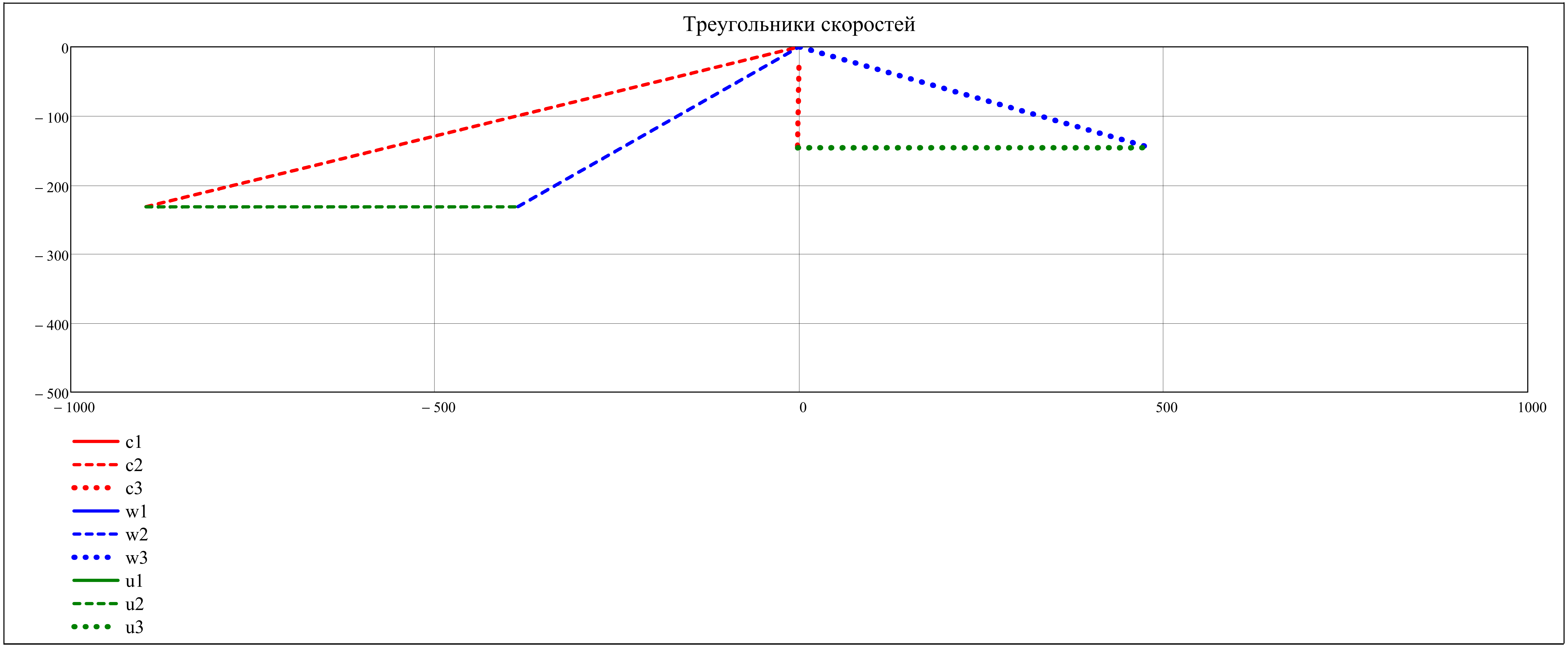
$$\Delta_w(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{l} -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \ \ \text{if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) \ge 0\right) \wedge \left(-\left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right| \le v \le 0\right) \wedge (j \ne 1) \\ -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \ \ \text{if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) < 0\right) \wedge \left(0 \le v \le \left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right|\right) \wedge (j \ne 1) \end{array} \right.$$

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

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

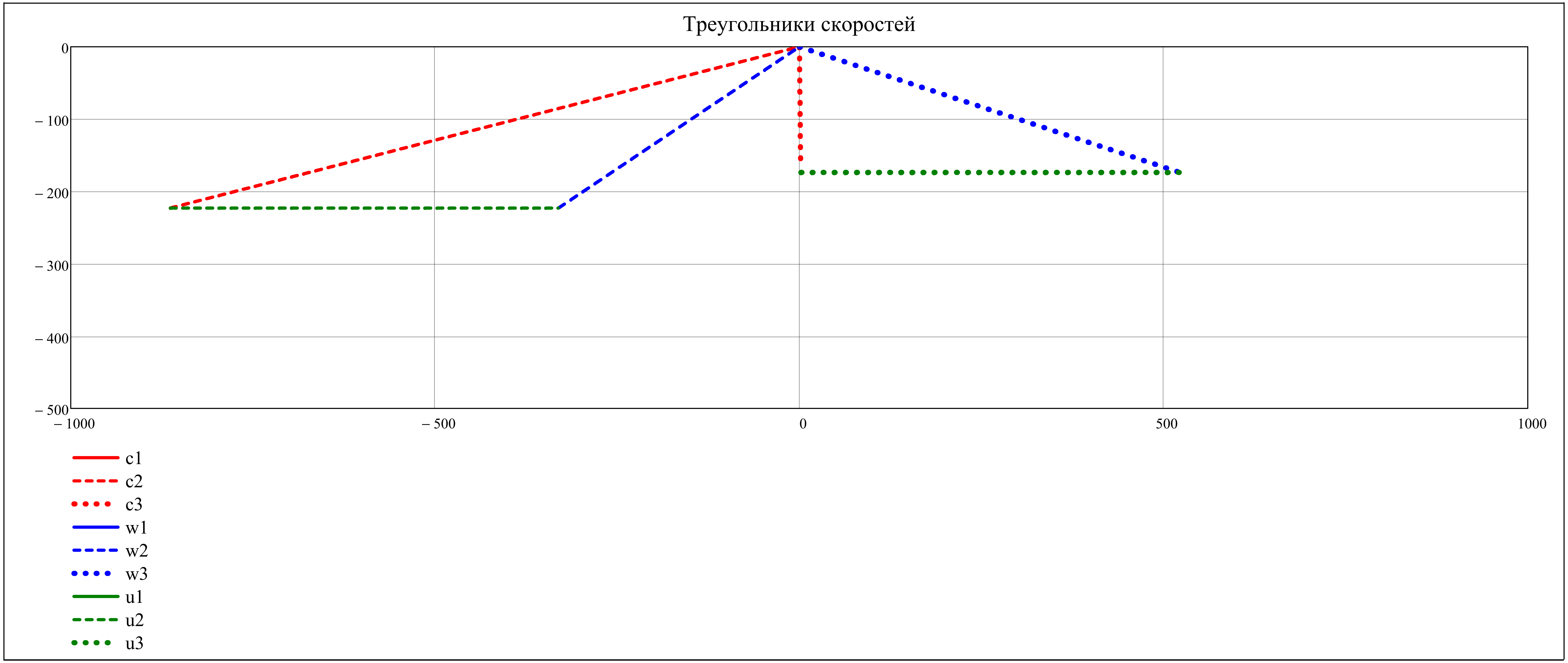
$$v = -\max(c,w,u), -\max(c,w,u) + \frac{\max(c,w,u)}{3000} \, .. \, \max(c,w,u)$$

r = 1

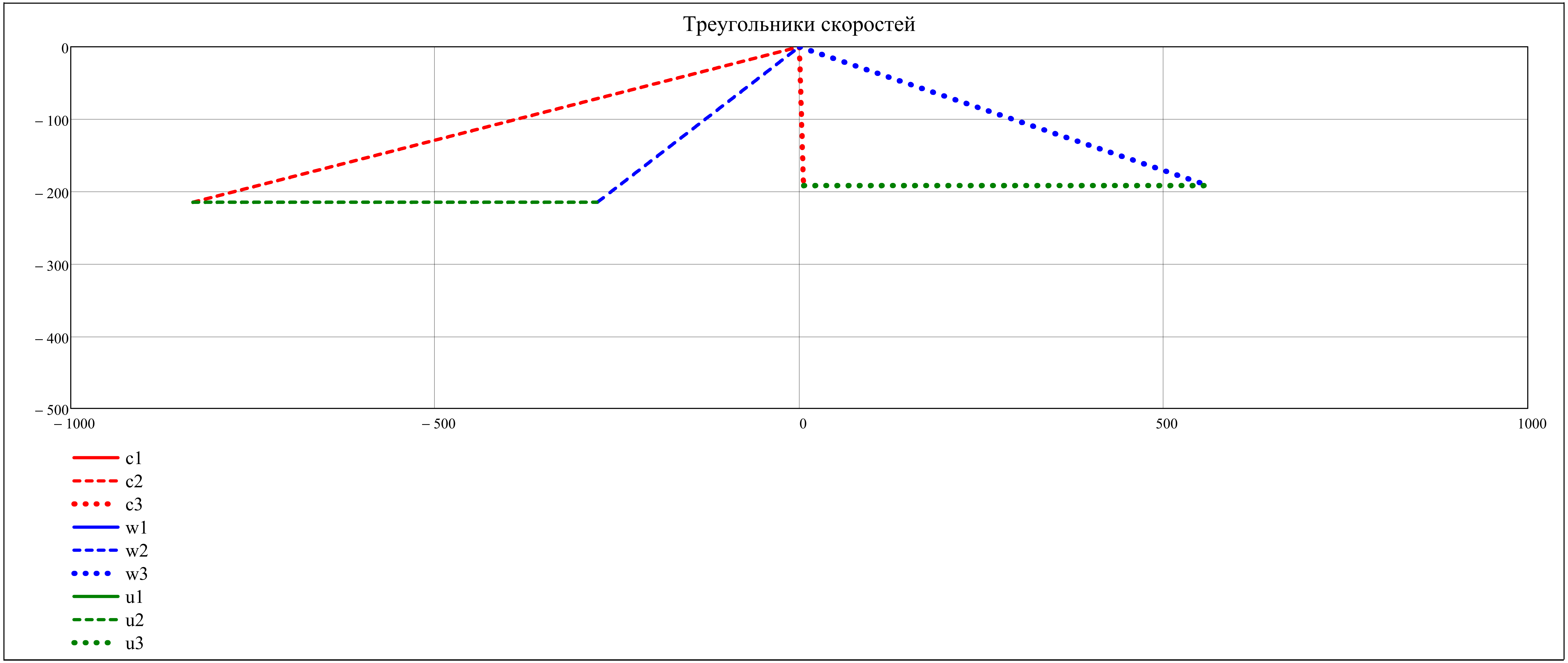


Треугольники скоростей
0
– 100
– 200
– 300
– 400
– 500
– 1000
– 500
0
500
1000
c1
c2
c3
w1
w2
w3
u1
u2
u3

$r = av(N_r)$


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

$r = N_r$



▲ Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

Расчет хорд Л по парусности

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

Длины хорд РК и СА (м):

$chord_{stator}^{T} =$

	1
1	68.0
2	68.0
3	68.0

$\cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}^{T} =$

	1
1	35.2
2	31.4
3	28.8

$\cdot 10^{-3}$

Расчет хорд Л по парусности

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

$\overline{x}_f = 0.45$

Расчет параметров решетки

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

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

$\dfrac{\pi}{2}$ 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	5.100
2	4.500
3	3.300

$\cdot\%$

$\overline{r\_outlet}_{stator}{}^{T} =$

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

$\overline{r\_outlet}_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	1.700
2	1.500
3	1.100

$\cdot\%$

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	15.00
3	11.00

$\cdot\%$

Относительный шаг решетки ():

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

	1
1	0.8343
2	0.8709
3	0.9075

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

	1
1	0.5833
2	0.6924
3	0.7947

Относительная густота решетки ():

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

	1
1	1.199
2	1.148
3	1.102

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

	1
1	1.714
2	1.444
3	1.258

Длина хорды профиля [м]:

$chord_{stator}^{T} =$

	1
1	68.0
2	68.0
3	68.0

$\cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}^{T} =$

	1
1	35.2
2	31.4
3	28.8

$\cdot 10^{-3}$

Радиусы профилей:

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

	1
1	4.08
2	4.08
3	4.08

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	1.79
2	1.41
3	0.95

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	2.04
2	2.04
3	2.04

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	0.60
2	0.47
3	0.32

$\cdot 10^{-3}$

Толщина профиля [м]:

$c_{stator}^{T} =$

	1
1	10.20
2	10.20
3	10.20

$\cdot 10^{-3}$

$c_{rotor}^{T} =$

	1
1	5.98
2	4.70
3	3.17

$\cdot 10^{-3}$

Шаг решетки [м]:

$t_{stator}^{T} =$

	1
1	56.7
2	59.2
3	61.7

$\cdot 10^{-3}$

$t_{rotor}^{T} =$

	1
1	20.5
2	21.7
3	22.9

$\cdot 10^{-3}$

Угол поворота потока: $\varepsilon_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 75.52 \\ 2 & 75.52 \\ 3 & 75.52 \end{array} \cdot {}^{\circ}$ $\varepsilon_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 132.20 \\ 2 & 127.61 \\ 3 & 123.34 \end{array} \cdot {}^{\circ}$

Угол установки профиля: $\upsilon_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 117.3 \\ 2 & 117.3 \\ 3 & 117.3 \end{array} \cdot {}^{\circ}$ $\upsilon_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 111.9 \\ 2 & 114.0 \\ 3 & 115.4 \end{array} \cdot {}^{\circ}$

Угол изгиба профиля: $\pi - \varepsilon_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 104.5 \\ 2 & 104.5 \\ 3 & 104.5 \end{array} \cdot {}^{\circ}$ $\pi - \varepsilon_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 47.8 \\ 2 & 52.4 \\ 3 & 56.7 \end{array} \cdot {}^{\circ}$

