Подключение библиотек

Основные уравнения, алгоритмы, зависимости и ф-и

▶ Параметры расчета

Исходные данные

Коэф. запаса: $safety = 1.3$

Горючее: $Fuel = \text{"Керосин"}$

$turbine = \text{"ТНД"}$

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

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

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

	1
1	35.43
2	0.04
3	0.81

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Абс. скорость перед Т (м/с):

Абс. скорость после Т (м/с):

$$\begin{pmatrix} c_{\text{Г}} \\ c_{\text{Т}} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} 100 \\ 180 \end{pmatrix} & \text{if turbine = "ТВД"} \\ \begin{pmatrix} 180 \\ 260 \end{pmatrix} & \text{if turbine = "ТНД"} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 180.0 \\ 2 & 260.0 \end{array}$$

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

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

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

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

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

$$u_{\text{Т}} = \left| \begin{array}{ll} 520 & \text{if turbine = "ТВД"} \\ 260 & \text{if turbine = "ТНД"} \end{array} \right. = 260.0$$

▲ Исходные данные

Основне размеры Т

$z = ORIGIN..N_r$

Полное давление отбора охлаждающего воздуха (К): $P*_{cooling} = P*_{cooling} \cdot \sigma_{cooling} = 309.8 \cdot 10^3$

Полная температура отбора охлаждающего воздуха (К): $T*_{cooling} = T*_{cooling} + \Delta T_{охл.подогрев} = 458.2$

Массовый расход перед Т (кг/с): $G_{Г} = G_{г} - G_{leak} = 35.4$

Массовый расход после Т (кг/с): $G_{т} = G_{г} + G_{cooling} = 36.2$

Удельная работа Т (Дж/кг): $L*_{T} = \dfrac{N_{T}}{mean\left(G_{г}, G_{т}\right)} = 424.1 \cdot 10^3$

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

Располагаемый теплоперепад в Т (Дж/кг): $H_{T} = \dfrac{L*_{T} + 0.5c_{т}^{2}}{\eta_{л}} = 520.3 \cdot 10^3$

```
$\begin{pmatrix}\text{iteration}\\ k_г\\ P_г\\ T_г\end{pmatrix} =$
    $\text{iteration} = 0$
    $k_г = k_{ад}\left(Cp_{газ}\left(P^*_г, T^*_г, \alpha_{ox}, \text{Fuel}\right), R_{газ}\left(\alpha_{ox}, \text{Fuel}\right)\right)$
    while $1 > 0$
        $\text{iteration} = \text{iteration} + 1$
        $Cp_г = \frac{k_г}{k_г - 1} \cdot R_{газ}\left(\alpha_{ox}, \text{Fuel}\right)$
        $T_г = T^*_г - \frac{c_г^2}{2 \cdot Cp_г}$
        $P_г = P^*_г \cdot \left(\frac{T_г}{T^*_г}\right)^{\frac{k_г}{k_г - 1}}$
        $k'_г = k_{ад}\left(Cp_{газ}\left(P_г, T_г, \alpha_{ox}, \text{Fuel}\right), R_{газ}\left(\alpha_{ox}, \text{Fuel}\right)\right)$
        if $\left|eps\left(\text{"rel"}, k_г, k'_г\right)\right| \le epsilon$
            $k_г = k'_г$
            break
        $k_г = k'_г$
    $\left(\text{iteration}\ \ k_г\ \ P_г\ \ T_г\right)^T$
=
```

	1
1	1.0
2	1.3
3	890047.3
4	1356.0

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

Показатель адиабаты перед Т: $k_г = 1.298$

Статическое давление перед Т (Па): $P_г = 890 \cdot 10^3$

Статическая температура перед Т (К): $T_г = 1356$

Теплоемкость перед Т (Дж/кг/К): $Cp_г = Cp_{газ}\left(P_г, T_г, \alpha_{ox}, \text{Fuel}\right) = 1256$

```
$\begin{pmatrix} \text{iteration} \\ k_{\text{т}} \\ P_{\text{т}} \\ T_{\text{т}} \end{pmatrix}$ =
    iteration = 0
    $k_{\text{т}} = k_{\text{г}}$
    while 1 > 0
        iteration = iteration + 1
        $k_{\text{ср}} = \text{mean}(k_{\text{г}}, k_{\text{т}})$
        $Cp = \frac{k_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}} - 1} \cdot R_{\text{газ}}(\alpha_{\text{ох}}, Fuel)$
        $P_{\text{т}} = P^*_{\text{г}} \cdot \left(1 - \frac{H_{\text{Т}}}{Cp \cdot T^*_{\text{г}}}\right)^{\frac{k_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}}-1}}$
        $T_{\text{т}} = T^*_{\text{г}} - \frac{H_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{л}}}{Cp}$
        $k'_{\text{т}} = k_{\text{ад}}(Cp_{\text{газ}}(P_{\text{т}}, T_{\text{т}}, \alpha_{\text{ох}}, Fuel), R_{\text{газ}}(\alpha_{\text{ох}}, Fuel))$
        if $|eps(\text{"rel"}, k_{\text{т}}, k'_{\text{т}})| \le epsilon$
            $k_{\text{т}} = k'_{\text{т}}$
            break
        $k_{\text{т}} = k'_{\text{т}}$
    $(\text{iteration} \;\; k_{\text{т}} \;\; P_{\text{т}} \;\; T_{\text{т}})^T$
=
```

	1
1	2
2	1.32
3	191463.061
4	994.672

Количество итераций: iteration = 2

Показатель адиабаты после Т: $k_{\text{т}} = 1.320$

Статическое давление после Т (Па): $P_{\text{т}} = 191.5 \cdot 10^3$ $P_{\text{т}} \ge P_{\text{атм}}(H_{\upsilon}) = 1$

Статическая температура после Т (К): $T_{\text{т}} = 994.7$

Теплоемкость после Т (Дж/кг/К): $Cp_{\text{т}} = Cp_{\text{газ}}(P_{\text{т}}, T_{\text{т}}, \alpha_{\text{ох}}, Fuel) = 1190.6$

Ср. показатель адиабаты Т: $k = \mathrm{mean}\left(k_{\text{г}}, k_{\text{т}}\right) = 1.309$

Ср. теплоемкость Т (Дж/кг/К): $Cp = \dfrac{k}{k-1} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}}, \mathrm{Fuel}\right) = 1222.3$

Степень понижения давле ния: $\pi_{T} = \dfrac{P*_{\text{г}}}{P_{\text{т}}} = 4.84$

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

$$\begin{pmatrix} v_{\text{г}} \\ v_{\text{т}} \end{pmatrix} = R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}}, \mathrm{Fuel}\right) \cdot \begin{pmatrix} \dfrac{T_{\text{г}}}{P_{\text{г}}} \\ \dfrac{T_{\text{т}}}{P_{\text{т}}} \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|r|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 0.440 \\ \hline 2 & 1.499 \\ \hline \end{array}$$

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

$$\begin{pmatrix} F_{\text{г}} \\ F_{\text{т}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{G_{\text{г}} \cdot v_{\text{г}}}{c_{\text{г}}} \\ \dfrac{G_{\text{т}} \cdot v_{\text{т}}}{c_{\text{т}}} \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|r|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 86421 \\ \hline 2 & 208684 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-6}$$

Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

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

Определение количества ступеней Т

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

```
$c_{cp} = \text{mean}(c_г, c_т)$
$\alpha_{возв} = 0.025$
while $1 > 0$
    $Z = \text{round}\left[\dfrac{2 \cdot H_T \cdot \dfrac{(1+\alpha_{возв})}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2} - 1}{\dfrac{u_T^2}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2 \cdot y_0^2} - 1}\right]$
    break if $\left|\text{eps}\left[\text{"rel"}, \alpha_{возв}, \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_T^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_л)\right]\right| < \text{epsilon}$
    $\alpha_{возв} = \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_T^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_л)$
    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	5.000
2	0.022

Рекомендуемое количество ступеней: $Z_{recomend} = 5$

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

Дискретизация ступеней: $i = 1 .. Z$

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

Определение количества ступеней Т

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

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

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

$material\_blade^T =$

	1	2	3	4
1	"ВЖМ7"	"ВЖМ7"	"ВЖМ7"	"ВЖМ7"

$\rho\_blade^T =$

	1	2	3	4
1	8390	8390	8390	8390

$\sigma\_blade\_long^T =$

	1	2	3	4
1	120	120	120	120

$\cdot 10^6$

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): $\sqrt{\frac{\sigma\_blade\_long_Z}{safety\cdot k_n\cdot F_г}} = 12533$

Max частота вращения ротора на выходе (об/мин): $n_{max} = \sqrt{\frac{\sigma\_blade\_long_Z}{safety\cdot k_n\cdot F_т}} = 8065$

Рекомендукмая ном. частота вращения (об/мин): $n = n_{max}\cdot 0.95 = 7662$

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

Ном. частота вращения (рад/с): $\omega = \frac{2\cdot\pi\cdot n}{60} = 555.0$

Ср. диаметр перед Т (м):

Ср. диаметр после Т (м):

$$\begin{pmatrix} D_{г.ср} \\ D_{т.ср} \end{pmatrix} = \frac{2}{\omega}\cdot\begin{pmatrix} u_г \\ u_т \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 936.9 \\ 2 & 936.9 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Длина Л первой ступени Т (м):

Длина Л последней ступени Т (м):

$$\begin{pmatrix} l_г \\ l_т \end{pmatrix} = \frac{1}{\pi}\cdot\begin{pmatrix} \frac{F_г}{D_{г.ср}} \\ \frac{F_т}{D_{т.ср}} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 29.36 \\ 2 & 70.90 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{l_г}{D_{г.ср}} = \frac{1}{31} \qquad \frac{l_т}{D_{т.ср}} = \frac{1}{13}$$

Диаметр периферии после Т (м):

Диаметр корня после Т (м):

$$\begin{pmatrix} D_{т.пер} \\ D_{т.кор} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{т.ср} + l_т \\ D_{т.ср} - l_т \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1007.8 \\ 2 & 866.0 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Частота вращения Т

Равномерное распределение мощности Т по ступеням (Вт): $N_{ст_i} = \frac{N_Т}{Z}$

$N_{ст}^{T} =$

	1	2	3	4
1	3.80	3.80	3.80	3.80

$\cdot 10^{6}$

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

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

Определение проточной части ОТ

Линейное распределение кольцевых площадей по сечениям:

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

$F^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	86421	101704	116987	132270	147553	162836	178118	193401	208684

$\cdot 10^{-6}$

```
$D =$
  for $i \in 2Z + 1$
    for $r \in 1 .. N_r$
      $D_{i,r} = \begin{cases} D_{т.кор} & \text{if } r = 1 \\ D_{т.ср} & \text{if } r = av(N_r) \\ D_{т.пер} & \text{if } r = N_r \end{cases}$
  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	620.7	620.7	651.1	698.2	750.4	802.7	843.9	866.0	866.0
2	662.2	669.0	704.0	754.0	808.5	862.8	906.5	932.1	936.9
3	703.7	717.4	756.9	809.9	866.6	922.9	969.0	998.1	1007.8

$\cdot 10^{-}$

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

$R^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	310.3	310.3	325.6	349.1	375.2	401.4	422.0	433.0	433.0
2	331.1	334.5	352.0	377.0	404.2	431.4	453.2	466.0	468.5
3	351.9	358.7	378.4	404.9	433.3	461.4	484.5	499.1	503.9