▲ Результаты расчета параметров решеток

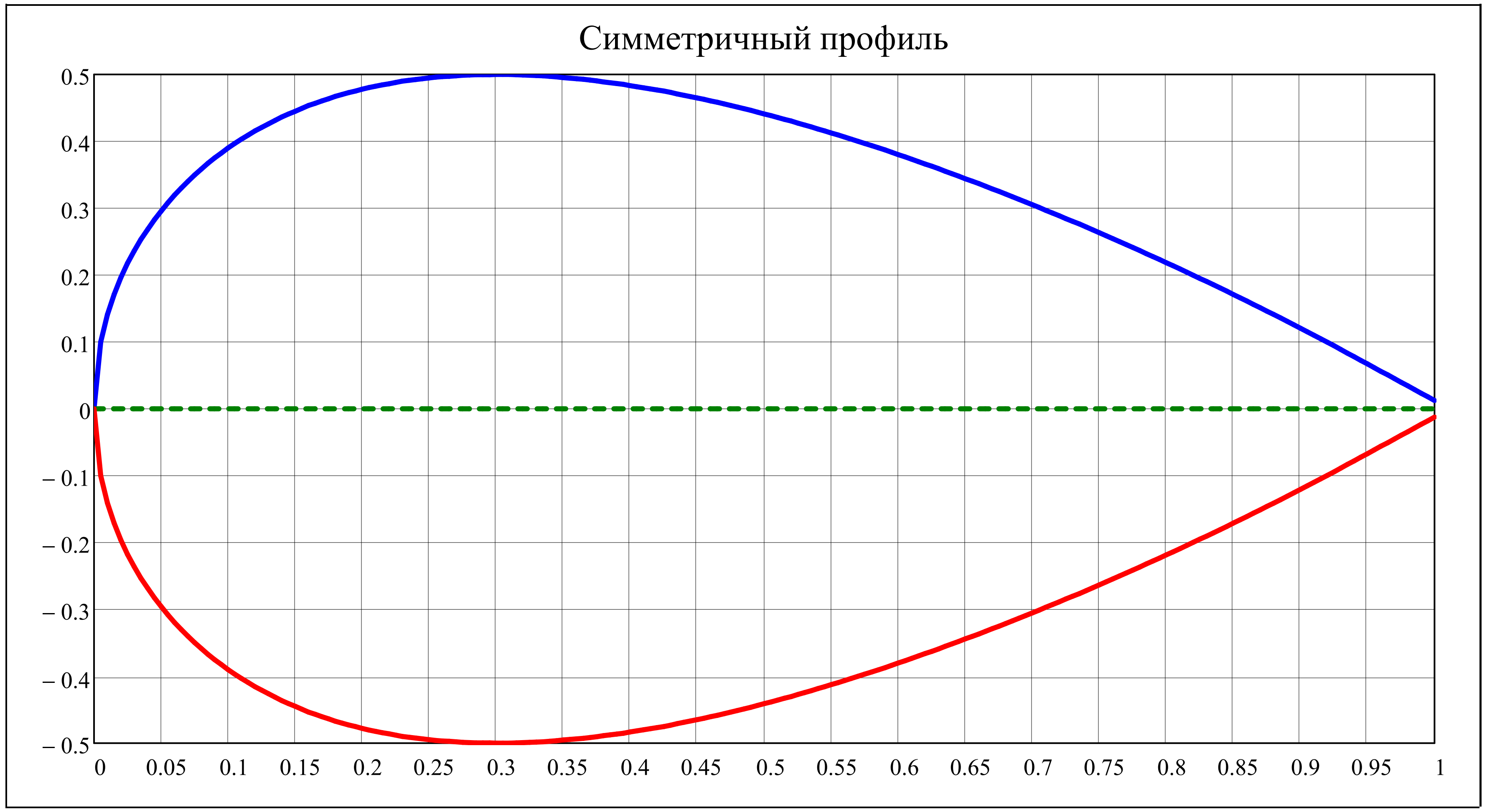
Подключение симметричного профиля

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

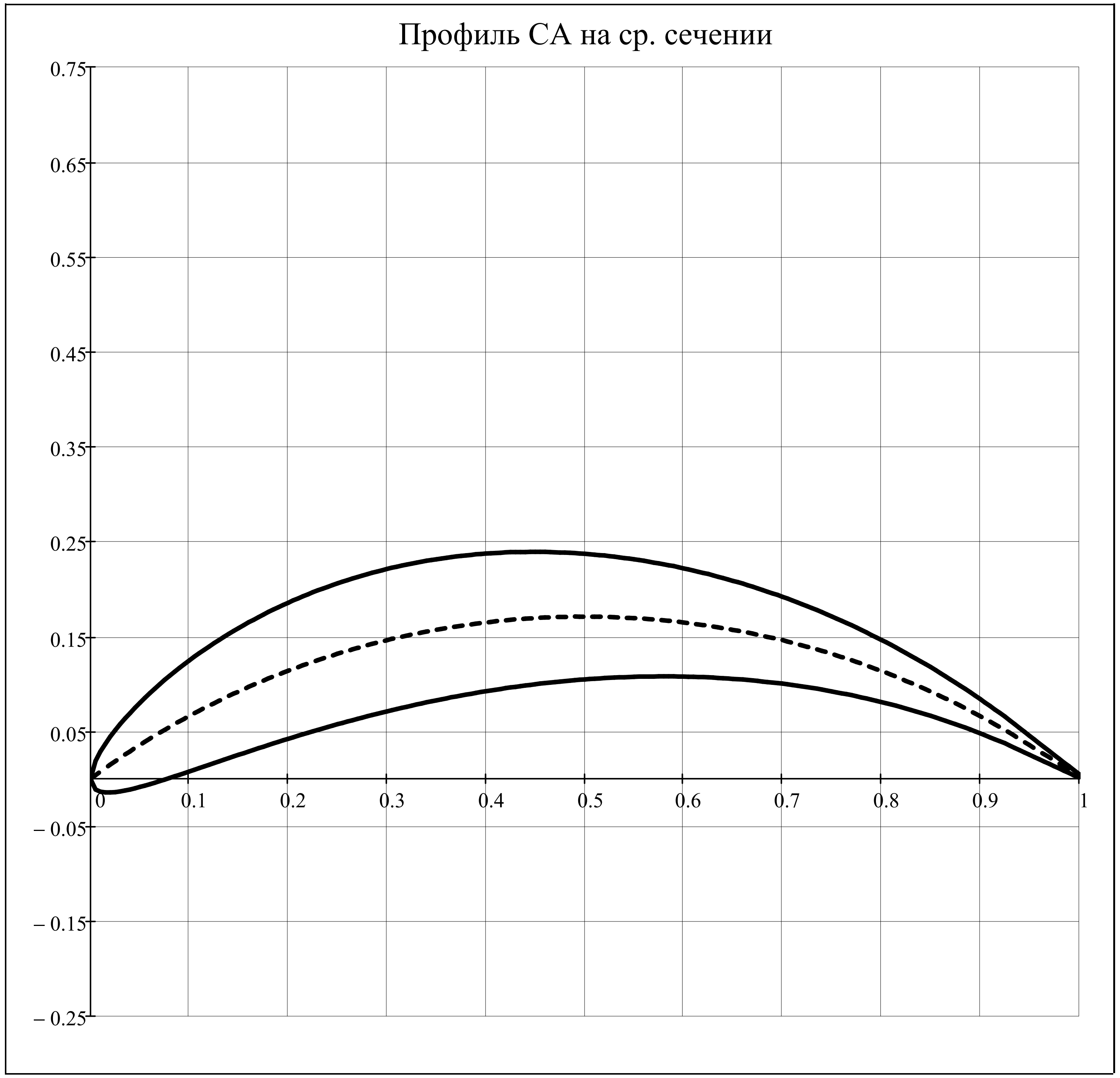
Относ. координаты профиля РК и СА:

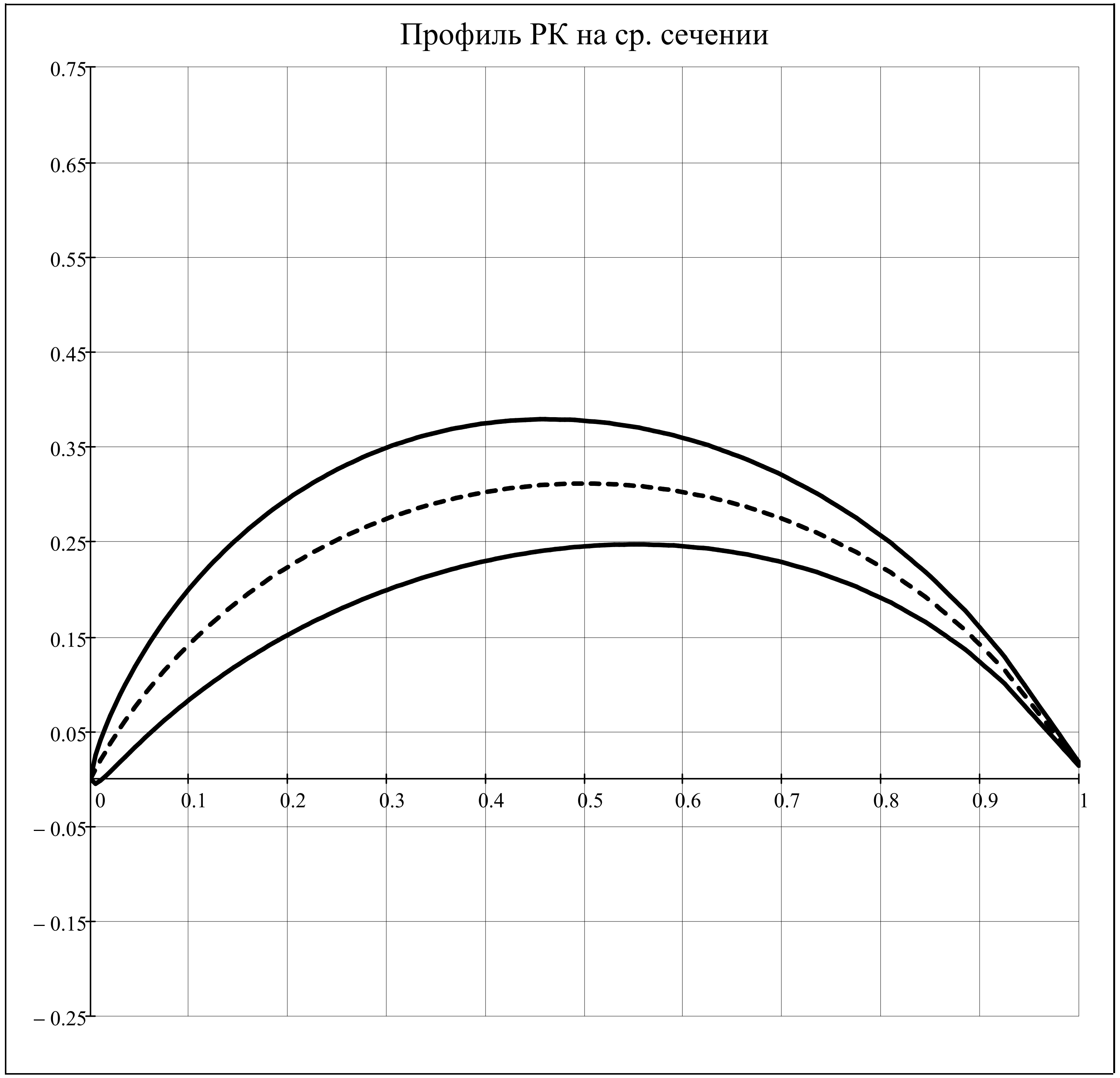
$$\mathrm{AIRFOIL}_0\left(x, \mathrm{line}, \overline{f}, \overline{x}_f, \overline{c}\right) := \begin{cases} \text{if } 0 \le x \le 1 & \begin{cases} \mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) & \text{if line} = \text{"+"} \\ \dfrac{\mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) + \mathrm{linterp}\left(X_L,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

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



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


Профиль СА на ср. сечении


Профиль РК на ср. сечении

Подключение симметричного профиля

▶ Определение относительных геометрических характеристик сечений Л

▶ Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

▶ Определение абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

$$l\_upper_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 78.09 \\ 2 & 78.09 \\ 3 & 78.09 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$l\_lower_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 70.65 \\ 2 & 70.65 \\ 3 & 70.65 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$area_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 474.02 \\ 2 & 474.02 \\ 3 & 474.02 \end{array} \cdot 10^{-6}$$

$$Sx_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 4234.9 \\ 2 & 4234.9 \\ 3 & 4234.9 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$Sy_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 13570.3 \\ 2 & 13570.3 \\ 3 & 13570.3 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

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

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

$$l\_upper_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 47.69 \\ 2 & 41.47 \\ 3 & 36.86 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$l\_lower_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 40.59 \\ 2 & 35.98 \\ 3 & 33.19 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$area_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 143.85 \\ 2 & 100.82 \\ 3 & 62.43 \end{array} \cdot 10^{-6}$$

$$Sx_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1320.1 \\ 2 & 785.3 \\ 3 & 426.8 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$Sy_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 2130.9 \\ 2 & 1331.2 \\ 3 & 757.5 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$x0_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 14.8 \\ 2 & 13.2 \\ 3 & 12.1 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$y0_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 9.2 \\ 2 & 7.8 \\ 3 & 6.8 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$Jx_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 44306 \\ 2 & 44306 \\ 3 & 44306 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 509058 \\ 2 & 509058 \\ 3 & 509058 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 128653 \\ 2 & 128653 \\ 3 & 128653 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jx0_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 6470 \\ 2 & 6470 \\ 3 & 6470 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy0_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 120570 \\ 2 & 120570 \\ 3 & 120570 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy0_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 7415 \\ 2 & 7415 \\ 3 & 7415 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\alpha\_major_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 3.7 \\ 2 & 3.7 \\ 3 & 3.7 \end{array} \cdot {}^{\circ}$$

$$Jx_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 13285 \\ 2 & 6703 \\ 3 & 3179 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 41363 \\ 2 & 23030 \\ 3 & 12042 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 20592 \\ 2 & 10928 \\ 3 & 5462 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jx0_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1171 \\ 2 & 586 \\ 3 & 261 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy0_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 9797 \\ 2 & 5455 \\ 3 & 2852 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy0_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1036 \\ 2 & 559 \\ 3 & 284 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\alpha\_major_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 6.8 \\ 2 & 6.5 \\ 3 & 6.2 \end{array} \cdot {}^{\circ}$$

$$Ju_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 5991 \\ 2 & 5991 \\ 3 & 5991 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jv_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 121049.8 \\ 2 & 121049.8 \\ 3 & 121049.8 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

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

$$Jp_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 127040 \\ 2 & 127040 \\ 3 & 127040 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Wp_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 3148.0 \\ 2 & 3148.0 \\ 3 & 3148.0 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$stiffness_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 11348.5 \\ 2 & 11348.5 \\ 3 & 11348.5 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Ju_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1048 \\ 2 & 522 \\ 3 & 230 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jv_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 9920 \\ 2 & 5518 \\ 3 & 2883 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

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

$$Jp_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 10967 \\ 2 & 6040 \\ 3 & 3113 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Wp_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 491.0 \\ 2 & 305.8 \\ 3 & 172.7 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$stiffness_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1184.4 \\ 2 & 513.4 \\ 3 & 144.4 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$CPx_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 23.794 \\ 2 & 23.794 \\ 3 & 23.794 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

$$CPx_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 12.312 \\ 2 & 10.974 \\ 3 & 10.084 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

▲ Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Вывод результатов расчета геометрических хар-к сечений Л

▼ Профилирование решеток

Абс. координаты профиля:

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

▲ Профилирование решеток

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

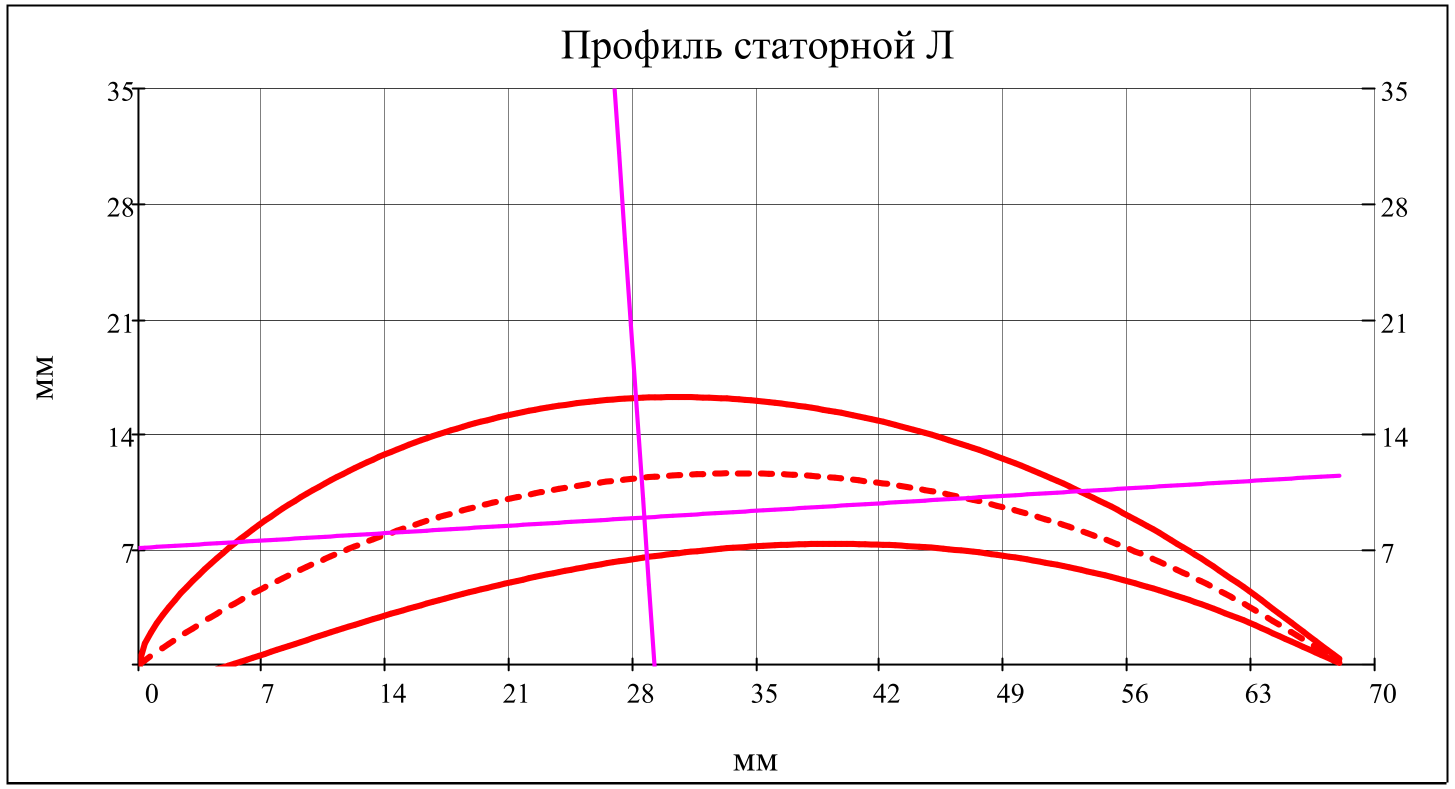
Построение профилей Л РК и НА

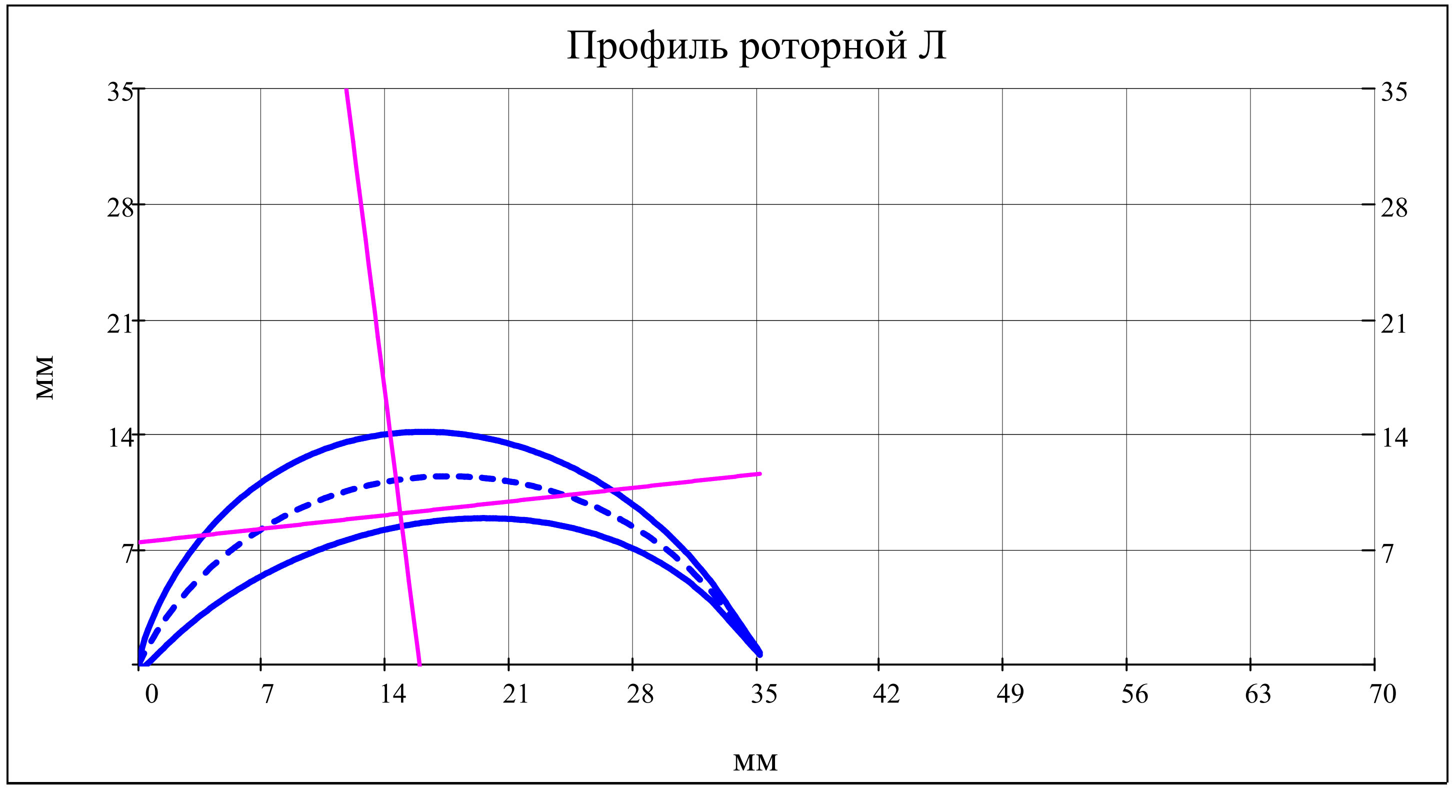
$$AXLE0(type, x, i, r) = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } type = \text{"rotor"} \\ \dfrac{y0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{stator_{i,r}}\right)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

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

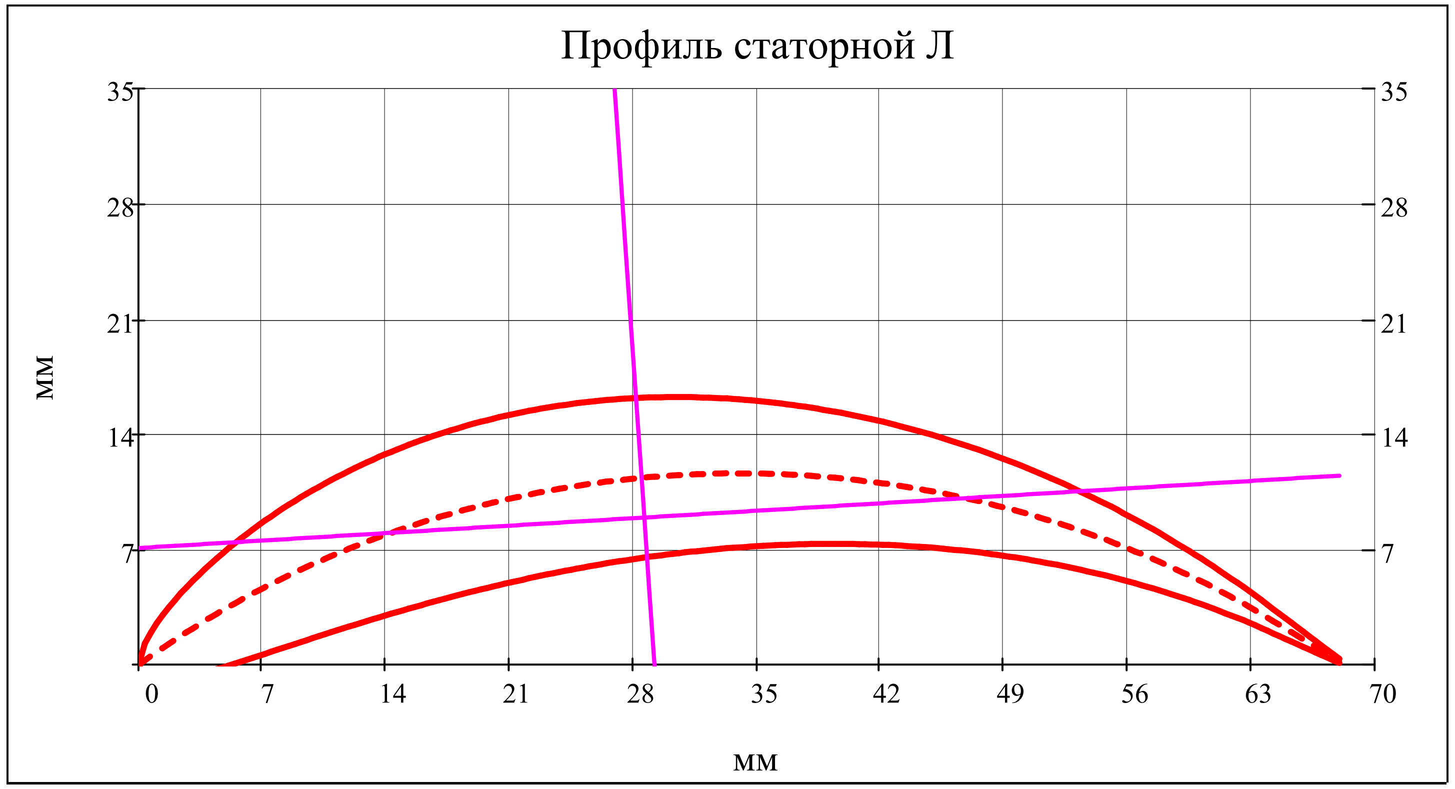
$$AXLE90(type, x, i, r) = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}} + \dfrac{\pi}{2}\right) \cdot \left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } (type = \text{"rotor"}) \land \left|\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right|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

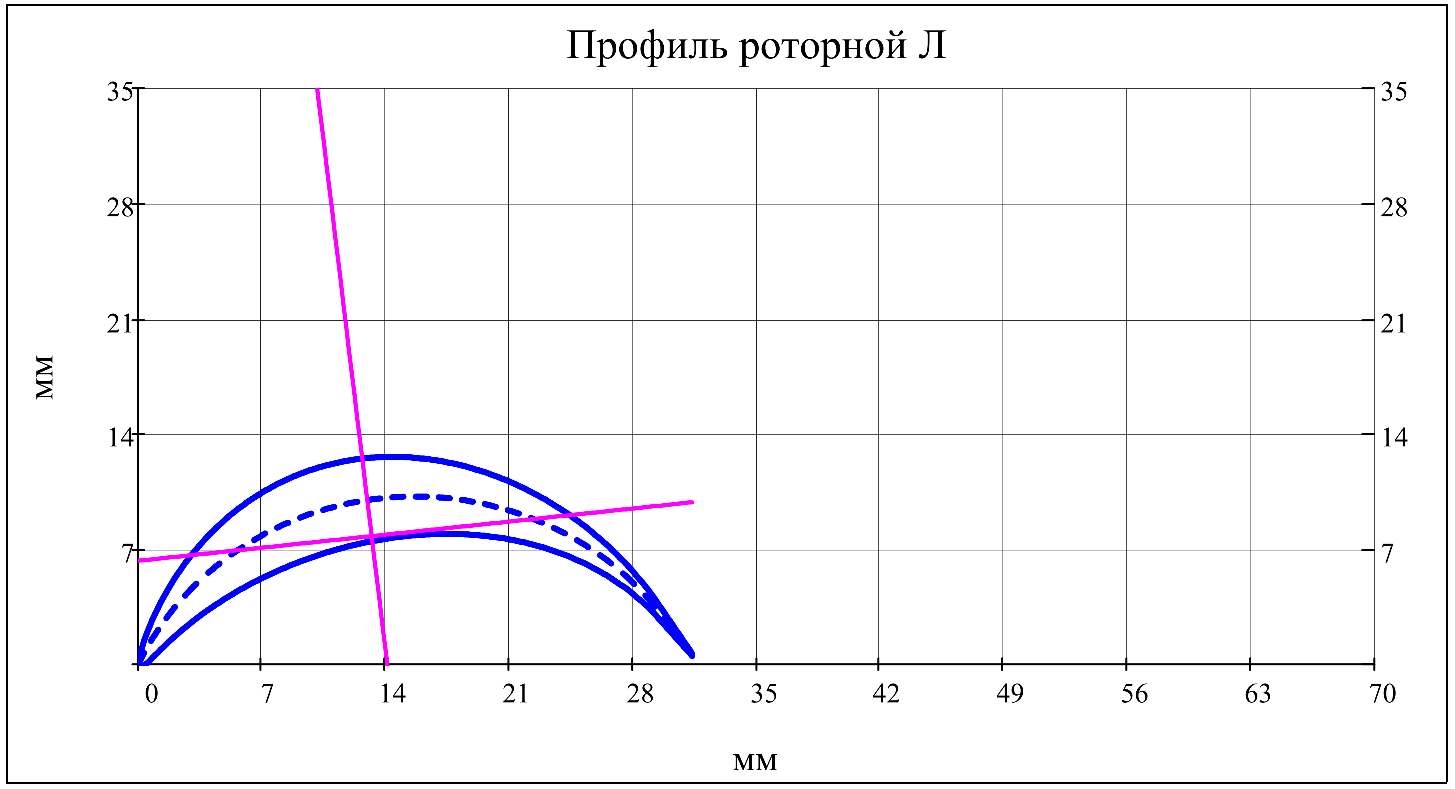
r = 1


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

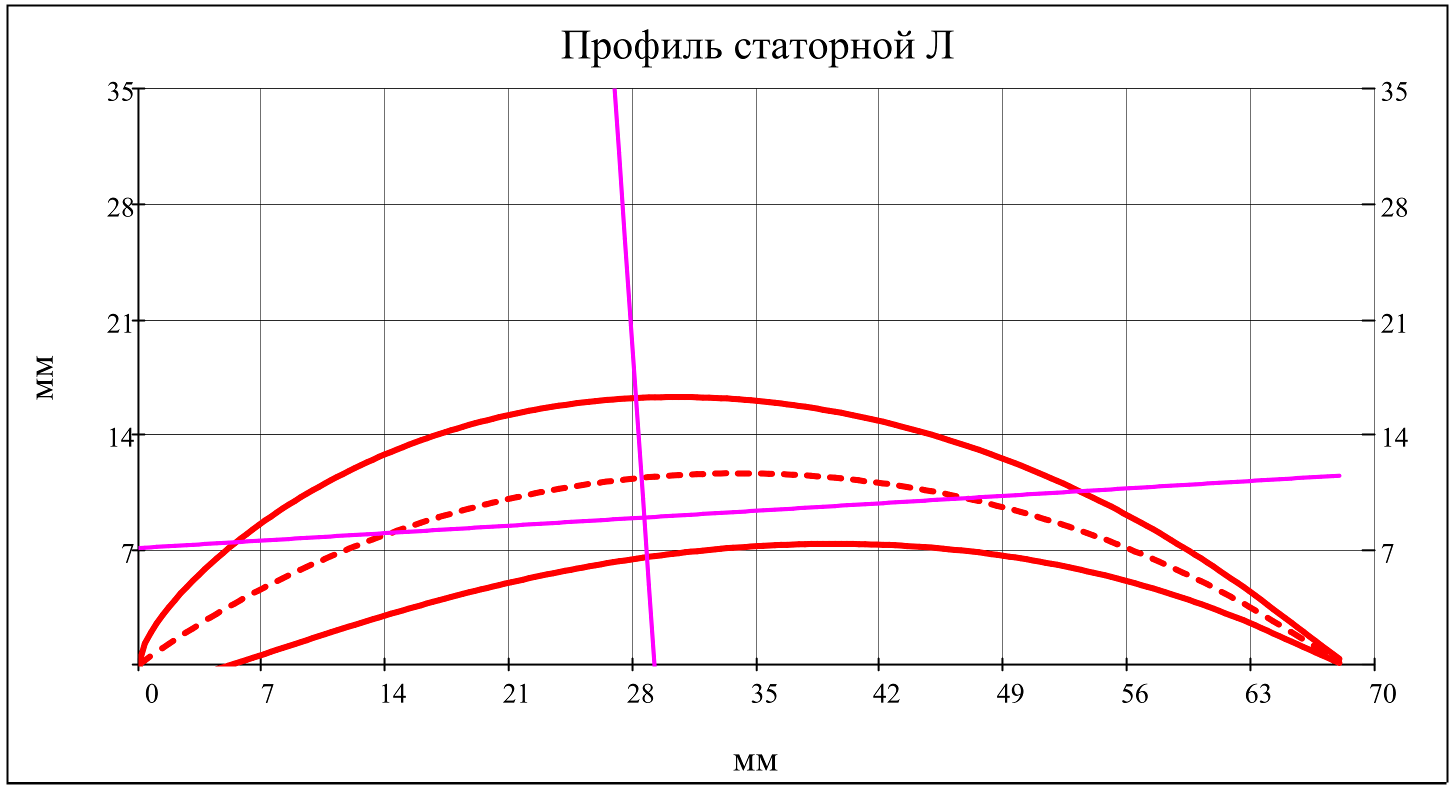

Профиль роторной Л
мм
мм
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
35
28
21
14
7