$\cdot 10^{-3}$

```
$\overline{d} =$
  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	0.8819	0.8651	0.8602	0.8621	0.8659	0.8698	0.8709	0.8677	0.8593

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	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	4	5	6	7	8	9
1	41.54	48.39	52.90	55.84	58.09	60.07	62.55	66.05	70.90

$\cdot 10^{-3}$

```
        $D_{st(i,a+1),N_r}$   if  $r = N_r$
      if $(ЗППЧ_{i,a} \ne "const") \wedge (ЗППЧ_{i,a} \ne "кор") \wedge (ЗППЧ_{i,a} \ne "ср") \wedge (ЗППЧ_{i,a} \ne "пер")$
        $\sqrt{\left(\frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{str2num(ЗППЧ_{i,a})}\right)^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}}$   if  $r = 1$
        $\frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{str2num(ЗППЧ_{i,a})}\right)^2 - \frac{4 \cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} + \frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{str2num(ЗППЧ_{i,a})}\right]$   if  $r = av(N_r)$
        $\frac{D_{st(i,a+1),N_r}}{str2num(ЗППЧ_{i,a})}$   if  $r = N_r$
      NaN   otherwise
  D
```

```
$u :=$  for $i \in 1 .. 2 \cdot Z + 1$
          for $r \in 1 .. N_r$
            $u_{i,r} \leftarrow \frac{\pi \cdot D_{i,r} \cdot n}{60}$
        u
```

$u^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	172.2	172.2	180.7	193.8	208.2	222.8	234.2	240.3	240.3
2	183.8	185.7	195.4	209.3	224.4	239.4	251.6	258.7	260.0
3	195.3	199.1	210.0	224.7	240.5	256.1	268.9	277.0	279.7

$F^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	86421	101704	116987	132270	147553	162836	178118	193401	208684

$\cdot 10^{-6}$

$\overline{d}_1 = 0.8819$ $\overline{d}_1 \leq 0.9 = 1$

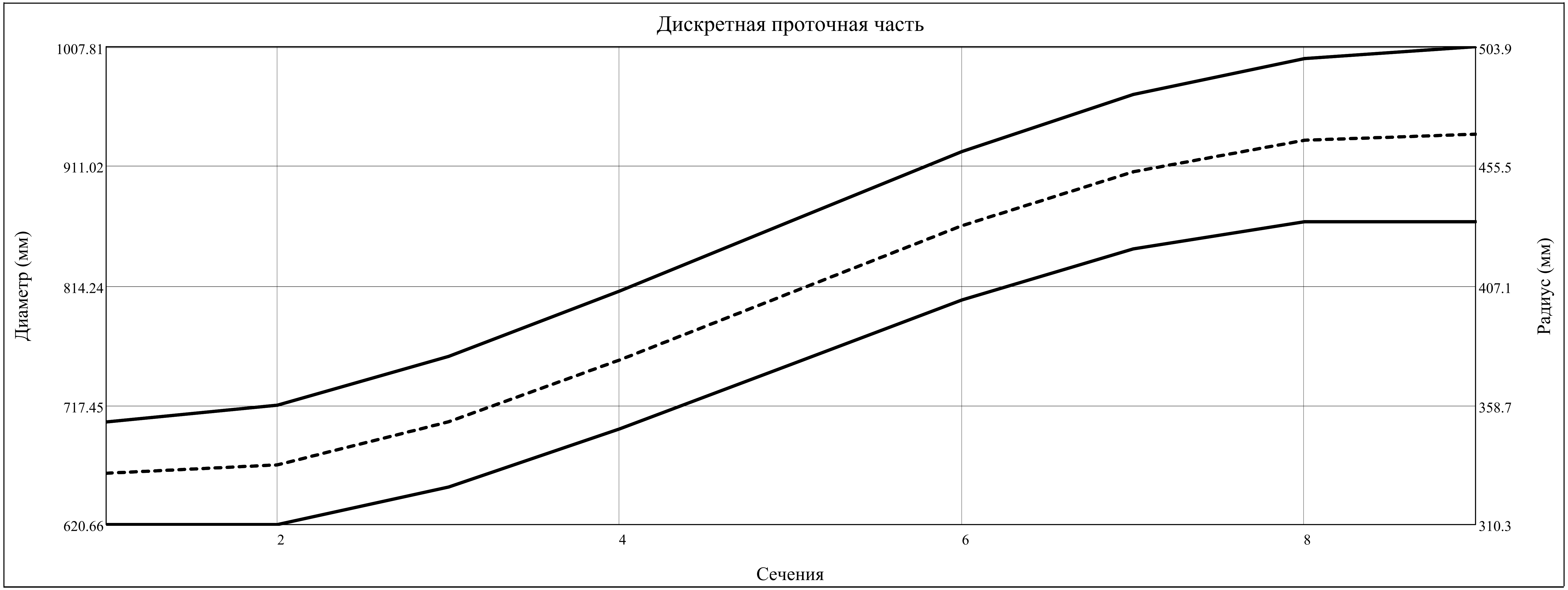
$\overline{d}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.8819	0.8651	0.8602	0.8621	0.8659	0.8698	0.8709	0.8677	0.8593

$D^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	620.7	620.7	651.1	698.2	750.4	802.7	843.9	866.0
2	662.2	669.0	704.0	754.0	808.5	862.8	906.5	932.1
3	703.7	717.4	756.9	809.9	866.6	922.9	969.0	...

$\cdot 10^{-3}$


Дискретная проточная часть

$h^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	41.54	48.39	52.90	55.84	58.09	60.07	62.55	66.05	70.90

$\cdot 10^{-3}$

Осевая ширина Л СА и РК [1, с.183]:

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

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

	1	2	3	4
1	40.1	45.1	51.7	55.8
2	32.0	36.7	41.2	42.6

$\cdot 10^{-3}$

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	4	5	6	7	8	9
1	0.704	0.717	0.757	0.810	0.867	0.923	0.969	0.998	1.008

$\cdot 10^{-3}$

$\Delta_a{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	10.014	11.282	12.924	13.957

$\cdot 10^{-3}$

$0.2 \le \dfrac{\Delta_{a_i}}{B_{CA_i}} \le 0.25 =$

1
1
1
1

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	25.44	27.56	35.37	26.86	26.56	11.18	0.00
2	9.70	6.22	2.86	2.27	1.72	2.68	3.42	6.50
3	9.70	31.66	30.41	37.64	28.58	29.25	14.59	6.50

$\cdot°$

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 20 \cdot ° =$

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

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 25 \cdot ° =$

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

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -12 \cdot ° =$

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

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -15 \cdot ° =$

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

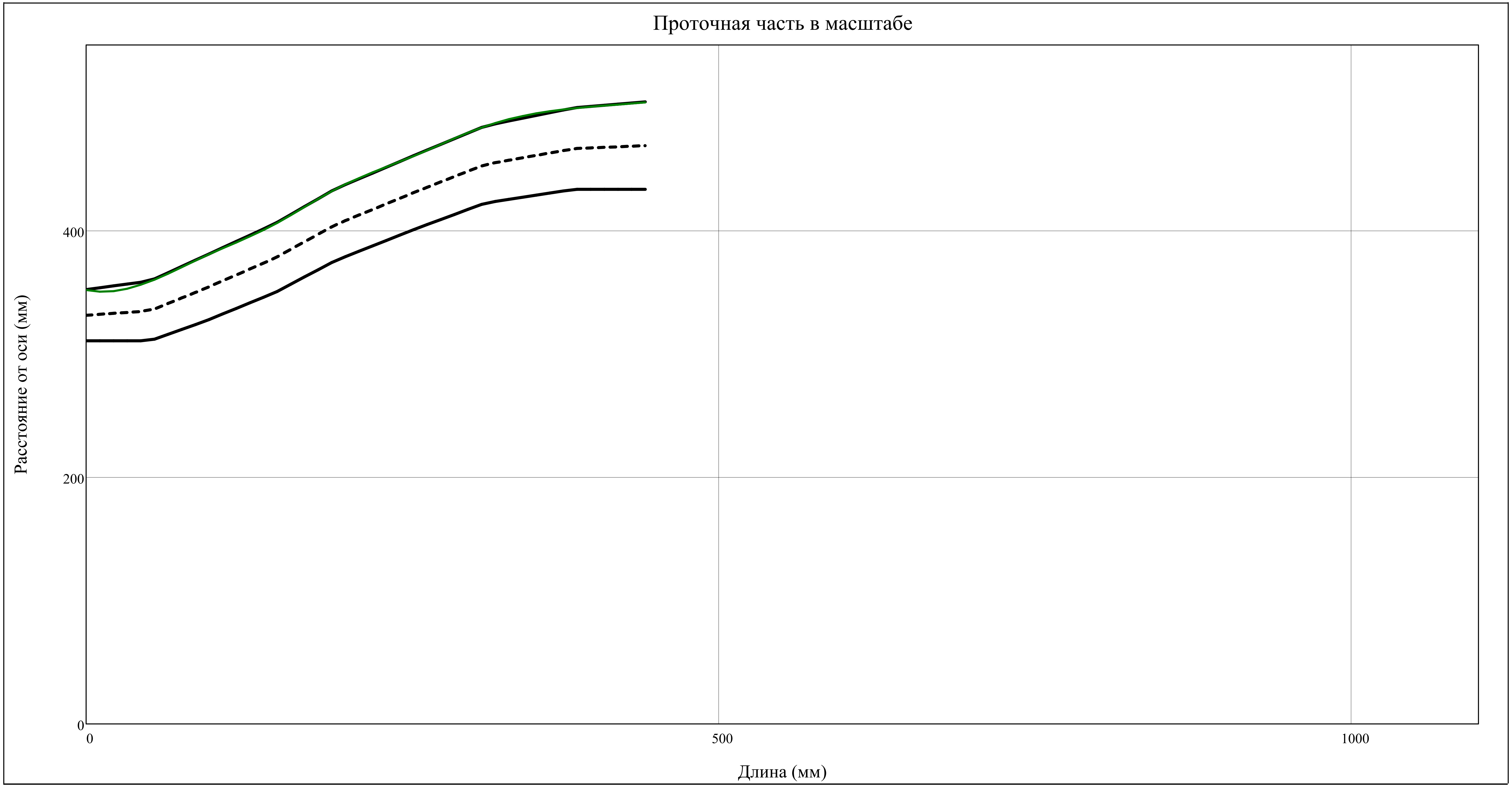
```
$\begin{pmatrix} x_{ПЧ} \\ y_{ПЧпер} \\ y_{ПЧср} \\ y_{ПЧкор} \\ y_{Лпер} \end{pmatrix} =$
    $c = 1$
    $x_{ПЧ_{c}} = 0$
    $y_{ПЧпер_{c}} = D_{st(c,1),N_r}$
    $y_{Лпер_{c}} = y_{ПЧпер_{c}} - \Delta_{r_c}$
    $y_{ПЧср_{c}} = D_{st(c,1),av(N_r)}$
    $y_{ПЧкор_{c}} = D_{st(c,1),1}$
    for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

$$Length = \sum_{i=1}^{Z} B_{CA_i} + \sum_{i=1}^{Z} \Delta_{a_i} + \sum_{i=1}^{Z} B_{PK_i} = 393.4\cdot10^{-3}$$