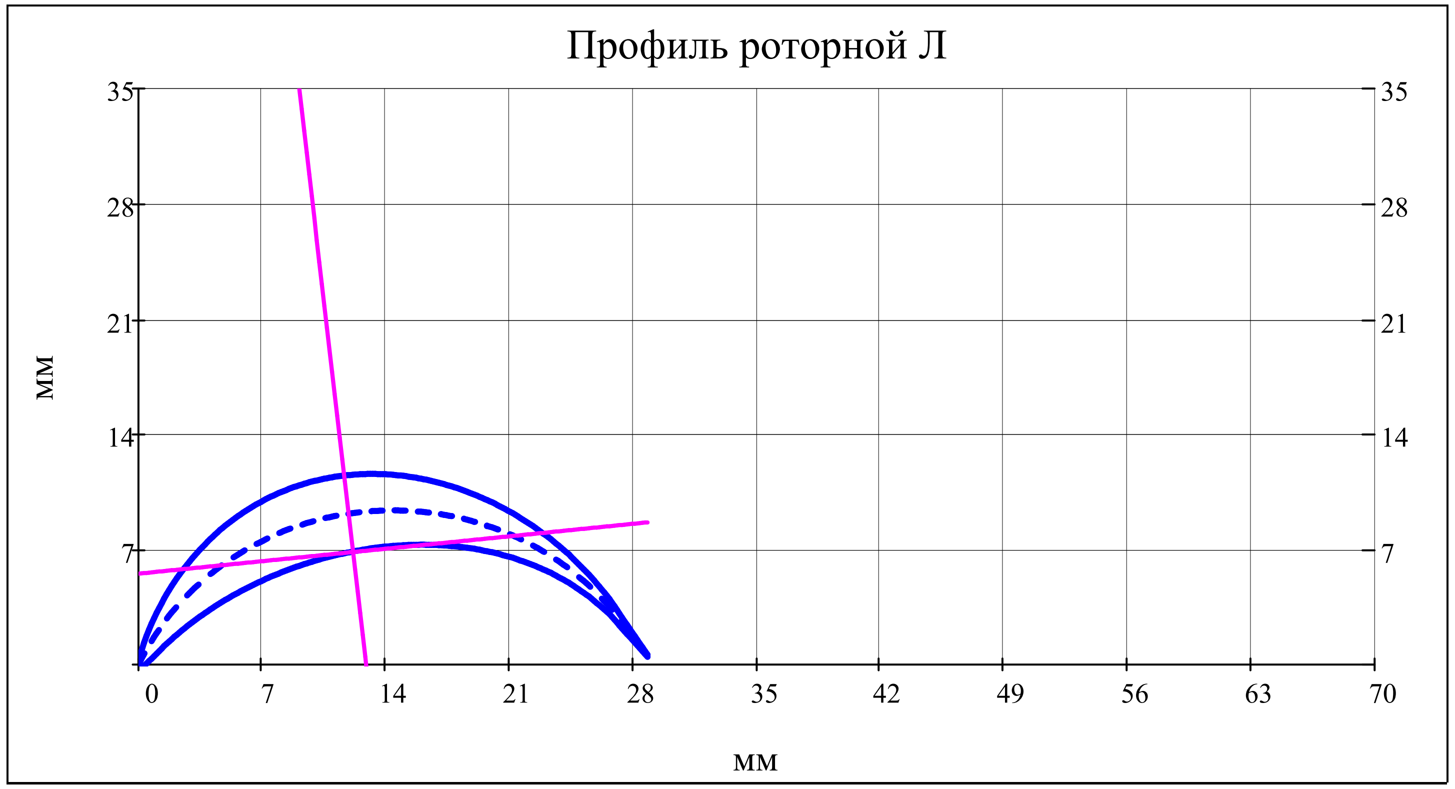
$r = av(N_r)$


Профиль статорной Л
мм
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

$r = N_r$





▲ Построение профилей Л РК и НА

Вывод координат для построения профиля Л

Рассматриваемая ступень:

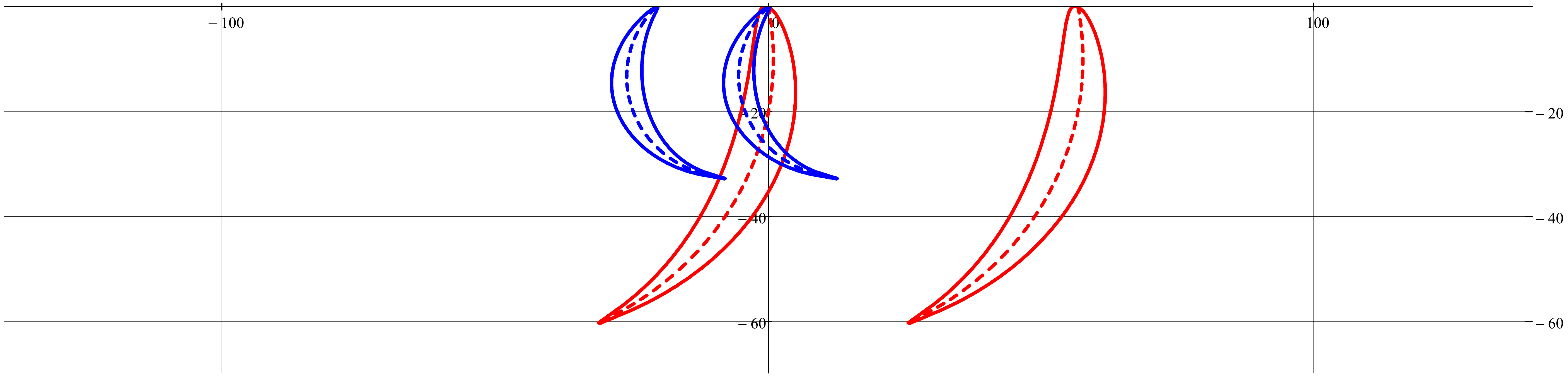
$$j = \left| \begin{array}{l} j = 1 \\ j = \left| \begin{array}{l} \text{"Такой ступени не существует!"} \quad \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 1$$

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

Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

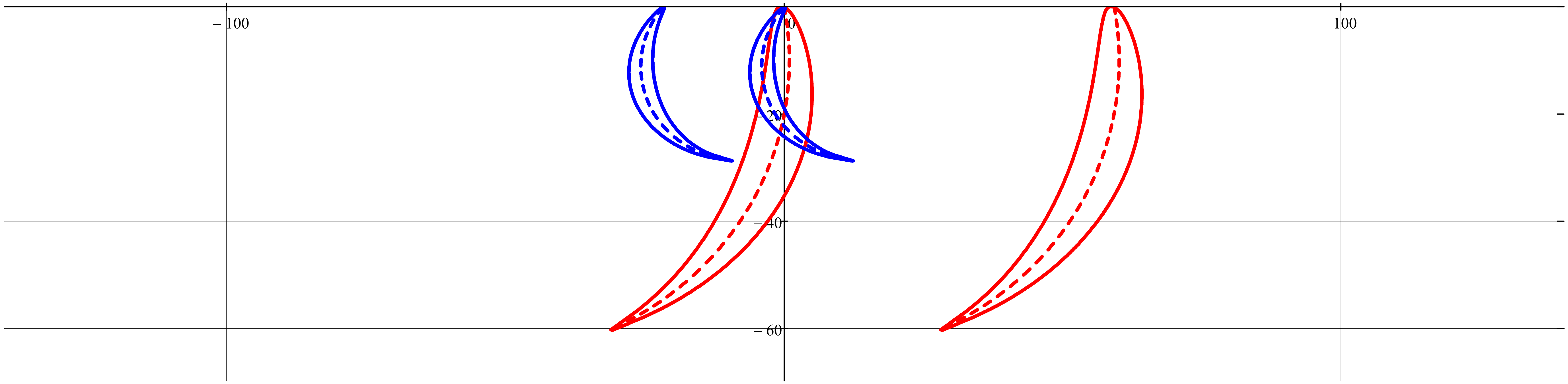
$r = 1$

Решетка ступени на Δ-ках скоростей

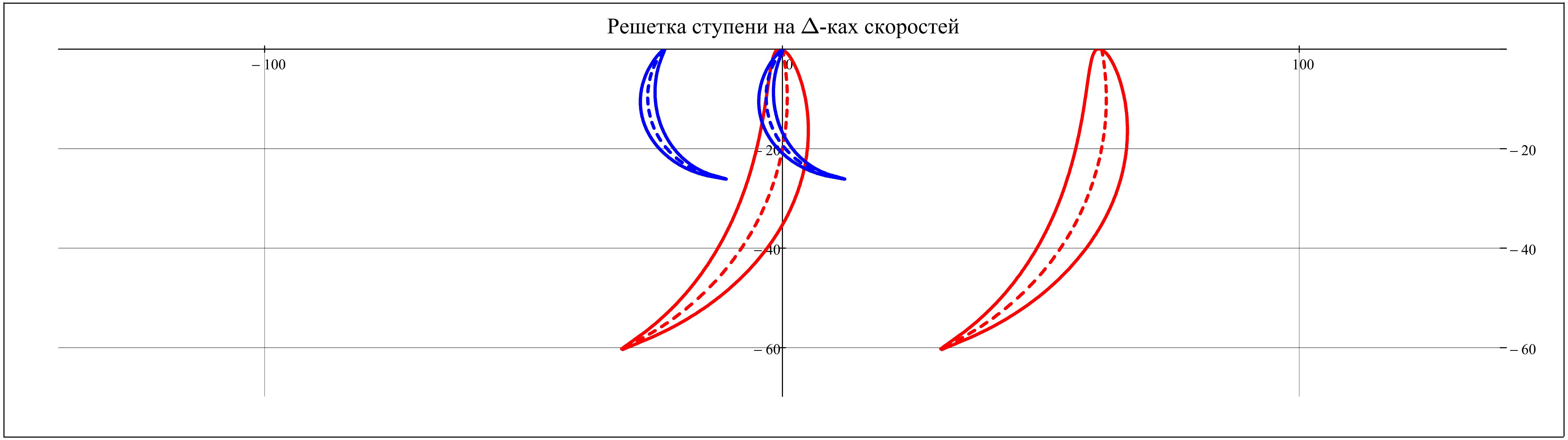


$r = av(N_r)$

Решетка ступени на Δ-ках скоростей



$r = N_r$



▲ Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

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

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

Поперечная часть ступени

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

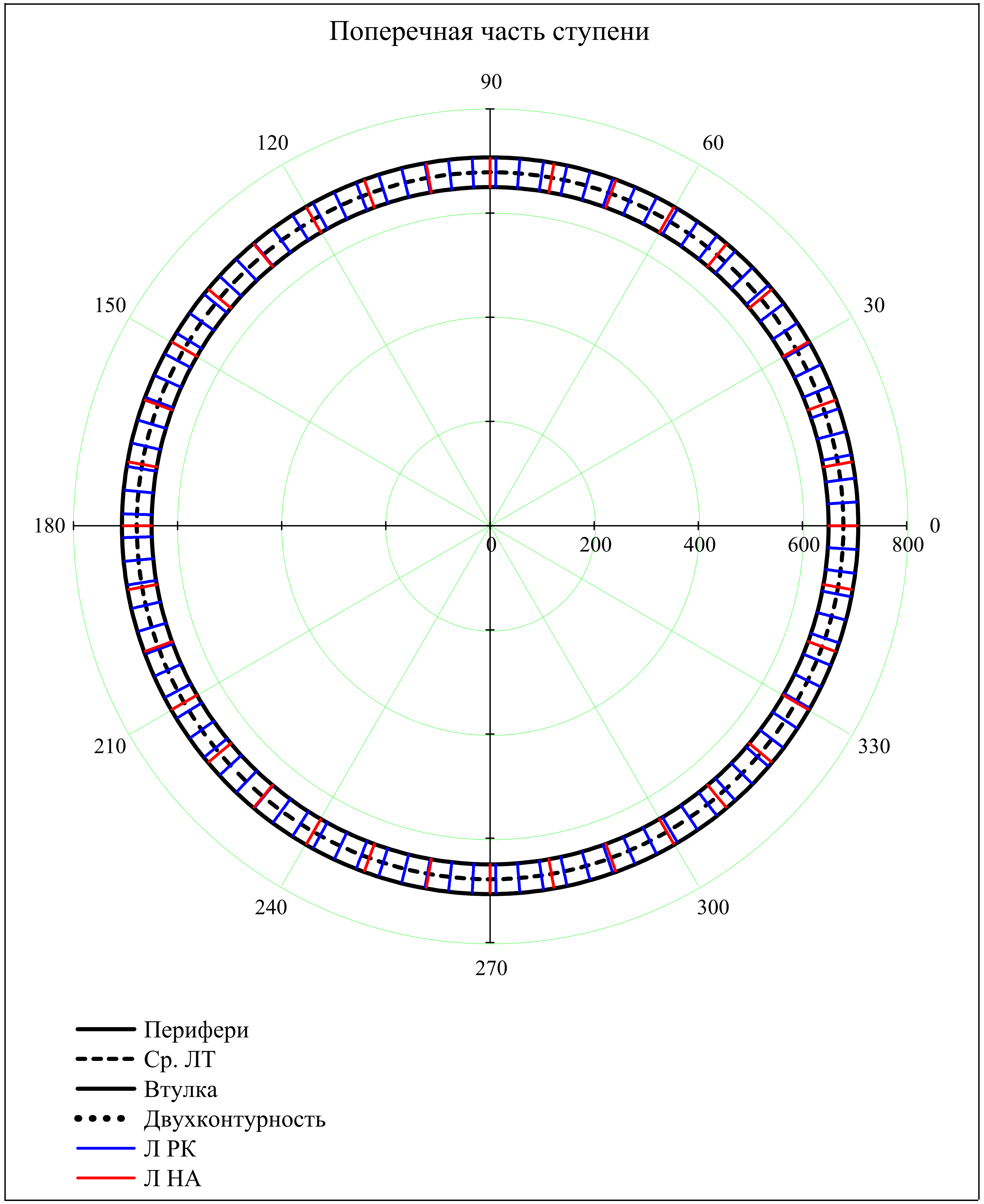
$$i_{rotor} = 1 .. Z_{rotor_j}$$

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

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

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

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



▲ Поперечная часть ступени

Расчет собственных частот колебаний Л

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

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

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

$\mathrm{stack}\left(\nu 0_{\text{изг.stator}}, \nu 0_{\text{изг.rotor}}\right)^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	12598	4867						
2	78956	30501						
3	221101	85411						
4	433594	167497						
5	716468	276772						
6	1070004	413343						