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

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

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



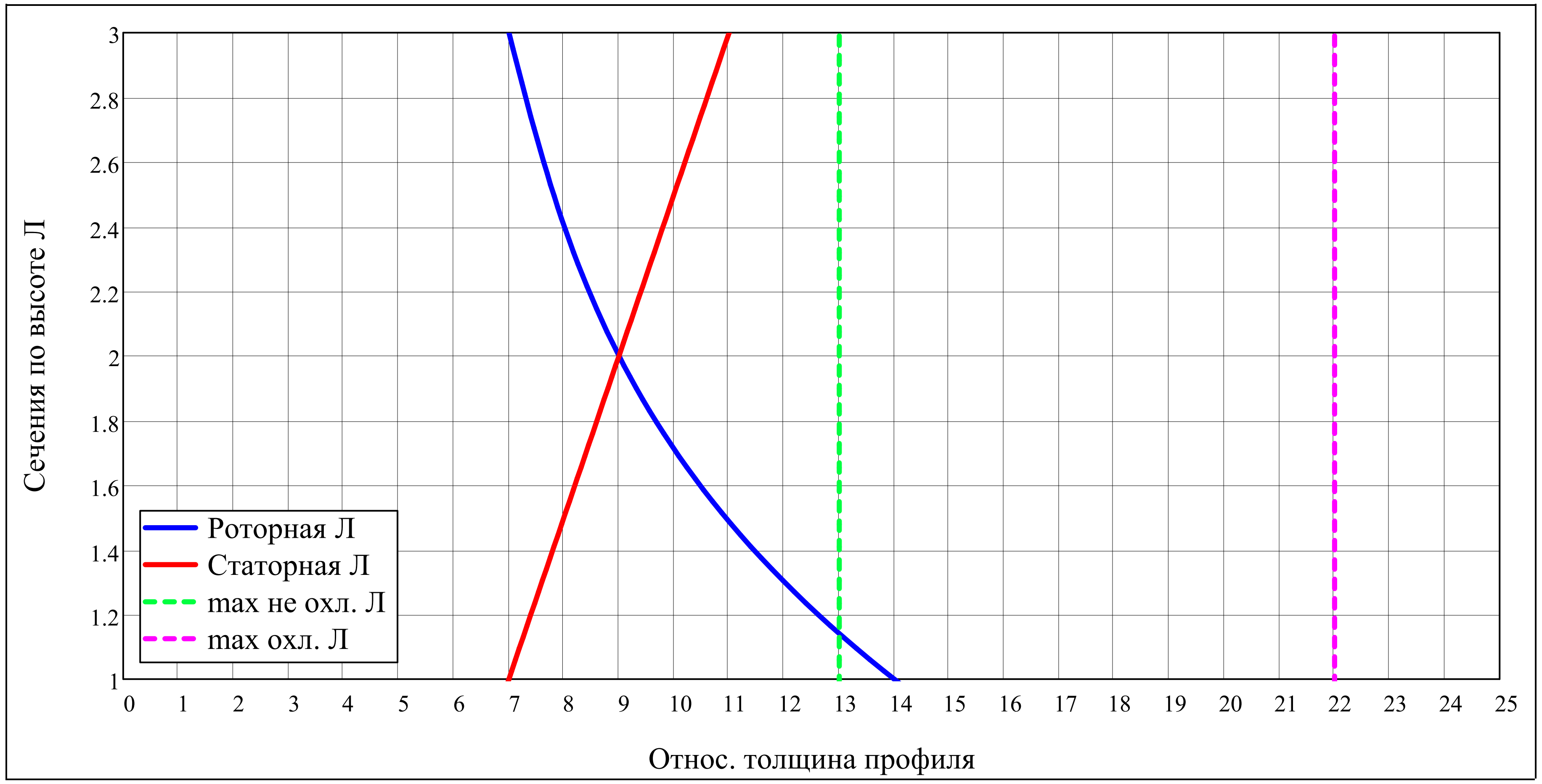
▲ Определение проточной части ОТ

Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

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

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



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

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

	1	2	3	4
1	7.00	7.00	7.00	7.00
2	9.00	9.00	9.00	9.00
3	11.00	11.00	11.00	11.00

$\cdot\%$

$\overline{c}_{rotor}^{\,T} =$

	1	2	3	4
1	14.00	14.00	14.00	14.00
2	9.00	9.00	9.00	9.00
3	7.00	7.00	7.00	7.00

$\cdot\%$

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

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

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

	1	2	3	4
1	2.800	2.800	2.800	2.800
2	3.600	3.600	3.600	3.600
3	4.400	4.400	4.400	4.400

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	4.900	4.900	4.900	4.900
2	3.150	3.150	3.150	3.150
3	2.450	2.450	2.450	2.450

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	1.400	1.400	1.400	1.400
2	1.800	1.800	1.800	1.800
3	2.200	2.200	2.200	2.200

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	2.100	2.100	2.100	2.100
2	1.350	1.350	1.350	1.350
3	1.050	1.050	1.050	1.050

$\cdot\%$

▲ Относ. толщины и радиусы профилей

▶ Вывод результатов поступенчатого расчета продольной геометрии ОТ в EXCEL:

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

Поступенчатый расчет ОТ

$$\begin{pmatrix} iteration_{CA} & iteration_{PK} \\ k & R_L \\ H^*_{\text{ст}} & H_{\text{ст}} \\ H_{stator} & H_{rotor} \\ c_{\text{ад}} & w_{\text{ад}} \\ P^* & P \\ T^* & T \\ G & v \\ \rho^* & \rho \\ \alpha_{ox} & \alpha_{ox} \\ \alpha & \beta \\ \varepsilon_{stator} & \varepsilon_{rotor} \\ \theta_{CA} & \theta_{PK} \\ g_{\text{охл}CA} & g_{\text{охл}PK} \\ a^*_c & a^*_w \\ T_{\text{ад}} & T_{\text{ад}} \\ P^*_w & T^*_w \\ a_{\text{зв}} & a_{\text{зв}} \\ u & u \\ c & c \\ c_a & c_u \\ w & w \\ w_a & w_u \\ \lambda_c & M_c \\ \lambda_w & M_w \\ \upsilon_{stator} & \upsilon_{rotor} \end{pmatrix} =$$

```
r = av(N_r)
for i ∈ 1 .. Z
    trace(concat("ступень i = ", num2str(i)))
```

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

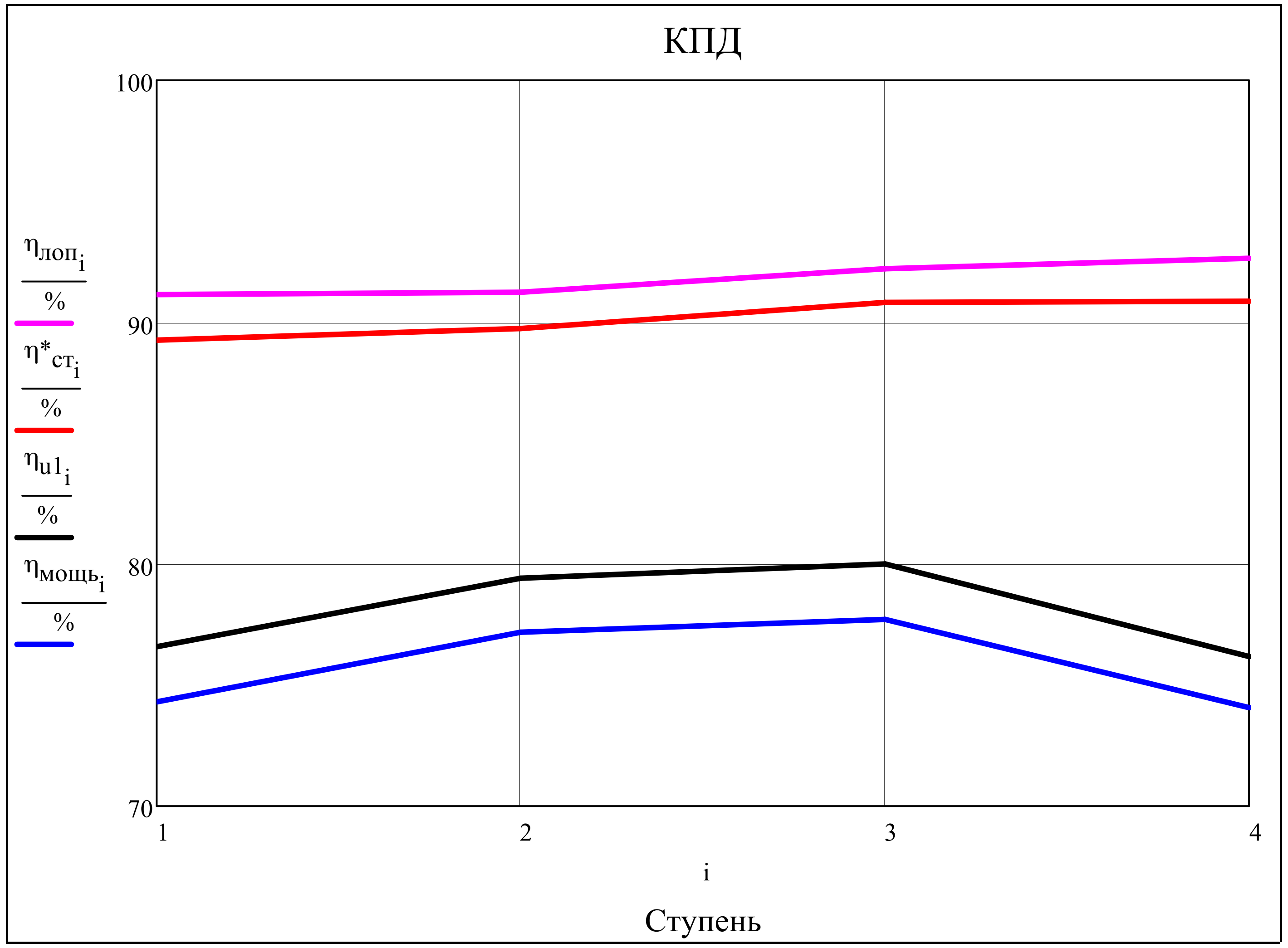
$$k_{\text{ср}} = k_{\text{ад}}\left(Cp_{\text{газ.ср}}\left(P_{st(i,1),r}, P_{st(i,3),r}, T_{st(i,1),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right), R_{\text{газ.ср}}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, \text{Fuel}\right)\right)$$

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

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

▲ Поступенчатый расчет ОТ

Параметры турбины



$\eta_{лоп}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	91.14	91.24	92.21	92.64

$\cdot\%$

$\eta^*_{ст}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	89.26	89.74	90.83	90.86

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	76.58	79.42	80.00	76.17
2	76.26	79.19	79.84	75.97

$\cdot\%$

$\eta_{мощь}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	74.31	77.19	77.72	74.06

$\cdot\%$

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

1
1
1
1

Степень понижения полного давления Т:
Степень понижения давления Т:

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

	1
1	4.05
2	4.44

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

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

	1
1	475.6
2	565.8

$\cdot 10^3$

Мощность Т (Вт): $\sum_{i=1}^{Z} N_{ст_i} = 15.18 \cdot 10^6$

$$eps\left("rel", N_T, \sum_{i=1}^{Z} N_{ст_i}\right) = 0.000 \cdot \%$$

Удельная поступенчатая работа Т [Дж/кг]: $L_T = \sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} = 428.9 \cdot 10^3$

Лопаточный КПД Т:

$$\eta_{Tлоп} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} + \frac{\left(c_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^2}{2}}{H_T} = 80.55 \cdot \%$$

$$k_{T.cp} = k_{ад}\left(Cp_{газ.cp}\left(P_{st(1,1),av(N_r)}, P_{st(Z,3),av(N_r)}, T_{st(1,1),av(N_r)}, T_{st(Z,3),av(N_r)}, \alpha ox_{st(1,1)}, \alpha ox_{st(Z,3)}, Fuel\right), R_{газ.cp}\left(\alpha ox_{st(1,1)}, \alpha ox_{st(Z,3)}, Fuel\right)\right) = 1.308$$

Адиабатный КПД Т: $\eta^*_T = \frac{L_T}{H^*_T} = 90.18 \cdot \%$

Политропический КПД Т: $\eta^*_{T.п} = \eta^*_{п}\left("расширение", \eta^*_T, \pi^*_T, k_{T.cp}\right) = 88.59 \cdot \%$

Мощностной КПД Т:

$$\eta_{Tмощь} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)}}{H_T} = 75.80 \cdot \%$$

$L_{\text{ст}}^{T} =$

	1	2	3	4
1	107.1	107.2	107.2	107.2

$\cdot 10^{3}$

$N_{\text{ст}}^{T} =$

	1	2	3	4
1	3.8	3.8	3.8	3.8

$\cdot 10^{6}$

$Lu_{\text{ст}}^{T} =$

	1	2	3	4
1	110.4	110.3	110.4	110.3

$\cdot 10^{3}$

$Lu_{\text{нагрузка}}^{T} =$

	1	2	3	4
1	3.0	2.3	1.8	1.6

$H_{\text{ст}}^{T} =$

	1	2	3	4
1	144.2	138.9	138.0	144.8

$\cdot 10^{3}$

$\text{stack}\left(H_{\text{stator}}^{T}, H_{\text{rotor}}^{T}\right) =$

	1	2	3	4
1	125.4	118.1	113.1	118.0
2	18.8	20.9	24.9	26.9

$\cdot 10^{3}$

$\text{submatrix}\left(R_L^{T}, \text{av}(N_r), \text{av}(N_r), 1, Z\right) =$

	1	2	3	4
1	0.1	0.2	0.2	0.2

$G^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	35.394	35.394	35.394	35.394	35.394	35.394	35.394	...

$\alpha_{\text{ох}}^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493

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

	1	2	3	4
1	-0.005	-0.112	-0.246	-0.420
2	-0.066	-0.192	-0.354	-0.568

$\text{stack}\left(g_{\text{охлСА}}^{T}, g_{\text{охлРК}}^{T}\right) =$

	1	2	3	4
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00

$\cdot 10^{-3}$

$G_{\text{охлСА}_i} = g_{\text{охлСА}_i} \cdot G_{st(i,1)}$

$G_{\text{охлРК}_i} = g_{\text{охлРК}_i} \cdot G_{st(i,2)}$

$\text{stack}\left(G_{\text{охлСА}}^{T}, G_{\text{охлРК}}^{T}\right) =$

	1	2	3	4
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0

$$\sum_{i=1}^{Z} G_{\text{охлСА}_i} + \sum_{i=1}^{Z} G_{\text{охлСА}_i} \le G_{\text{cooling}} = 1$$

$G_{\text{cooling}} = 0.8$

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

	1	2	3	4
1	2	2	2	2
2	2	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	4	5	6	7	8	9
1	1.298	1.302	1.303	1.306	1.307	1.312	1.313	1.319	1.320

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	927.5	915.4	676.8	666.5	483.6	476.7	338.0	332.9	229.2

$\cdot 10^{3}$

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	890.0	666.9	633.4	485.6	456.7	343.4	317.3	229.2	208.8

$\cdot 10^{3}$

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1368.9	1369.9	1281.1	1282.0	1192.3	1193.3	1102.4	1103.7	1011.4

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1356.0	1272.9	1261.6	1190.2	1176.4	1103.8	1085.9	1008.5	988.8

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	1316.2	1317.8	1225.7	1228.4	1134.0	1136.6	1041.5	1042.0

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	1269.1	1257.7	1186.0	1173.2	1100.2	1083.3	1004.9	986.0

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

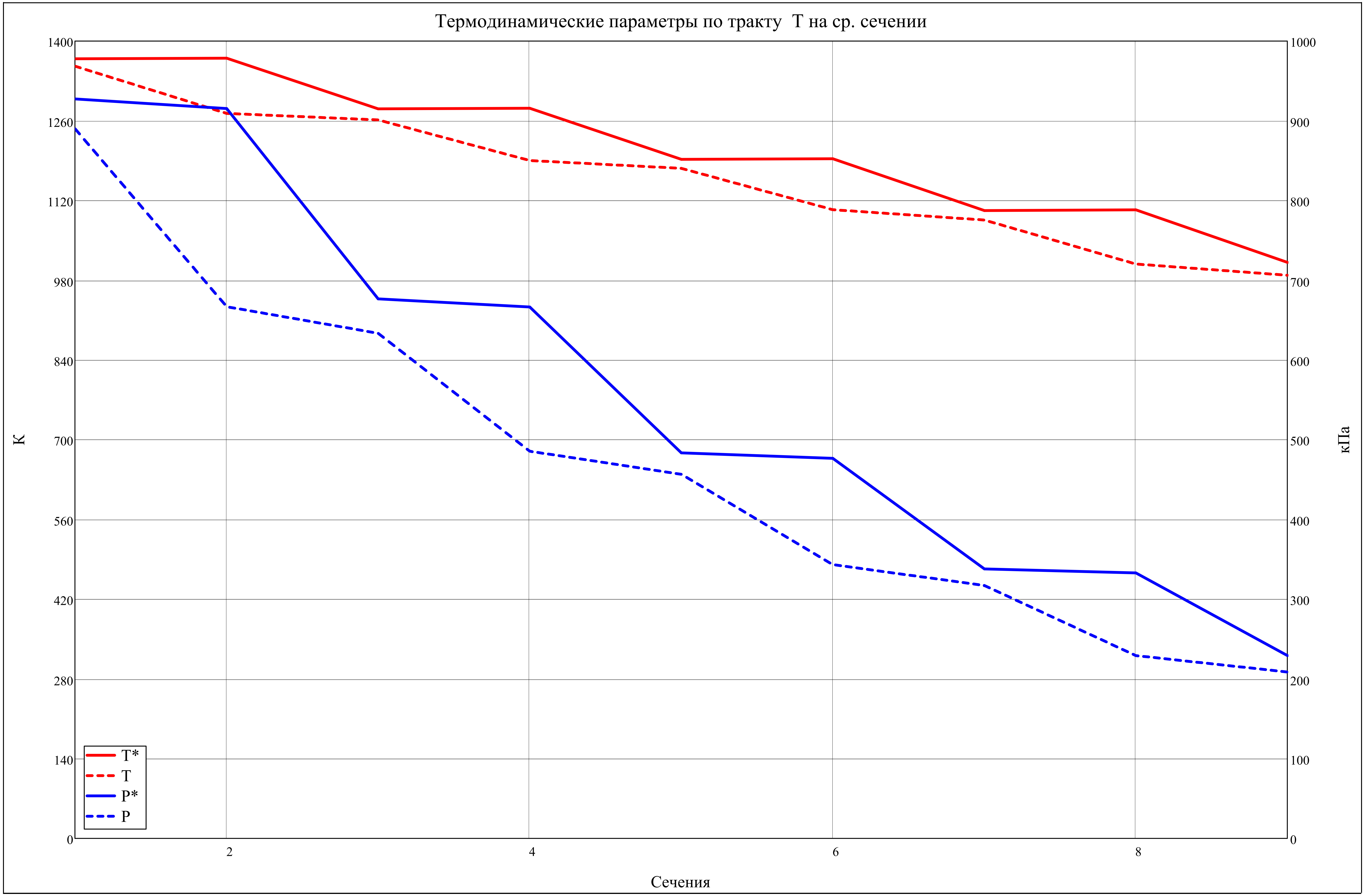
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.440	0.551	0.575	0.707	0.743	0.927	0.987	1.269	1.366

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.349	2.316	1.831	1.802	1.406	1.385	1.063	1.046	0.785

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.275	1.816	1.741	1.414	1.346	1.078	1.013	0.788	0.732



Термодинамические параметры по тракту Т на ср. сечении

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	712.6	691.4	688.5	669.8	666.1	646.3	641.3	619.4	613.7

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	667.9	668.6	646.6	647.3	624.3	625.0	600.9	601.8	576.2

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	655.4	655.8	632.9	633.7	609.3	610.1	584.6	584.9

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	491.2	220.3	475.1	197.6	466.2	200.0	476.7	231.9

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	452.3	135.3	435.8	85.3	420.3	38.7	416.3	10.0

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	191.6	173.8	189.2	178.3	201.6	196.2	232.3	231.7

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	328.4	373.6	295.2	357.3	270.8	350.4	280.7	355.8

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	266.7	330.7	226.5	309.6	180.9	290.3	157.7	270.0

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	191.6	173.8	189.2	178.3	201.6	196.2	232.3	231.7

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

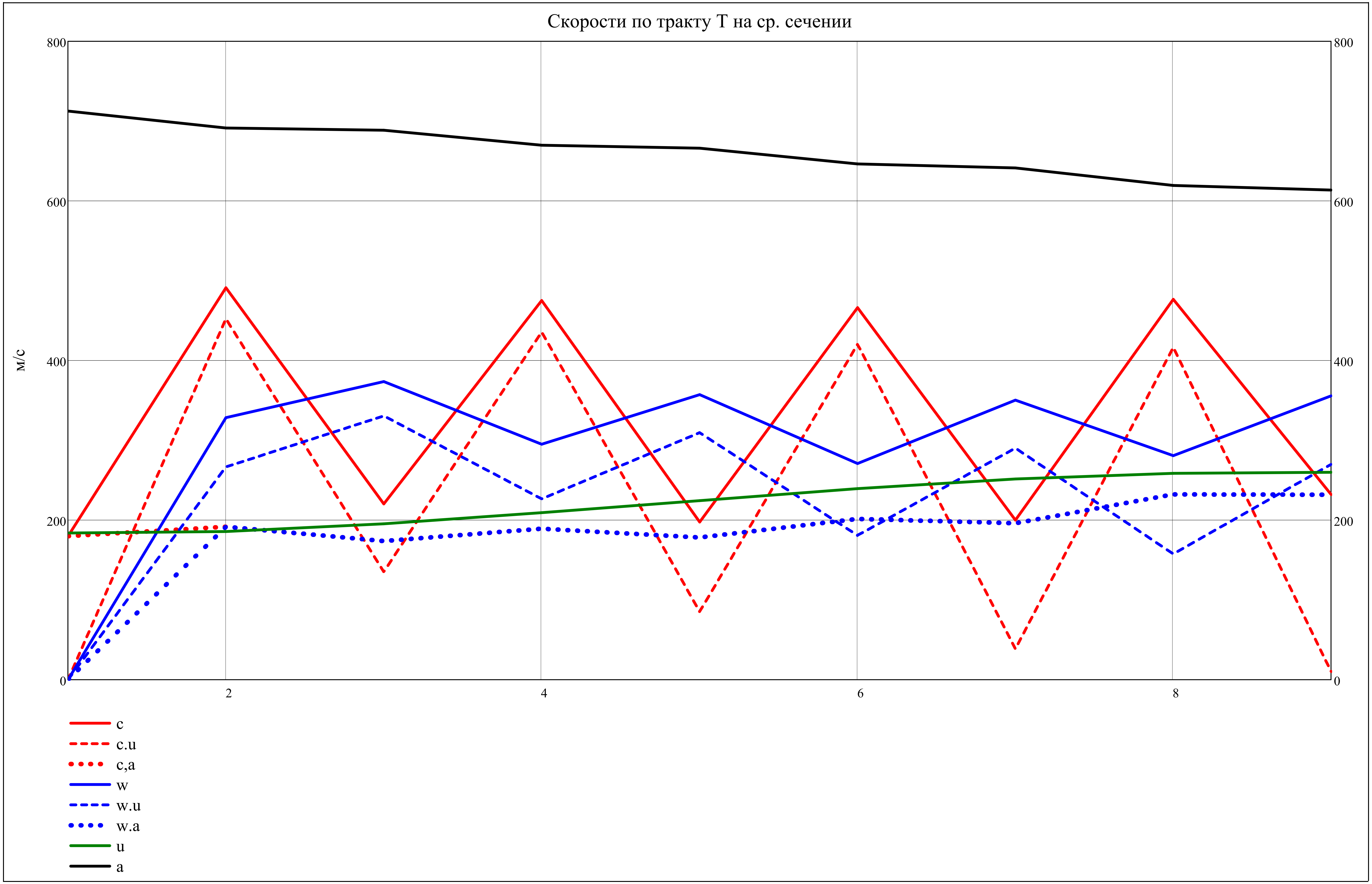
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	537.0	500.9	527.1	485.9	525.3	475.7	538.1	485.8