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

$\mathrm{stack}\left(\nu 0_{\text{угл.stator}}, \nu 0_{\text{угл.rotor}}\right)^T =$

	1	2
1	8364	6337
2	25091	19012
3	41819	31686
4	58546	44361
5	75273	57036
6	92001	69710

$\mathrm{stack}\left(\nu 0_{\text{угл.stator\_bondage}}, \nu 0_{\text{угл.rotor\_bondage}}\right)^T =$

	1	2
1	16727	12675
2	33455	25349
3	50182	38024
4	66910	50698
5	83637	63373
6	100365	76048

▲ Расчет собственных частот колебаний Л

Вывод результатов расчета собственных частот колебаний Л

Расчетный узел: $type = "turbine"$

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

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

▶ Расчет Л на прочность

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

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

▶ Определение координат точек профиля Л, наиболее удаленных от НЛ

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$u\_u_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -0.201 \\ 2 & 0.395 \\ 3 & -5.492 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_l_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 19.281 \\ 2 & 17.261 \\ 3 & -8.241 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_u_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -7.067 \\ 2 & 8.163 \\ 3 & 8.159 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_l_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -11.366 \\ 2 & -25.855 \\ 3 & -25.848 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_u_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 4.881 \\ 2 & 4.007 \\ 3 & 12.797 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_l_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -10.812 \\ 2 & -9.250 \\ 3 & -15.884 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_u_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 29.145 \\ 2 & 8.195 \\ 3 & 8.199 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_l_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -38.701 \\ 2 & -14.480 \\ 3 & -14.491 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

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

$$\sigma\_p_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & -21.92 \\ 2 & -9.28 \\ 3 & 0.00 \end{array} \cdot 10^{6}$$

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

$$\sigma\_n_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 48.01 \\ 2 & 21.17 \\ 3 & 0.00 \end{array} \cdot 10^{6}$$

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

$$\sigma\_p_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.00 \\ 2 & 3.46 \\ 3 & 13.83 \end{array} \cdot 10^{6}$$

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

$$\sigma\_n_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.00 \\ 2 & -7.05 \\ 3 & -28.20 \end{array} \cdot 10^{6}$$