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	0.0	386.2	0.0	368.1	0.0	359.4	0.0	365.1

$u^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	172.2	172.2	180.7	193.8	208.2	222.8	234.2	240.3	240.3
2	183.8	185.7	195.4	209.3	224.4	239.4	251.6	258.7	260.0
3	195.3	199.1	210.0	224.7	240.5	256.1	268.9	277.0	279.7



Скорости по тракту T на ср. сечении

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.00	22.96	52.10	23.47	64.44	25.62	78.83	29.16	87.53

$\cdot°$

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.00	35.70	27.73	39.87	29.93	48.09	34.05	55.83	40.64			

$\cdot°$

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

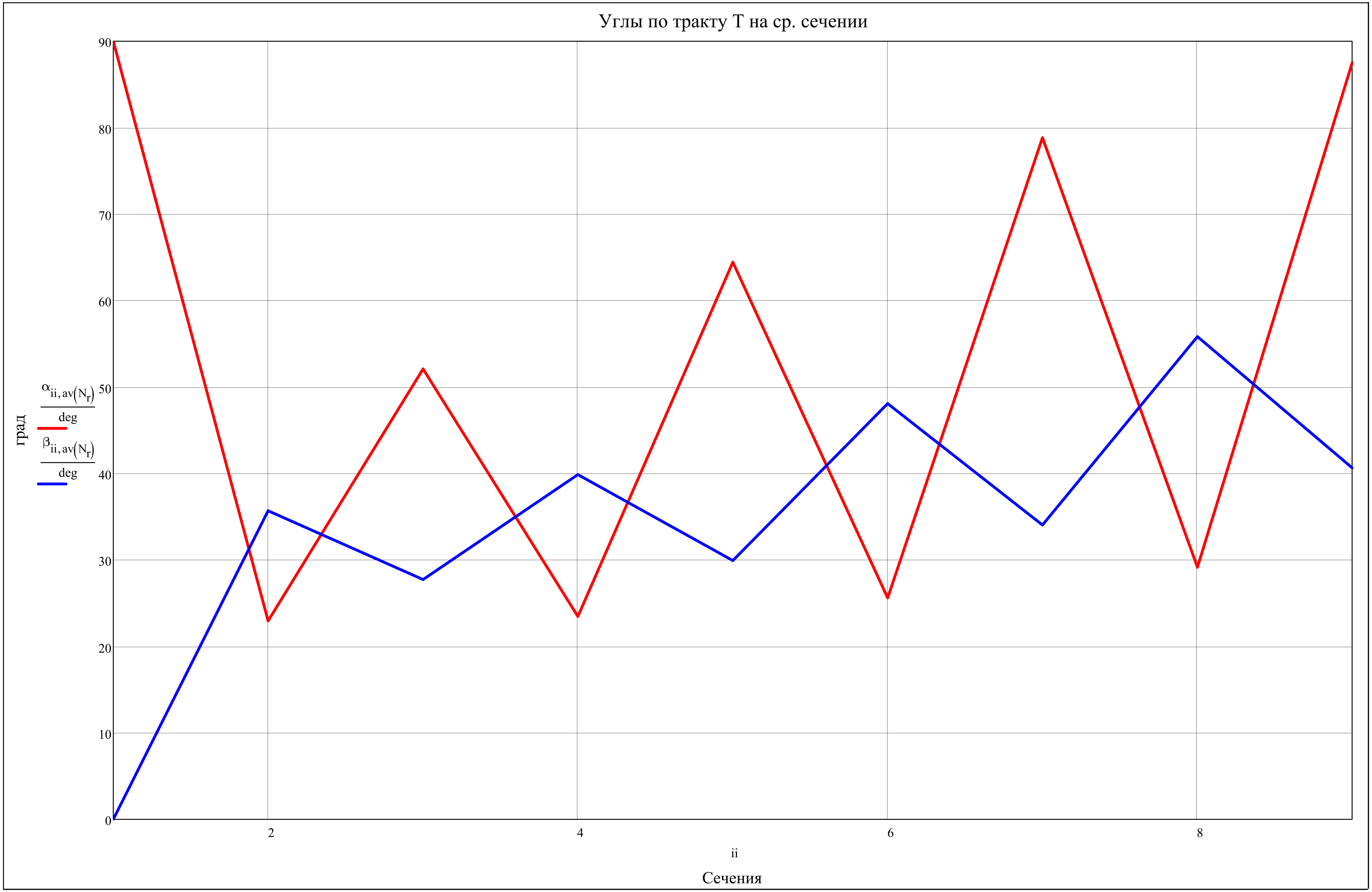
	1	2	3	4	5	6
1	-67.04	-28.63	-38.82	-49.68		

$\cdot°$

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

	1	2	3	4	5	6
1	-7.97	-9.94	-14.04	-15.19		

$\cdot°$


Углы по тракту Т на ср. сечении
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
2
4
6
8
ii
Сечения
град
$\frac{\alpha_{ii,av(N_r)}}{deg}$
$\frac{\beta_{ii,av(N_r)}}{deg}$

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.2695	0.7348	0.3407	0.7340	0.3165	0.7458	0.3328	...

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.5011	0.5697	0.4664	0.5638	0.4445	0.5742	...

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.2526	0.7105	0.3200	0.7093	0.2967	0.7213	0.3118	...

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.4749	0.5426	0.4407	0.5364	0.4191	0.5463	...

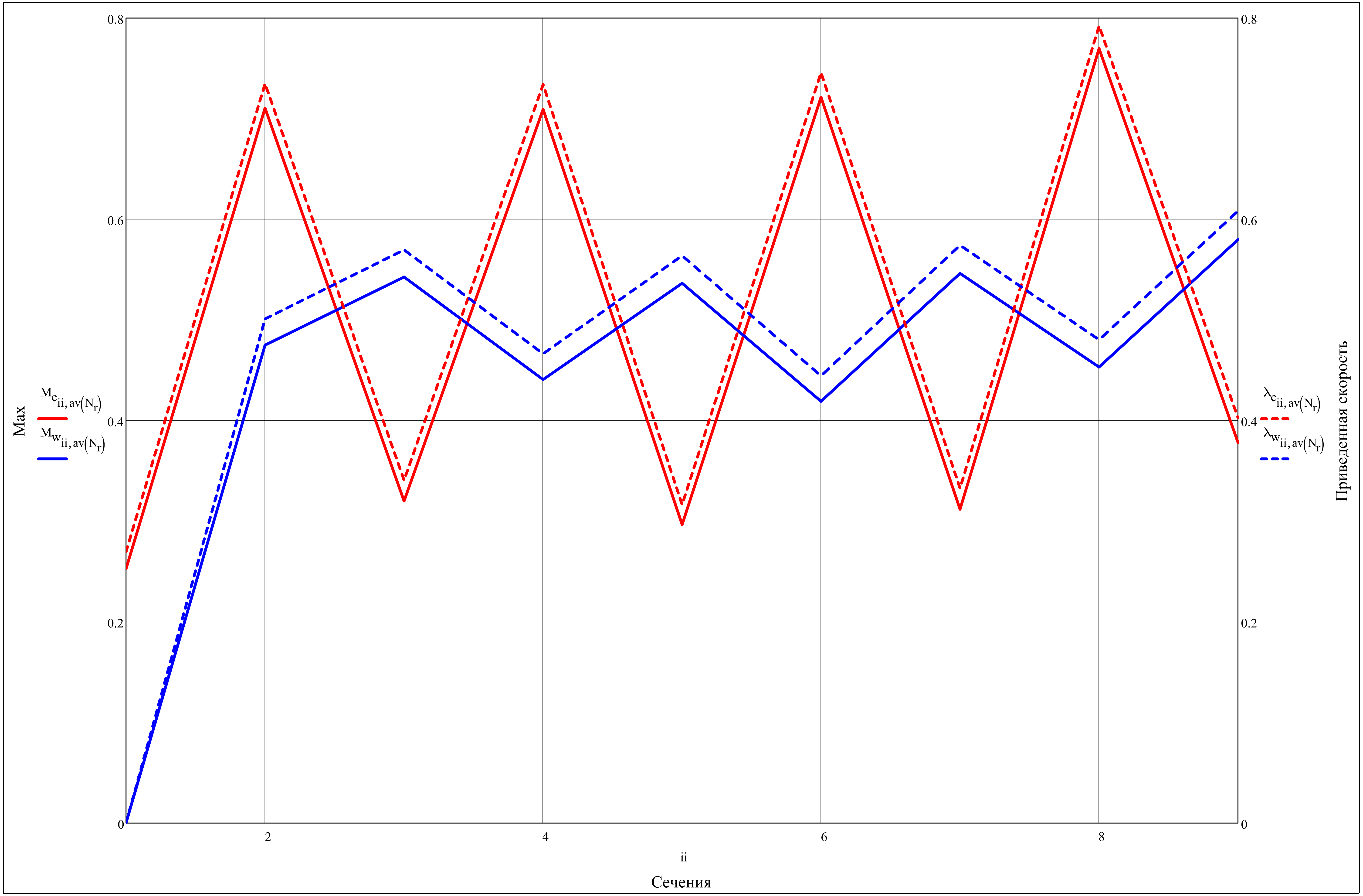
$\text{submatrix}\left(M_w,1,2Z+1,\text{av}\left(N_r\right),\text{av}\left(N_r\right)\right)^T \le 1 =$

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

$\text{stack}\left(\upsilon_{stator}{}^T,\upsilon_{rotor}{}^T\right) =$

	1	2	3	4
1	43.06	63.00	58.89	53.57
2	68.73	68.33	67.41	67.12

$\cdot°$


0.8
0.6
0.4
0.2
0
Max
$M_{c_{ii,av}(N_r)}$
$M_{w_{ii,av}(N_r)}$
2
4
6
8
ii
Сечения
0.8
0.6
0.4
0.2
0
$\lambda_{c_{ii,av}(N_r)}$
$\lambda_{w_{ii,av}(N_r)}$
Приведенная скорость

$t_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	40.6	27.9	35.9	43.3
2	43.6	30.1	38.6	46.6
3	46.5	32.4	41.3	49.8

$t_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	19.8	23.5	28.4	30.6
2	21.4	25.3	30.5	33.0
3	22.9	27.1	32.7	35.4

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	58.7	50.6	60.4	69.4

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	34.3	39.5	44.6	46.2

$\cdot 10^{-3}$

$\text{stack}\left(Z_{stator}^{T}, Z_{rotor}^{T}\right) =$

	1	2	3	4
1	48	76	68	62
2	101	97	91	89

$\text{stack}\left(\overline{t}_{оптCA}^{T}, \overline{t}_{оптPK}^{T}\right) =$

	1	2	3	4
1	0.762	0.603	0.645	0.686
2	0.643	0.661	0.695	0.722

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

0.743
0.595
0.639
0.671

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

1
0
0
0

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

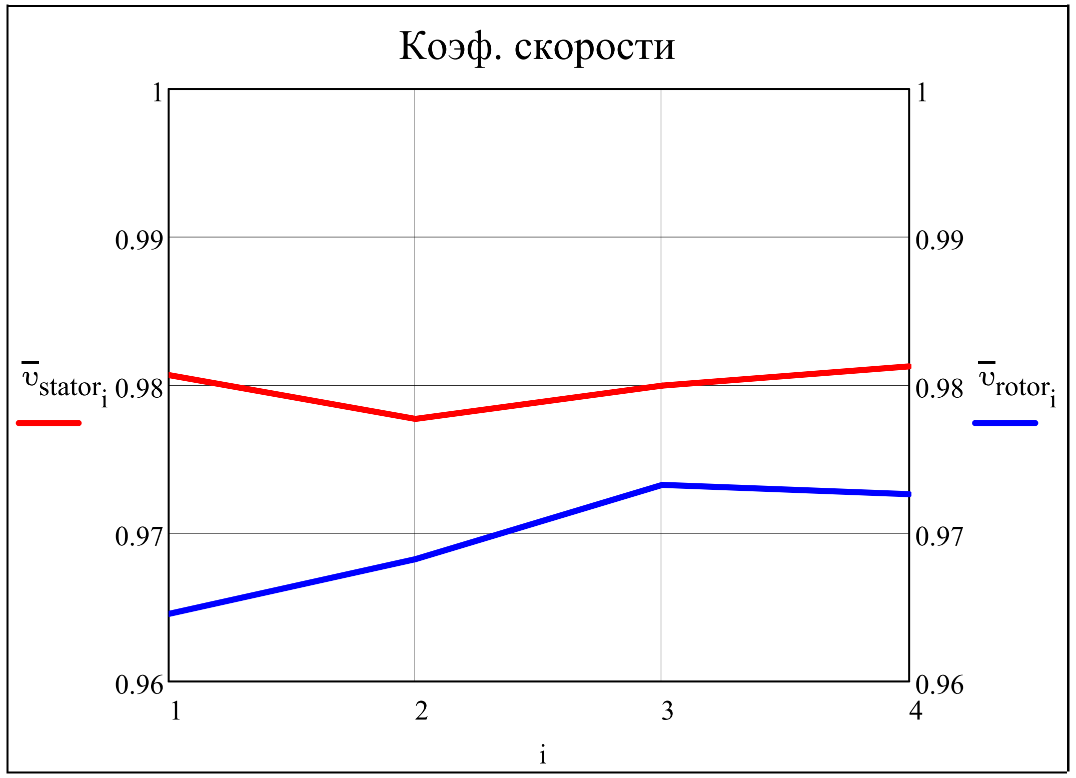
0.622
0.640
0.684
0.714

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

0
0
0
1

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

	1	2	3	4
1	0.9807	0.9777	0.9800	0.9813
2	0.9646	0.9683	0.9733	0.9727



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

	1	2	3	4
1	1.396	1.811	1.520	1.394
2	3.932	3.289	2.480	2.497

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	1.243	1.519	1.302	1.101
2	0.933	0.846	0.705	

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	2.842	3.626	3.119	2.754
2	5.483	4.819	3.917	3.881

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	-0.014	0.078	0.097	0.126
2	0.246	0.301	0.371	0.507

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	0.217	0.219	0.201	0.134
2	0.371	0.382	0.362	0.297

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	0.980	0.778	0.845	0.958
2	1.477	1.430	1.356	1.513

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	3.326	3.743	3.250	3.026
2	3.621	3.062	2.476	2.493

$\cdot\%$

$\xi_{\text{вых}}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	16.829	14.054	14.491	18.579

$\cdot\%$

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

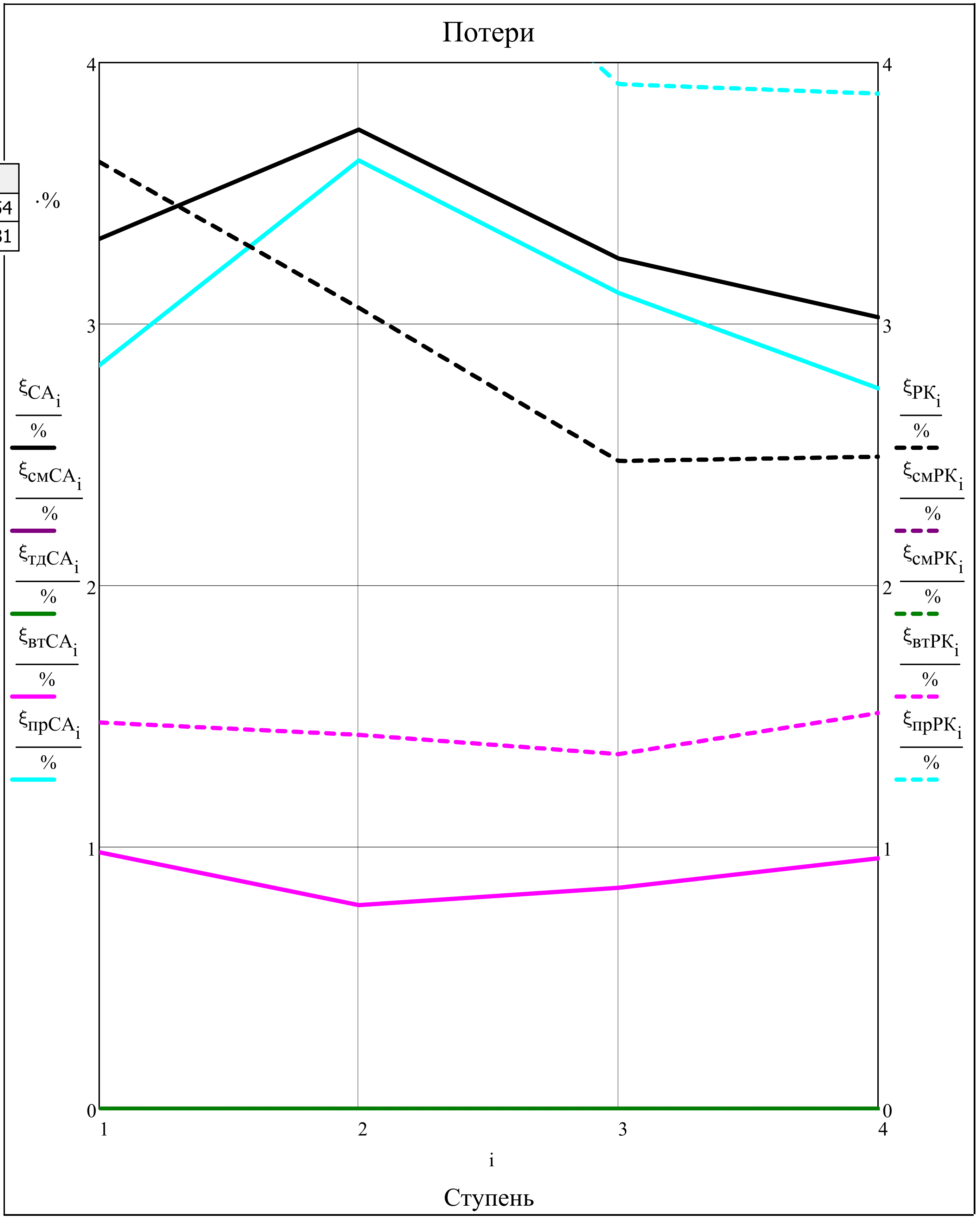
	1	2	3	4
1	1.813	1.786	1.826	1.662

$\cdot\%$

$\xi_{\text{тр.в}}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	0.138	0.222	0.300	0.245