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

```
$\begin{pmatrix} \sigma_{rotor} \\ \sigma_{stator} \end{pmatrix} =$
    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	180.98
2	98.93
3	0.00

$\cdot 10^6$

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

	1
1	0.00
2	5.60
3	16.40

$\cdot 10^6$

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

$safety_{rotor}{}^T =$

	1
1	1.13
2	2.07
3	0000000000000000000000000000000

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

	1
1	0
2	1
3	1

$safety_{stator}{}^T =$

	1
1	0000000000000000000000000000000
2	36.59
3	12.5

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

	1
1	1
2	1
3	1

Рассматриваемая ступень:

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

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

Расстояния от оси ЛМ до рассматриваемой ступени (м):

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

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

$\cdot 10^{-3}$

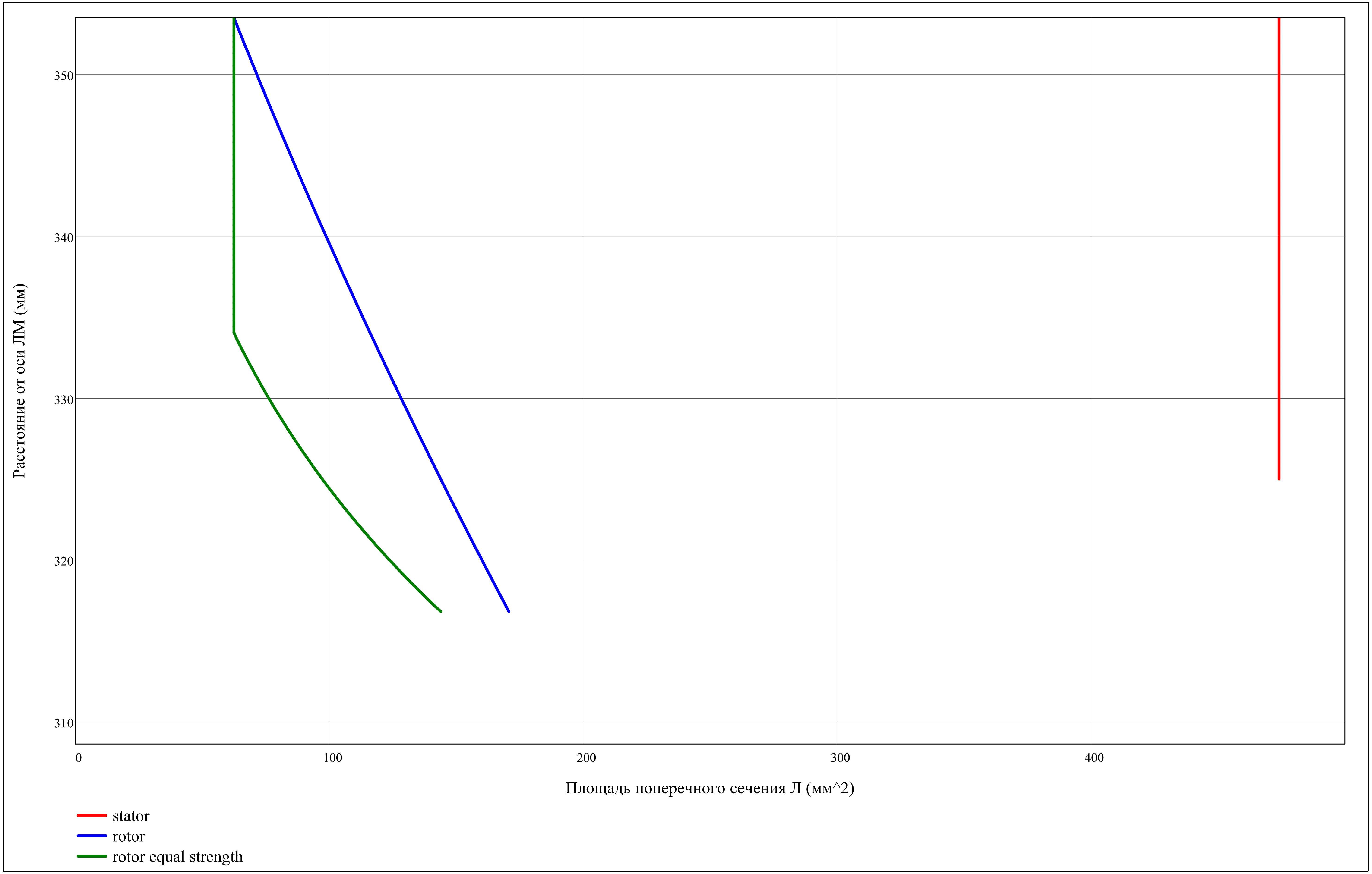
Дискретизация по высоте Л:

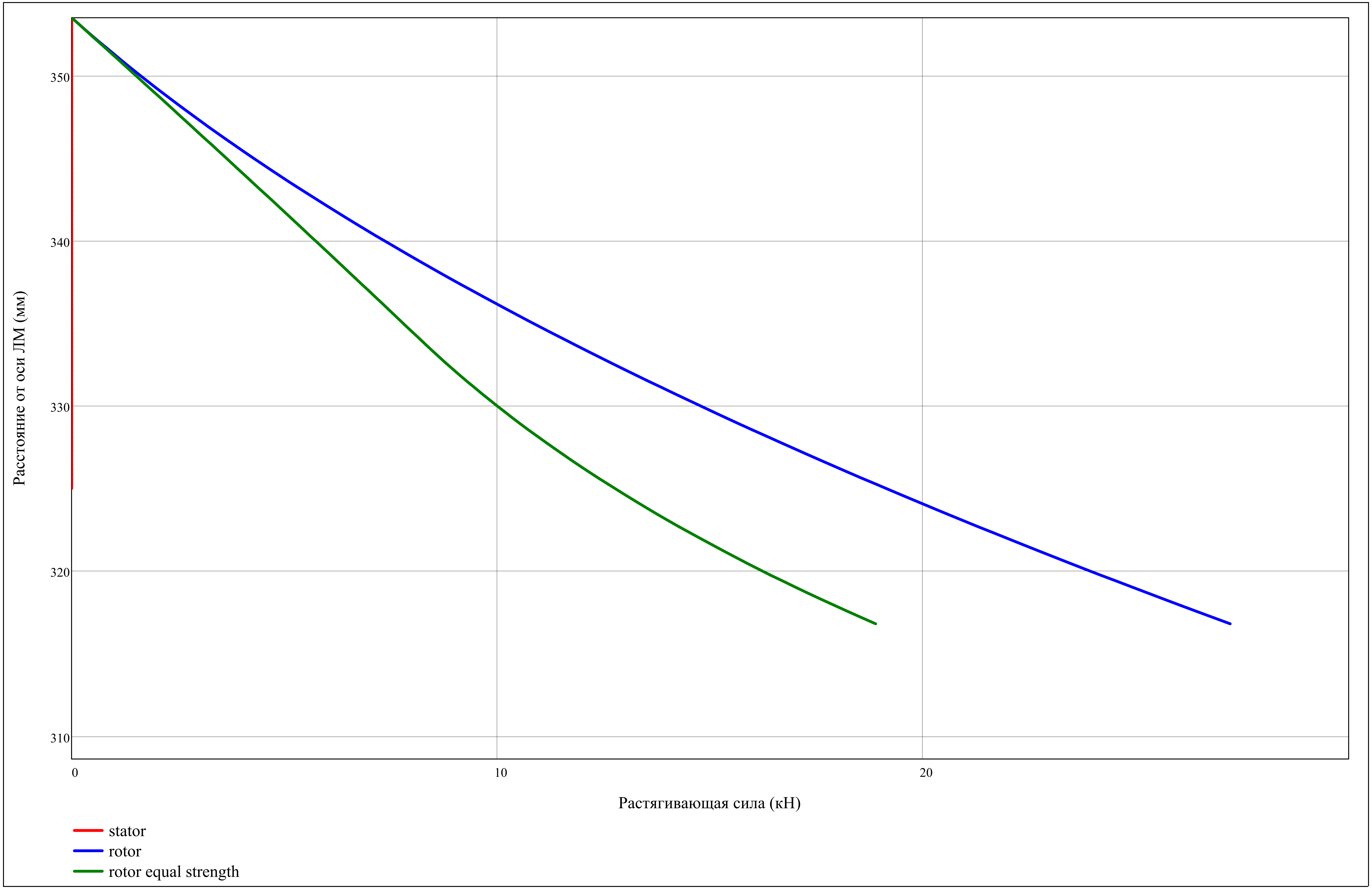
$$z = \min(Rj), \min(Rj) + \frac{\max(Rj) - \min(Rj)}{100} \, .. \, \max(Rj)$$

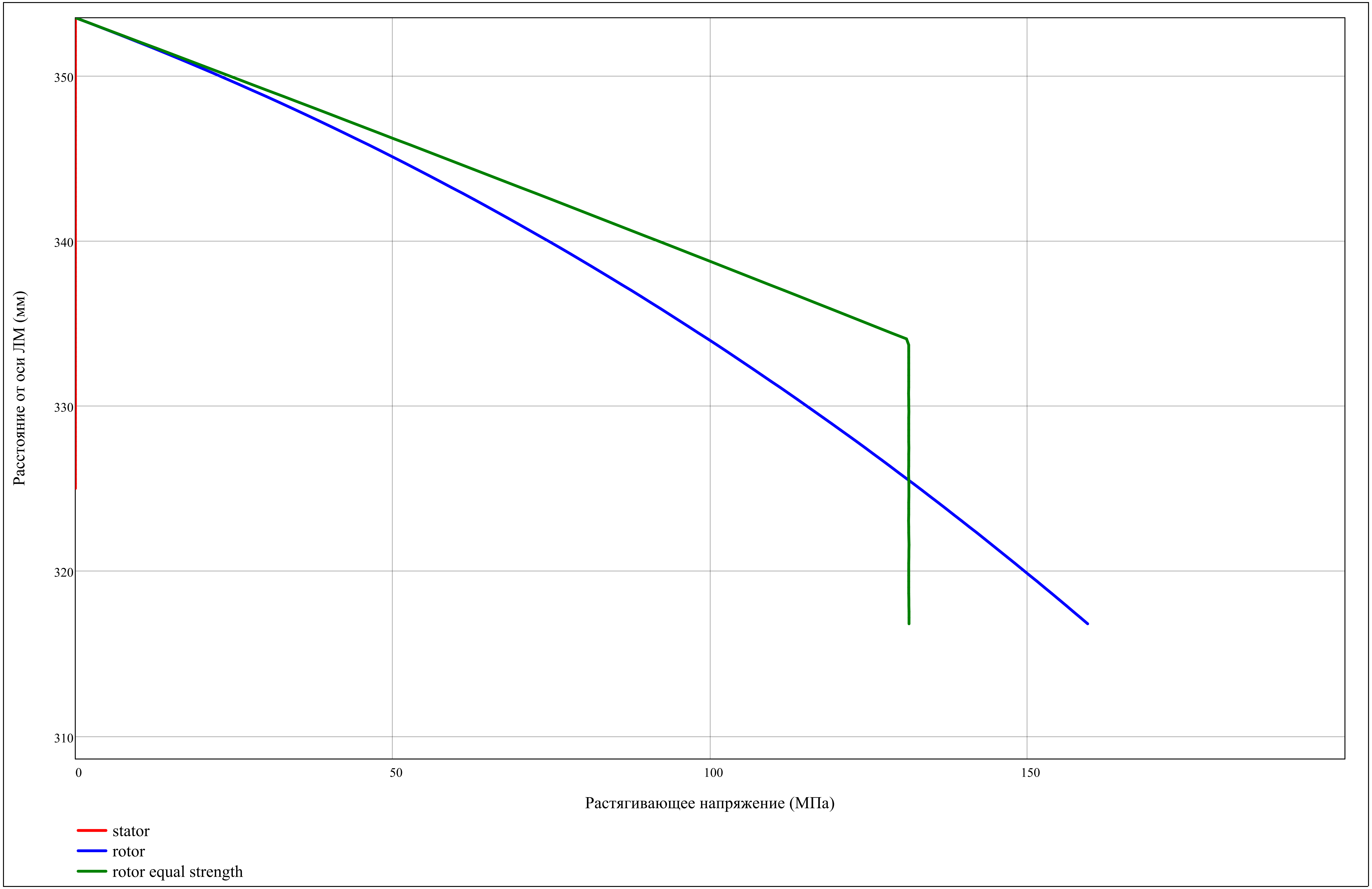
$$z_{rotor} = \left| \begin{array}{l} \operatorname{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right), \operatorname{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right) + \dfrac{\operatorname{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) - \operatorname{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right)}{100} \, .. \, \operatorname{mean}\left(Rj_{1,N_r},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

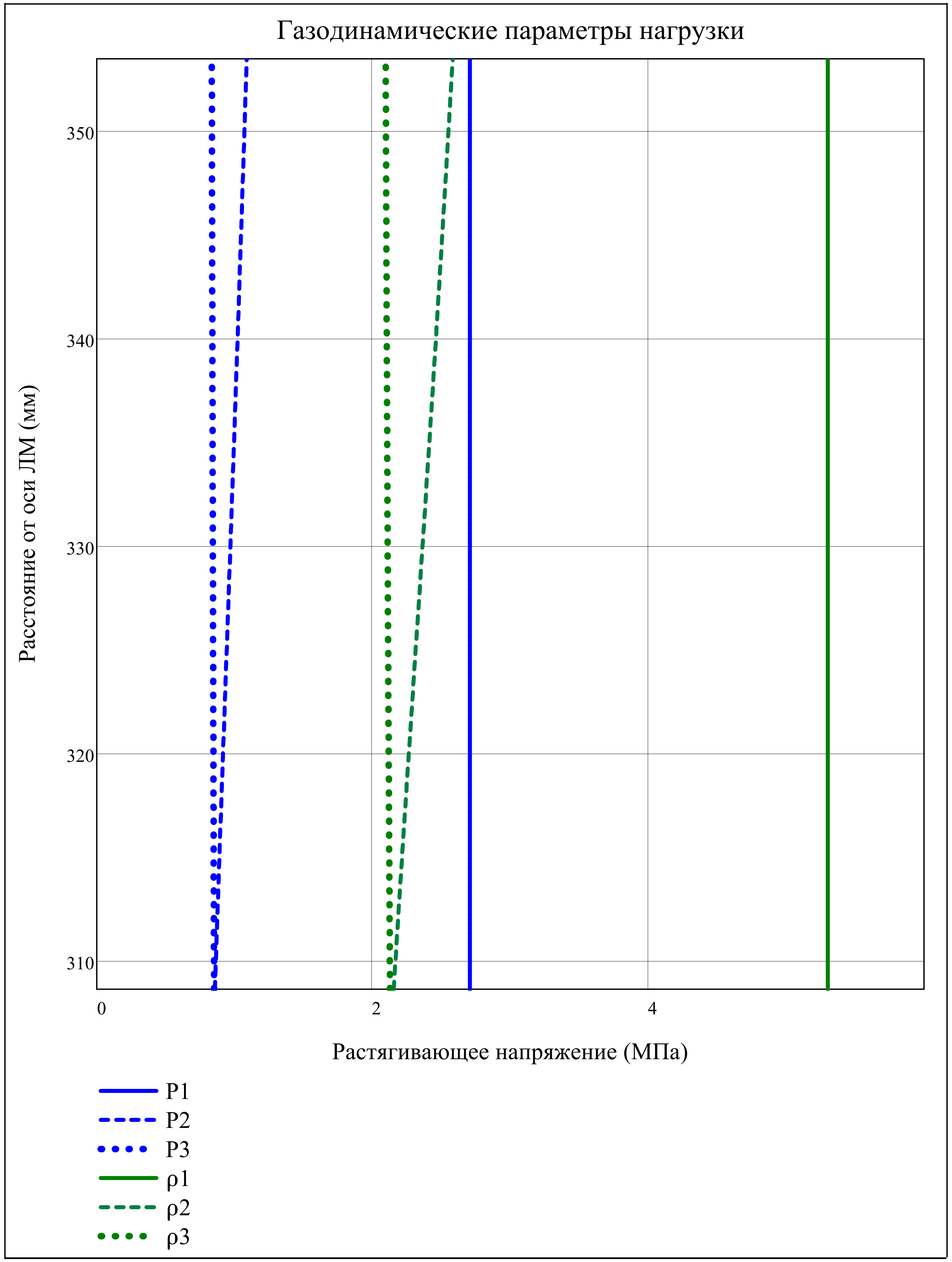
$$z_{stator} = \left| \begin{array}{l} \operatorname{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right), \operatorname{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right) + \dfrac{\operatorname{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) - \operatorname{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right)}{100} \, .. \, \operatorname{mean}\left(Rj_{2,N_r},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

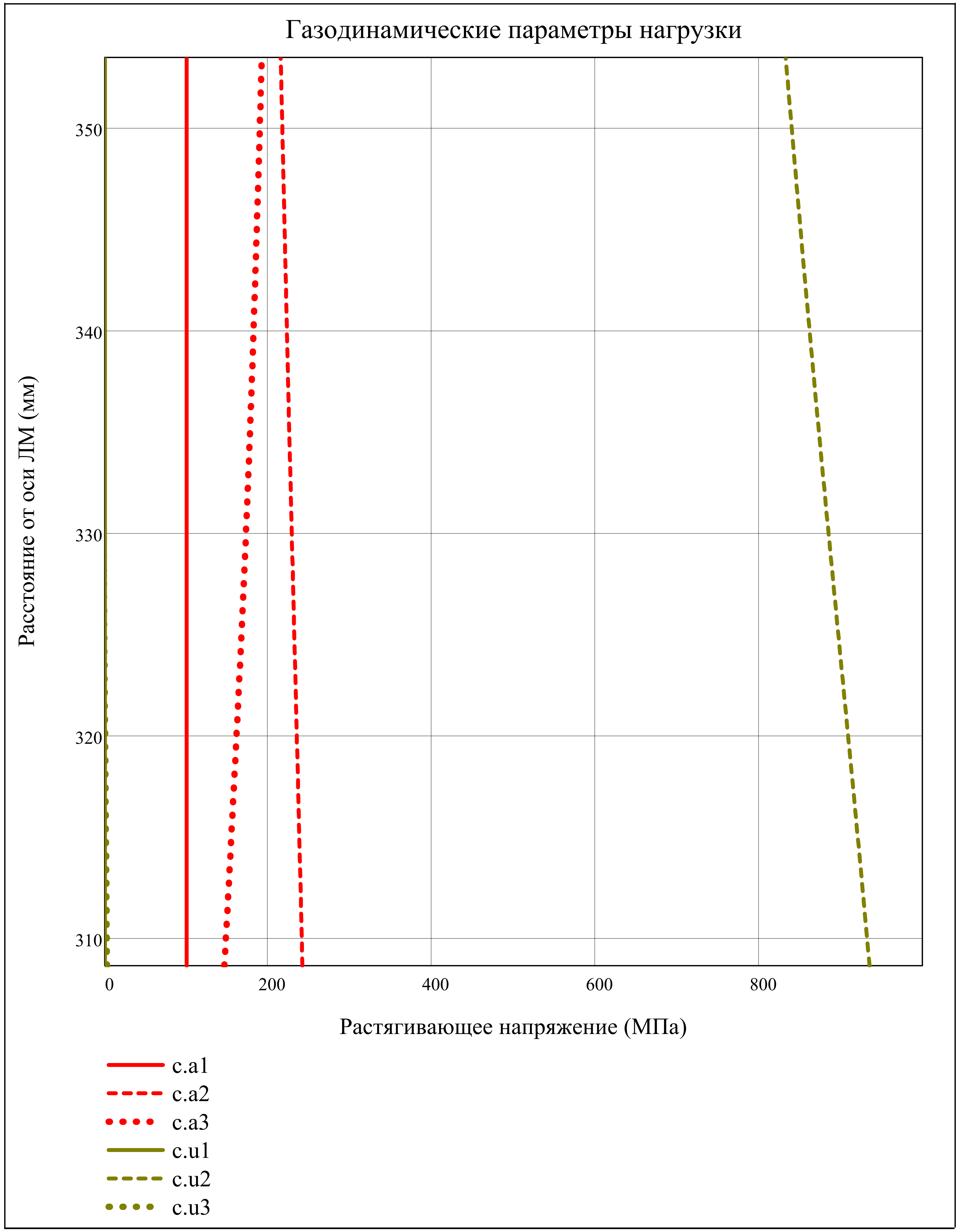
Результаты расчета на прочность Л

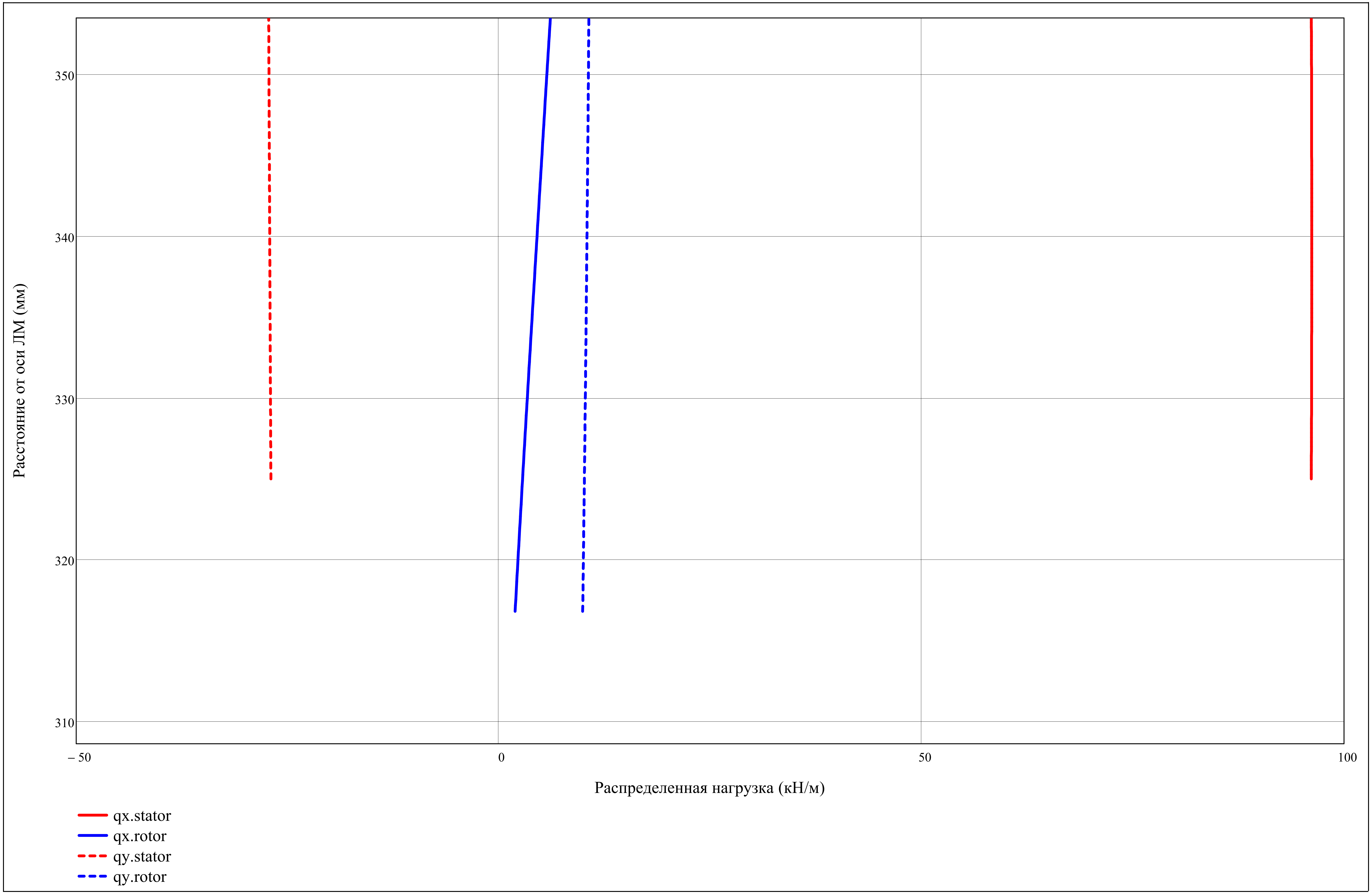

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
100
200
300
400
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength


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

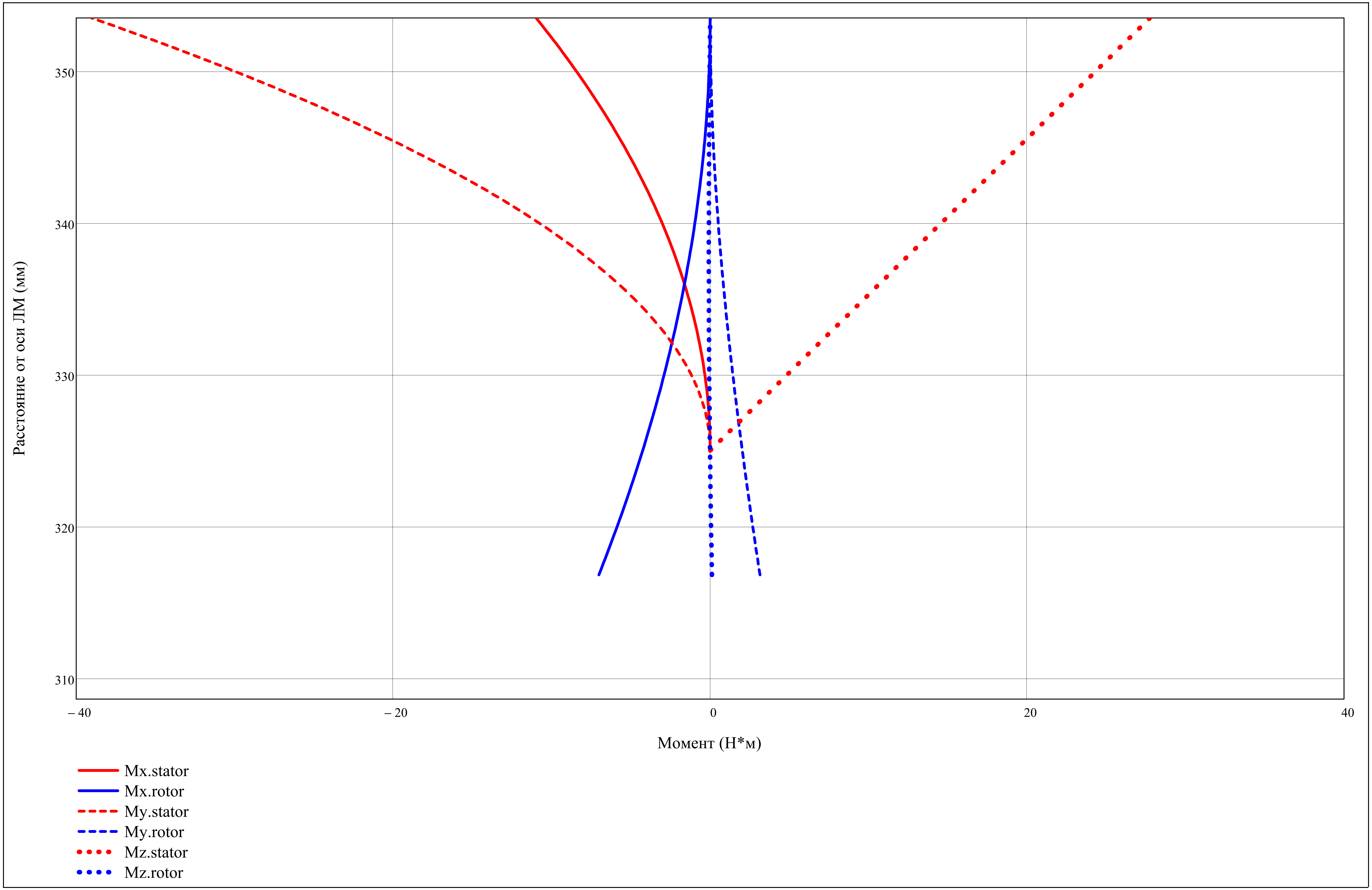

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
50
100
150
Растягивающее напряжение (МПа)
stator
rotor
rotor equal strength

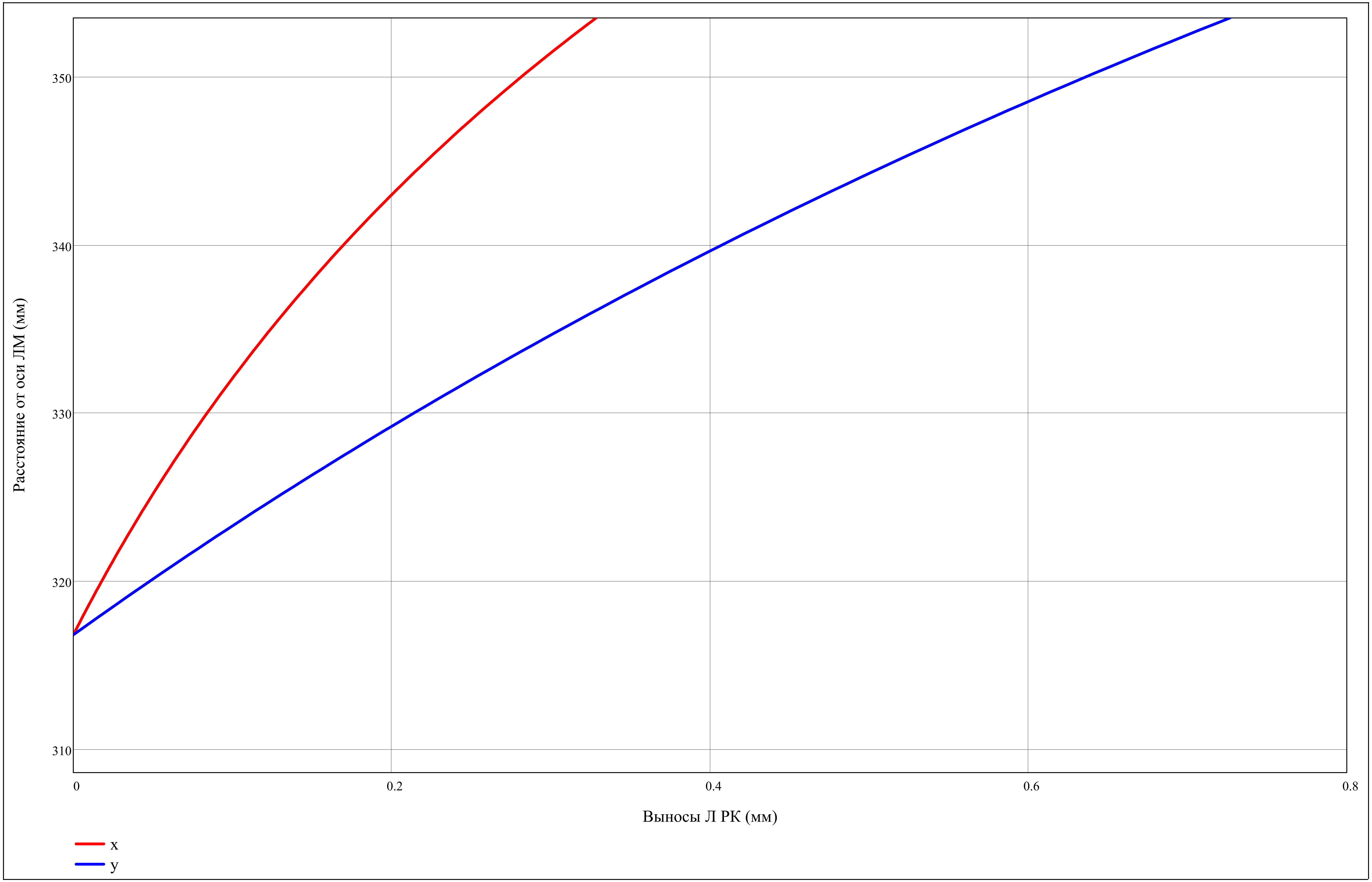

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
2
4
Растягивающее напряжение (МПа)
P1
P2
P3
ρ1
ρ2
ρ3

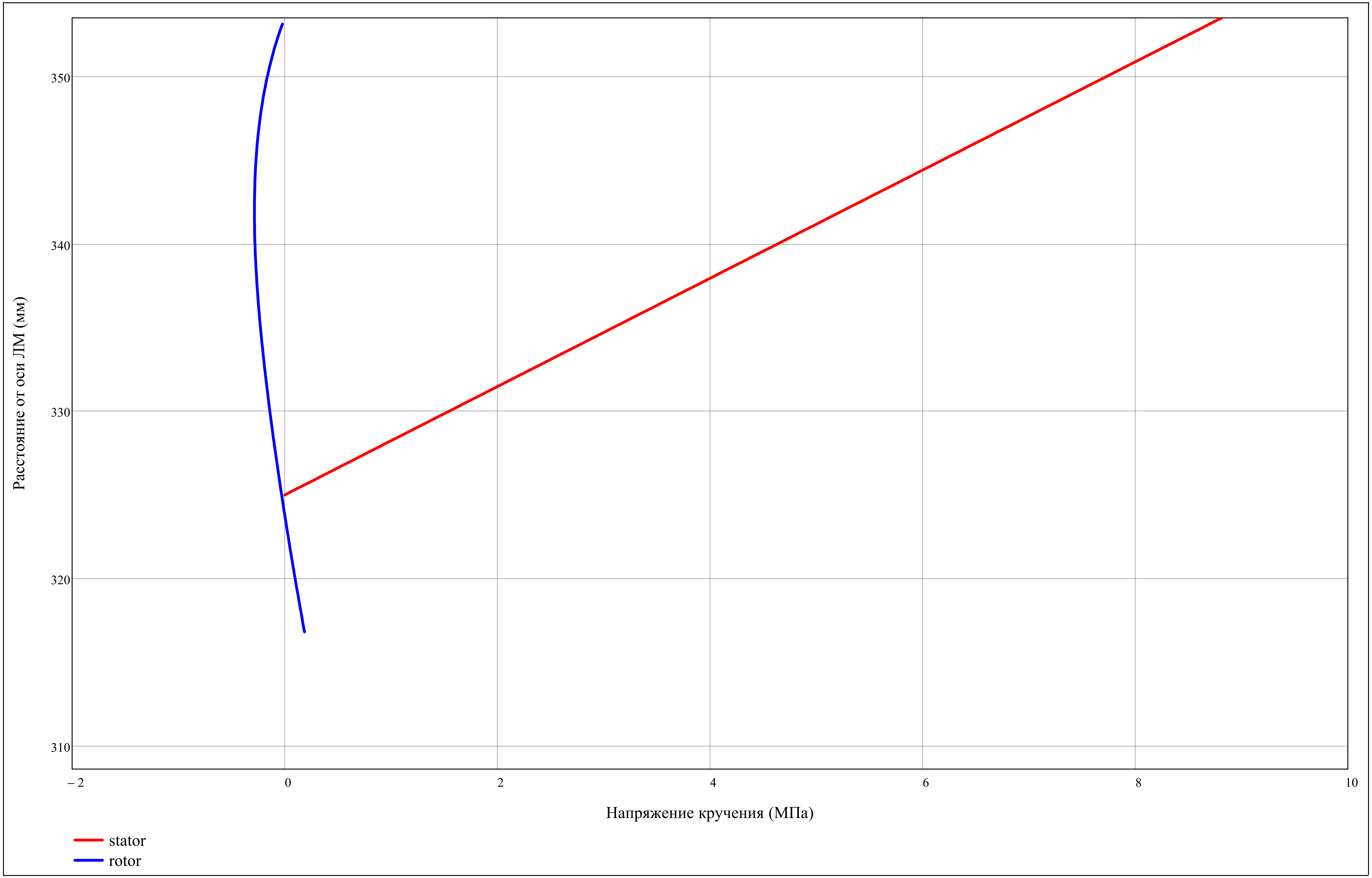

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
200
400
600
800
Растягивающее напряжение (МПа)
c.a1
c.a2
c.a3
c.u1
c.u2
c.u3



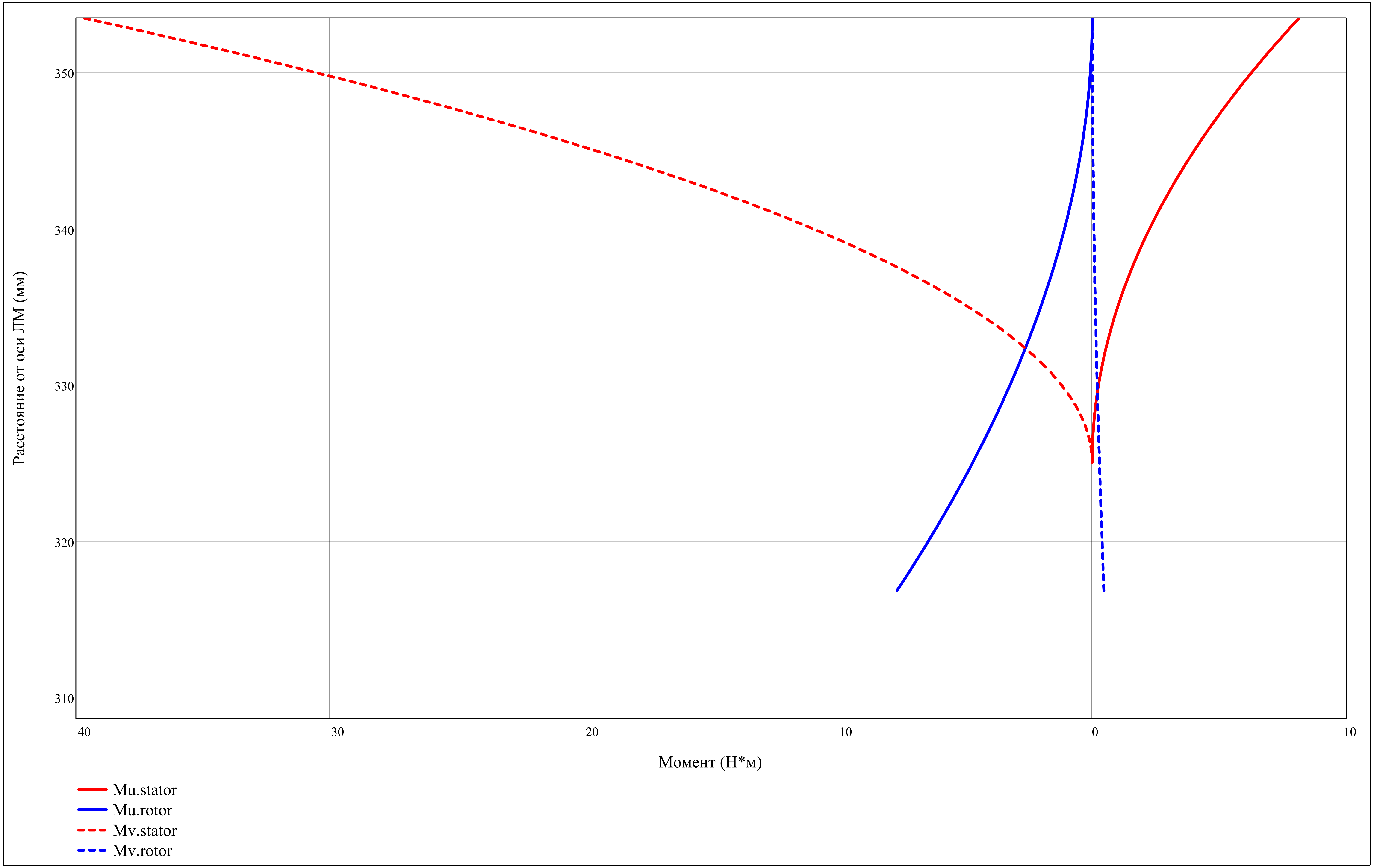
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 50