$\cdot\%$



▲ Параметры турбины

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

Выбор закона профилирования Л по высоте

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

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

$m^T =$

	1	2	3	4	5	6
1	-0.5000	-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 $r \in 1..N_r$
      $A_{st(i,a)} \leftarrow \left(1 - R_{L_{i,av(N_r)}}\right)\cdot\omega\cdot\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{m_i+1}$
      $B_{st(i,a)} \leftarrow \dfrac{Lu_{ст_i}}{2\cdot\omega}$
      $c_{u_{st(i,a),r}} \leftarrow$
        if $m_i = \overline{\upsilon}_{stator_i}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^2$
          $c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot\left(\dfrac{R_{st(i,a),av(N_r)}}{R_{st(i,a),r}}\right)^{m_i}$  if $a = 2$
          $\dfrac{u_{st(i,a-1),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}} + u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}} - u_{st(i,a-1),r}\cdot c_{u_{st(i,a-1),r}}}{u_{st(i,a),r}}$  otherwise
        otherwise
          $\dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)}$  if $a = 2$
          $-\dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)}$  otherwise
      $c_{a_{st(i,a),r}} \leftarrow$
        $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] + 4\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}\cdot\begin{cases} -1 & \text{if } a = 2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$  if $m_i = -1$
        $\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right) - 2\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\left(\dfrac{1}{R_{st(i,a),r}} - \dfrac{1}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)}\cdot\begin{cases} -1 & \text{if } a = 2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$  if $m_i = 0$
```

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $i \in 1..Z$

for $r \in 1..N_r$

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

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

$$\varepsilon_{stator_{i,r}} = \begin{vmatrix} \alpha_{st(i,2),r} - \alpha_{st(i,1),r} & \text{if } \alpha_{st(i,2),r} \geq \frac{\pi}{2} \\ \alpha_{st(i,1),r} - \alpha_{st(i,2),r} & \text{otherwise} \end{vmatrix}$$

$$\varepsilon_{rotor_{i,r}} = \begin{vmatrix} \beta_{st(i,3),r} - \beta_{st(i,2),r} & \text{if } \beta_{st(i,3),r} \geq \frac{\pi}{2} \\ \beta_{st(i,2),r} - \beta_{st(i,3),r} & \text{otherwise} \end{vmatrix}$$

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

Расчет Л по высоте

▼ Результаты расчета Л по высоте

$P*^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	927.5	915.4	676.8	666.5	483.6	476.7	338.0	332.9	229.2
2	927.5	915.4	676.8	666.5	483.6	476.7	338.0	332.9	229.2
3	927.5	915.4	676.8	666.5	483.6	476.7	338.0	332.9	229.2

$\cdot 10^3$

$P^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	890.0	632.0	636.1	460.2	459.1	325.8	317.9	215.9	208.8
2	890.0	661.2	638.3	481.8	459.5	340.2	318.0	226.6	208.8
3	890.0	687.3	639.6	501.1	459.7	353.1	318.0	235.9	208.8

$\cdot 10^3$

$T*^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1368.9	1369.9	1281.1	1282.0	1192.3	1193.3	1102.4	1103.7	1011.4
2	1368.9	1369.9	1281.1	1282.0	1192.3	1193.3	1102.4	1103.7	1011.4
3	1368.9	1369.9	1281.1	1282.0	1192.3	1193.3	1102.4	1103.7	1011.4

$T^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1355.4	1252.9	1262.0	1171.6	1177.2	1086.7	1085.7	990.9	987.9
2	1355.4	1266.6	1263.0	1184.8	1177.5	1098.4	1085.7	1002.9	987.9
3	1355.4	1278.5	1263.6	1196.1	1177.6	1108.5	1085.8	1013.1	987.9

$T*_w{}^T =$

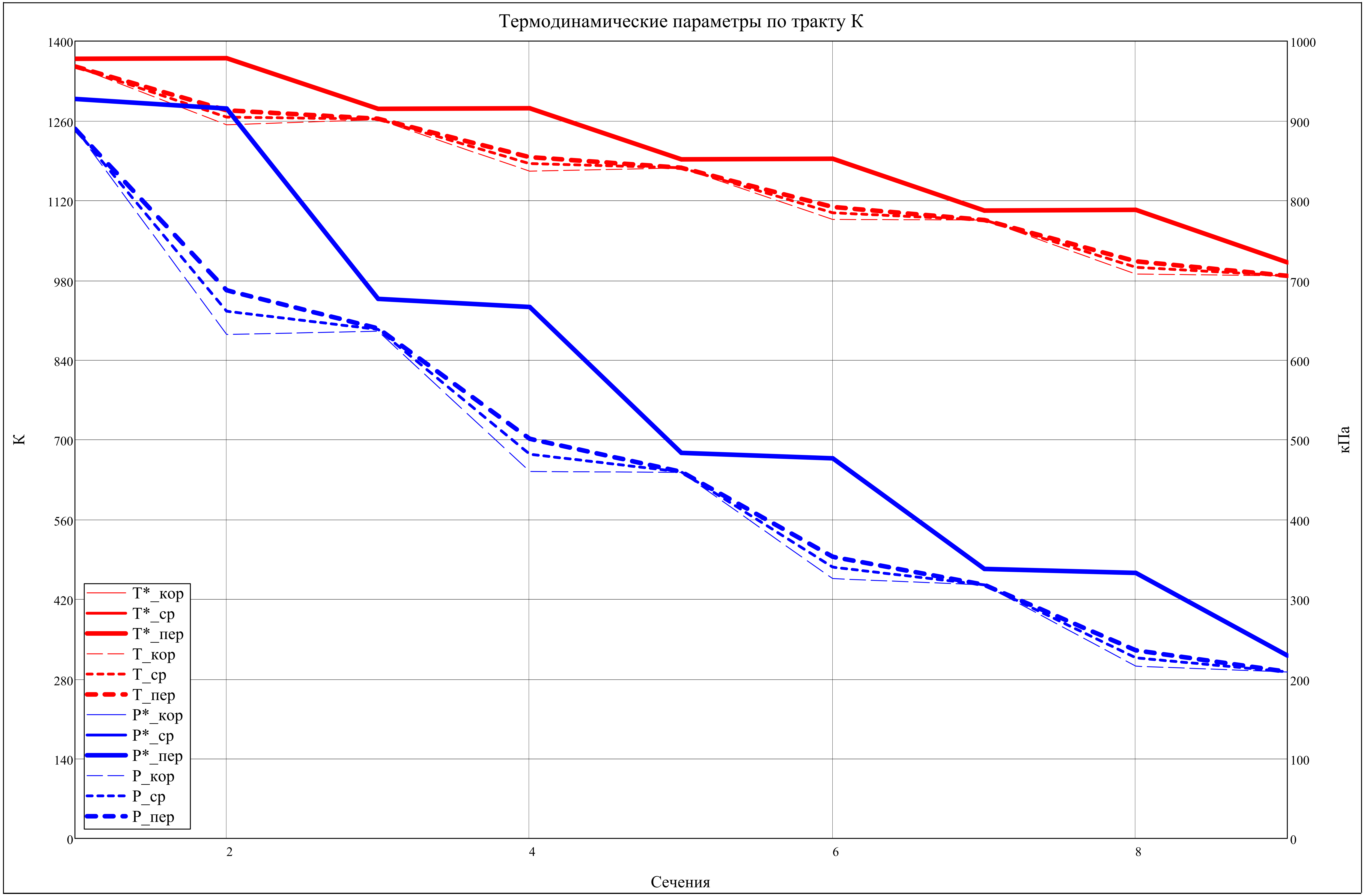
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1381.3	1313.8	1273.2	1222.8	1197.0	1130.2	1120.2	1036.5	1033.9
2	1383.0	1313.1	1278.7	1222.6	1203.2	1130.7	1126.9	1038.0	1041.0
3	1384.8	1312.5	1284.4	1222.5	1209.7	1131.4	1133.9	1039.7	1048.3

$\rho*^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.349	2.316	1.831	1.802	1.406	1.385	1.063	1.046	0.785
2	2.349	2.316	1.831	1.802	1.406	1.385	1.063	1.046	0.785
3	2.349	2.316	1.831	1.802	1.406	1.385	1.063	1.046	0.785

$\rho^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.276	1.749	1.747	1.362	1.352	1.039	1.015	0.755	0.733
2	2.276	1.810	1.752	1.410	1.353	1.074	1.015	0.783	0.733
3	2.276	1.864	1.755	1.452	1.353	1.104	1.015	0.807	0.733

Термодинамические параметры по тракту К
1400
1260
1120
980
840
700
560
420
280
140
0
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
К
кПа
2
4
6
8
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