0
50
100
Распределенная нагрузка (кН/м)
qx.stator
qx.rotor
qy.stator
qy.rotor

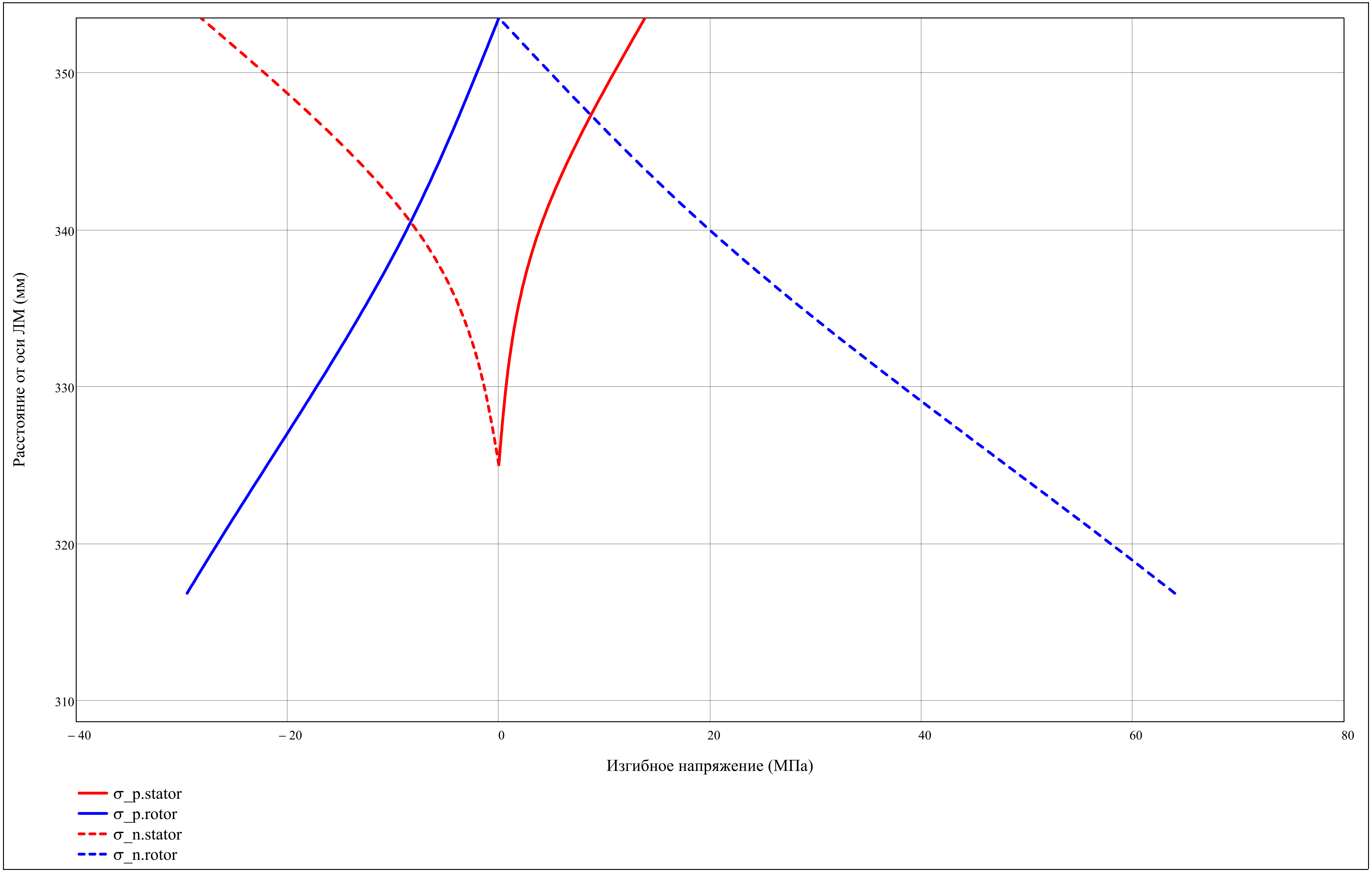

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 40
– 20
0
20
40
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor

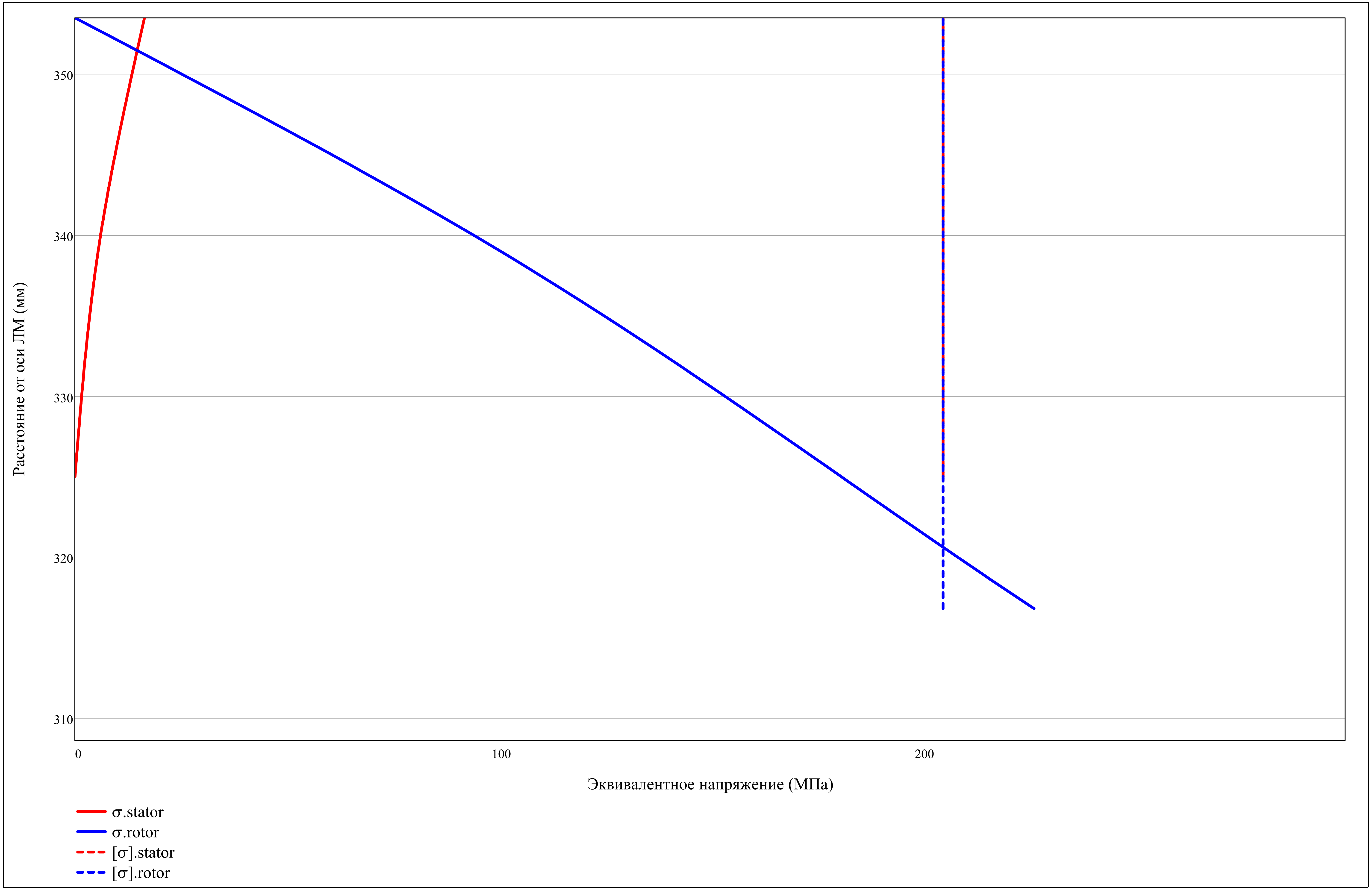

350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
Выносы Л РК (мм)
x
y



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


350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 40
– 20
0
20
40
60
80
Изгибное напряжение (МПа)
σ_p.stator
σ_p.rotor
σ_n.stator
σ_n.rotor

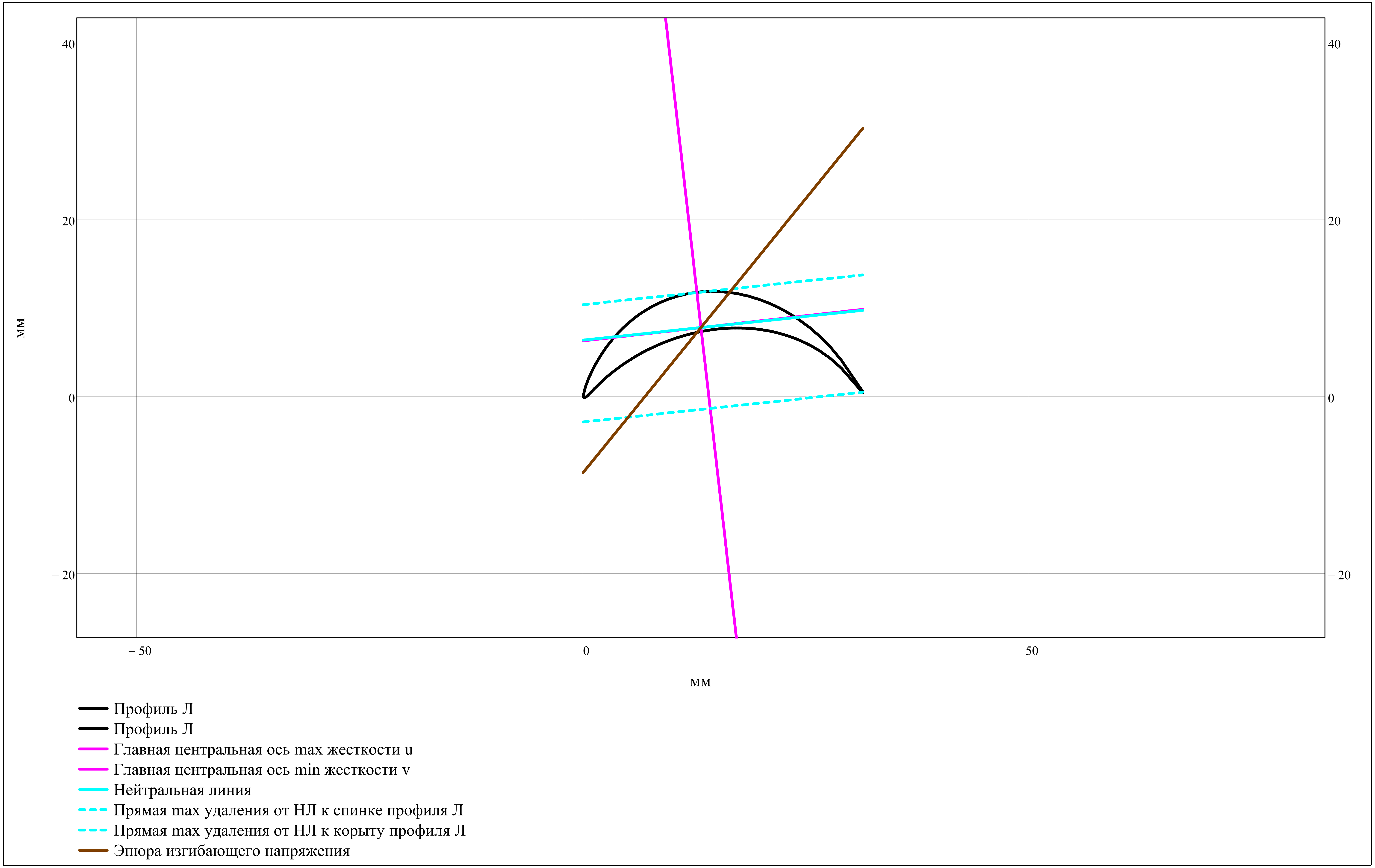

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
100
200
Эквивалентное напряжение (МПа)
σ.stator
σ.rotor
[σ].stator
[σ].rotor

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

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 4.007 \\ 2 & -9.250 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} x0_{rotor_{j,r}} \\ y0_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} x0_{stator_{j,r}} \\ y0_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 13.203 \\ 2 & 7.789 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\text{chord} = \left| \begin{array}{ll} \text{chord}_{rotor_{j,r}} & \text{if blade = "rotor"} \\ \text{chord}_{stator_{j,r}} & \text{if blade = "stator"} \end{array} \right. = 31.4 \cdot 10^{-3}$$


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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$\begin{pmatrix} u\_u_{rotor_{j,r}} & v\_u_{rotor_{j,r}} \\ u\_l_{rotor_{j,r}} & v\_l_{rotor_{j,r}} \\ u\_u_{stator_{j,r}} & v\_u_{stator_{j,r}} \\ u\_l_{stator_{j,r}} & v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} = \cdot 10^{-3}$$

	1	2
1	0.40	4.01
2	17.26	-9.25
3	8.16	8.19
4	-25.86	-14.48

$$\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor_{j,r}} & \sigma\_p_{stator_{j,r}} \\ \sigma\_n_{rotor_{j,r}} & \sigma\_n_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} = \cdot 10^{6}$$

	1	2
1	-9.3	3.5
2	21.2	-7.1

$$\begin{pmatrix} \sigma_{stator_{j,r}} \\ \sigma_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} = \cdot 10^{6}$$

	1
1	5.6
2	98.9

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

	1
1	36.592
2	2.072

▲ Результаты расчета на прочность Л

Вывод результатов расчета Л на прочность

Выбор материала Д

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

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

Плотность материала Д (кг/м^3):

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

Предел длительной прочности Д (Па):

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

$material\_disk^T =$

	1
1	"ВЖ175"

$\rho\_disk^T =$

	1
1	8266

$\sigma\_disk\_long^T =$

	1
1	620

$\cdot 10^6$

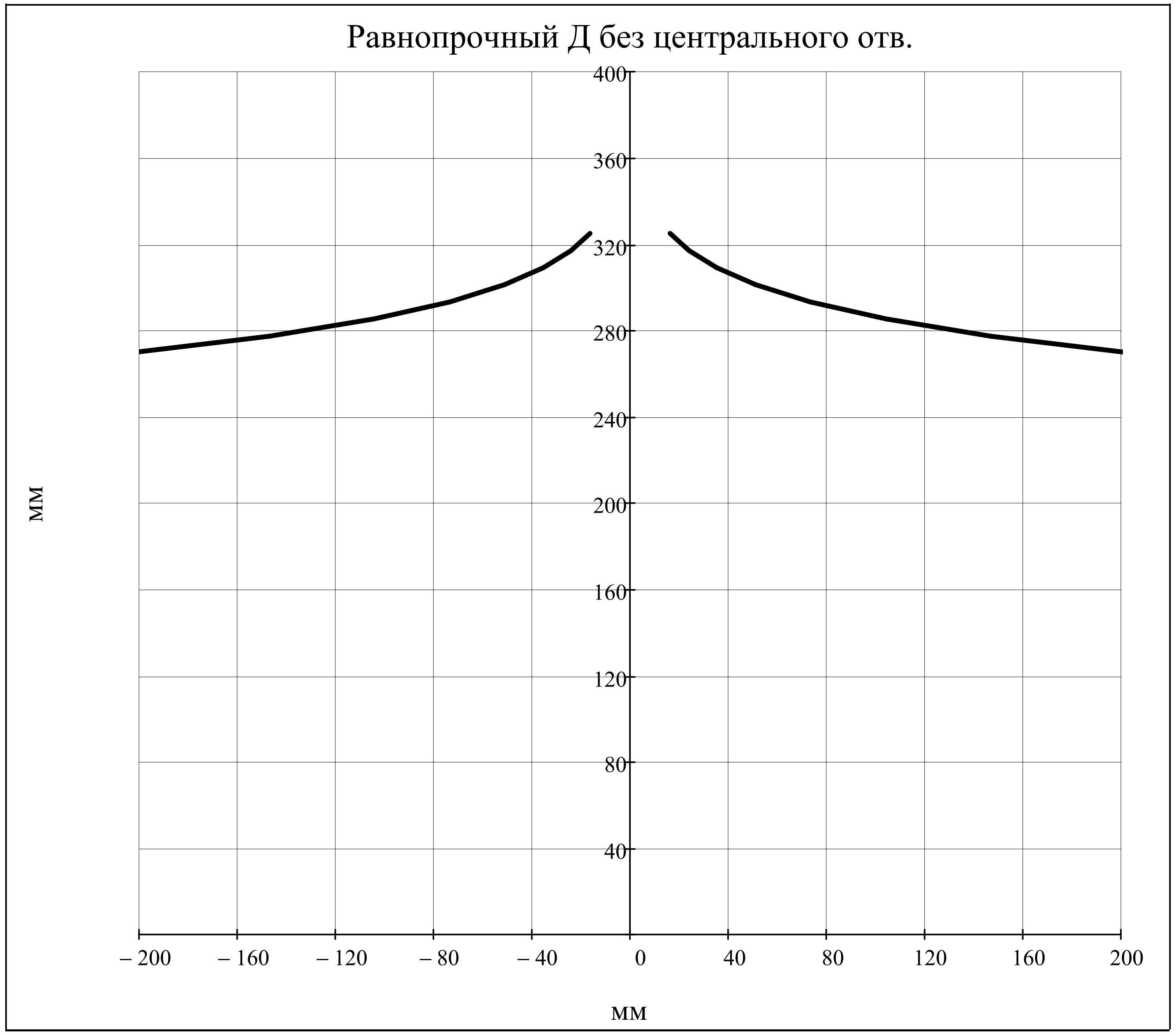
Выбор материала Д

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

Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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



Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

```
type =  | type = "stator"                                                  = "stator"
        | type = | "Нет такого типа!"   if  type ≠ "stator" ∧ type ≠ "rotor"
        |        | type   otherwise
```

Рассматриваемая ступень:

```
j =  | j = 1                                                  = 1
     | j = | "Такой ступени не существует!"   if  (j < 1) ∨ (j > Z)
     |     | j   otherwise
```

▶ Приведенная скорость по профилю Л

Общие параметры охлаждения

Конвективное охлаждение

▶ Результаты конвективного охлаждения

Конвективно-пленочное охлаждение

▶ Результат конвективно-пленочного охлаждения

Вывод результатов охлаждения

$D^T =$

	1	2	3	4	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

$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.0 \\ 926.4 \\ 146.2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.0 \\ 231.6 \\ 146.2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 520.2 \\ 450.5 \\ 503.9 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.48 \\ 89.02 \end{pmatrix} \cdot {}^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 510.5 \\ 510.5 \\ 484.8 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11.08 \\ 149.07 \\ 16.87 \end{pmatrix} \cdot {}^{\circ}$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.52 \cdot {}^{\circ}$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 132.2 \cdot {}^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.0 \\ 891.8 \\ 173.6 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.0 \\ 222.9 \\ 173.6 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 542.2 \\ 398.7 \\ 550.1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.48 \\ 90.64 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 532.9 \\ 532.9 \\ 520.0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.63 \\ 146.01 \\ 18.40 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.52 \cdot ^{\circ}$$

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

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.0 \\ 859.8 \\ 191.9 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.0 \\ 215.0 \\ 191.8 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 564.2 \\ 350.8 \\ 592.8 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.48 \\ 91.70 \end{pmatrix} \cdot {}^\circ$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 555.2 \\ 555.2 \\ 555.2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.21 \\ 142.22 \\ 18.88 \end{pmatrix} \cdot {}^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.52 \cdot {}^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 123.34 \cdot {}^\circ$$