$k^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.317	1.317	1.321	1.321	1.326	1.326	1.331	1.331	1.338
2	1.317	1.317	1.321	1.321	1.326	1.326	1.331	1.331	1.338
3	1.317	1.317	1.321	1.321	1.326	1.326	1.331	1.331	1.338

${R_L}^T =$

	1	2	3	4
1	0.0536	0.0511	0.0925	0.1037
2	0.0913	0.1091	0.1574	0.1829
3	0.1251	0.1592	0.2136	0.2505

${R_L}^T \geq 0.05 =$

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	670.1	670.3	648.6	648.9	626.2	626.5	602.7	603.0	577.9
2	670.1	670.3	648.6	648.9	626.2	626.5	602.7	603.0	577.9
3	670.1	670.3	648.6	648.9	626.2	626.5	602.7	603.0	577.9

$u^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	172.2	172.2	180.7	193.8	208.2	222.8	234.2	240.3	240.3
2	183.8	185.7	195.4	209.3	224.4	239.4	251.6	258.7	260.0
3	195.3	199.1	210.0	224.7	240.5	256.1	268.9	277.0	279.7

$c^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	529.2	213.2	511.7	188.4	500.2	196.8	511.3	231.7
2	180.0	497.3	207.1	480.3	186.6	472.1	196.6	483.5	231.7
3	180.0	467.8	203.6	451.4	185.8	446.3	196.6	458.4	231.7

$c_u{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	476.1	142.1	459.2	77.7	444.1	29.4	444.2	13.3
2	0.0	458.9	112.6	441.5	55.1	426.9	13.1	424.0	0.2
3	0.0	444.6	86.6	426.5	35.3	411.8	-1.0	406.3	-10.9

$c_a{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	231.1	158.9	225.9	171.6	230.1	194.6	253.2	231.4
2	180.0	191.6	173.8	189.2	178.3	201.6	196.2	232.3	231.7
3	180.0	145.5	184.3	148.0	182.4	171.9	196.6	212.2	231.5

$\Delta c_a{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	51.1	-72.2	67.0	-54.4	58.6	-35.6	58.7	-21.9
2	11.6	-17.8	15.4	-11.0	23.3	-5.4	36.1	-0.5
3	-34.5	38.8	-36.3	34.5	-10.5	24.7	15.6	19.2

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	673.1	656.4	646.6	633.7	627.5	609.7	607.5	584.4	584.3
2	673.5	656.3	648.0	633.6	629.1	609.8	609.3	584.8	586.2
3	674.0	656.1	649.5	633.6	630.8	610.0	611.2	585.3	588.3

$a_{зв}{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	717.7	690.0	693.6	668.3	671.0	644.7	645.8	616.9	617.5
2	717.7	693.8	693.9	672.0	671.1	648.2	645.8	620.6	617.5
3	717.7	697.0	694.0	675.2	671.2	651.1	645.8	623.8	617.5

$w^T =$

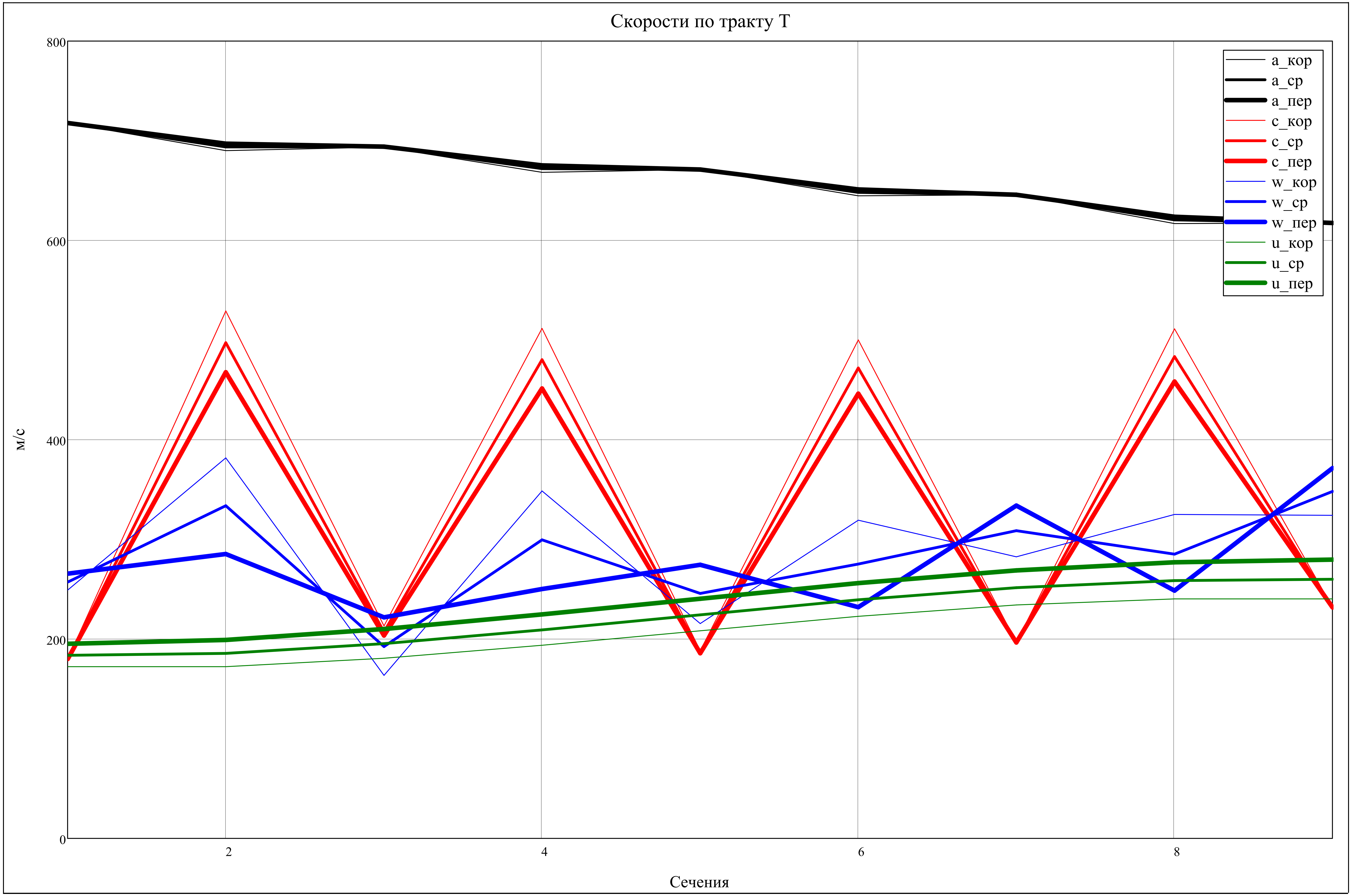
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	249.1	381.8	163.5	348.6	215.6	319.3	282.5	325.1	324.1
2	257.2	333.7	192.5	299.5	245.8	275.2	308.8	285.1	348.1
3	265.6	285.4	221.8	250.2	274.5	232.0	334.0	248.5	371.5

$w_u{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	172.2	-303.9	38.6	-265.4	130.5	-221.3	204.8	-203.8
2	183.8	-273.2	82.7	-232.2	169.2	-187.4	238.4	-165.3
3	195.3	-245.5	123.4	-201.7	205.2	-155.7	269.9	...

$w_a{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	231.1	158.9	225.9	171.6	230.1	194.6	253.2	231.4
2	180.0	191.6	173.8	189.2	178.3	201.6	196.2	232.3	231.7
3	180.0	145.5	184.3	148.0	182.4	171.9	196.6	212.2	231.5


Скорости по тракту Т
800
600
400
200
0
м/с
2
4
6
8
Сечения
a_кор
a_ср
a_пер
c_кор
c_ср
c_пер
w_кор
w_ср
w_пер
u_кор
u_ср
u_пер

$\alpha^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.00	25.89	48.19	26.20	65.64	27.39	81.41	29.69	86.70
2	90.00	22.66	57.06	23.20	72.81	25.28	86.17	28.72	89.95
3	90.00	18.12	64.82	19.13	79.04	22.65	90.30	27.58	92.70

$\cdot°$

$\beta^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	46.26	142.75	76.35	139.59	52.74	133.88	43.53	128.83
2	44.41	144.96	64.55	140.83	46.49	132.92	39.45	125.44
3	42.67	149.35	56.19	143.74	41.64	132.18	36.07	...

$\cdot°$

$80 \cdot ° \le \alpha^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
2	1	0	0	0	0	0	1	0	1
3	1	0	0	0	0	0	1	0	1

[1, c.78]

Угол поворота потока:

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

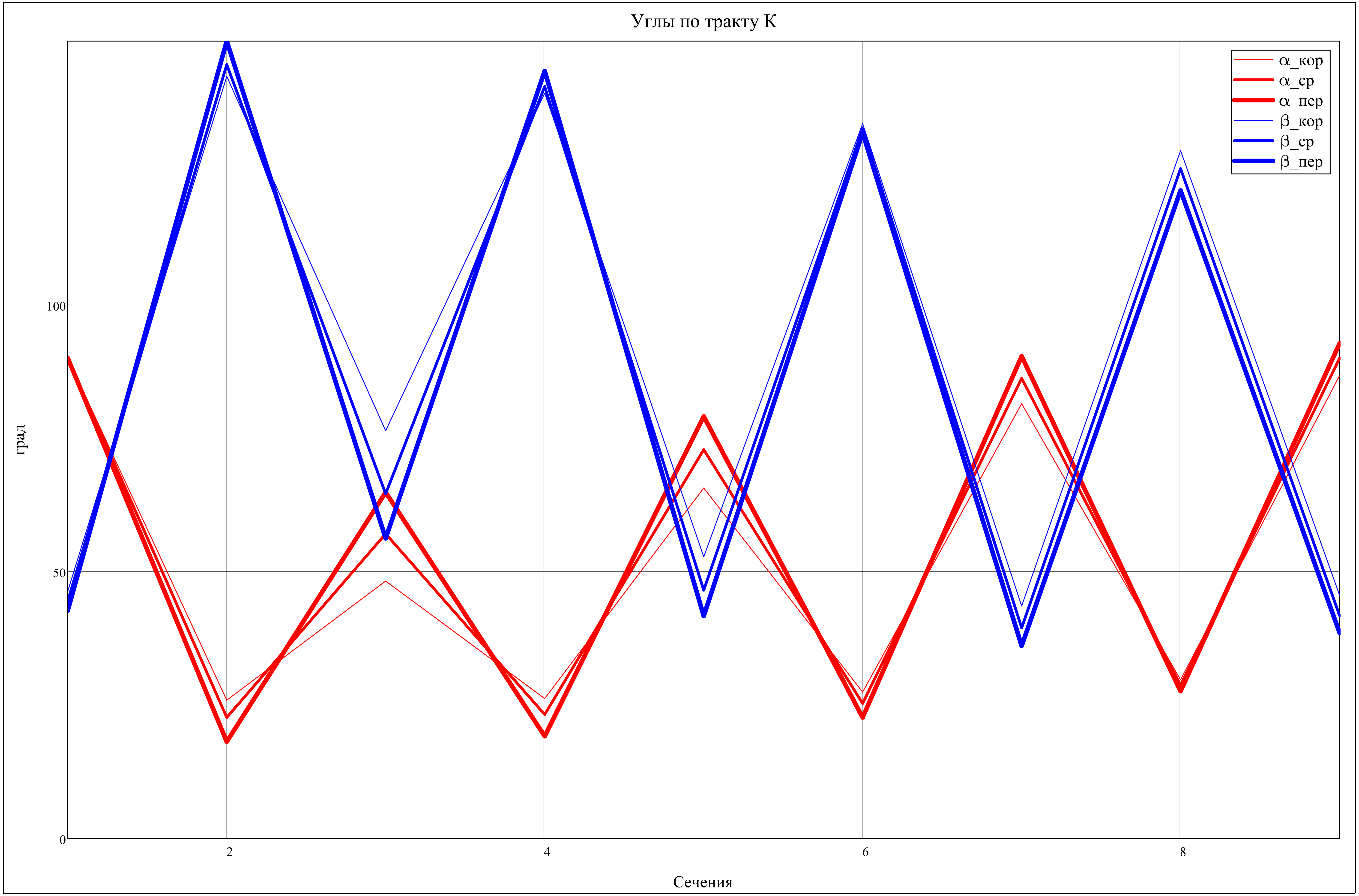
	1	2	3	4
1	64.11	21.99	38.24	51.72
2	67.34	33.86	47.53	57.46
3	71.88	45.69	56.39	62.72

$\cdot°$

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

	1	2	3	4
1	66.40	86.85	90.35	83.28
2	80.41	94.34	93.47	83.71
3	93.16	102.10	96.11	82.82

$\cdot°$


Углы по тракту К
град
Сечения
0
50
100
2
4
6
8
α_кор
α_ср
α_пер
β_кор
β_ср
β_пер

$\lambda_c^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.269	0.790	0.329	0.789	0.301	0.798	0.327	0.848	0.401
2	0.269	0.742	0.319	0.740	0.298	0.753	0.326	0.802	0.401
3	0.269	0.698	0.314	0.696	0.297	0.712	0.326	0.760	0.401

$M_c^T =$

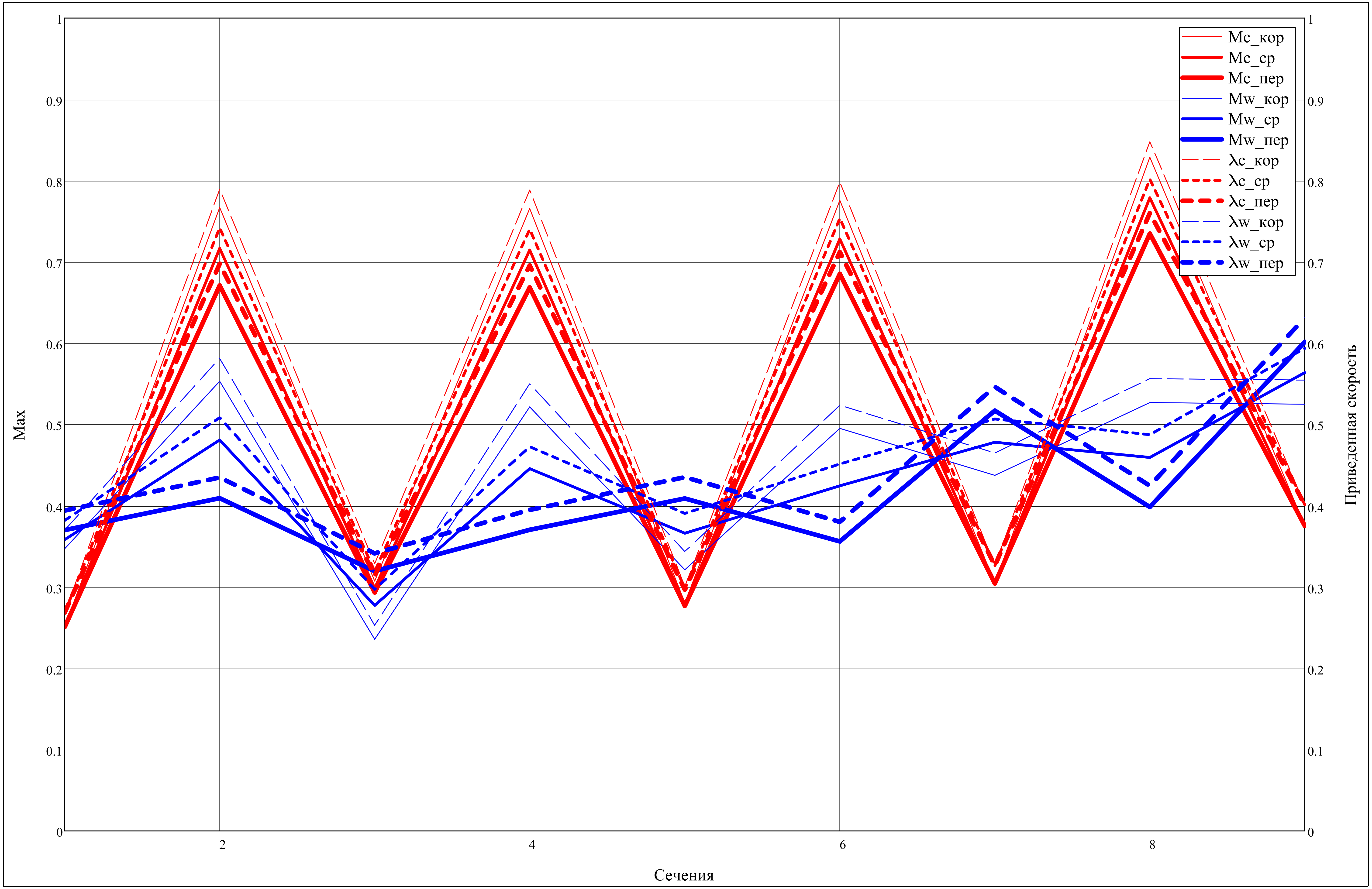
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.251	0.767	0.307	0.766	0.281	0.776	0.305	0.829	0.375
2	0.251	0.717	0.299	0.715	0.278	0.728	0.304	0.779	0.375
3	0.251	0.671	0.293	0.669	0.277	0.685	0.304	0.735	0.375

$\lambda_W^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.370	0.582	0.253	0.550	0.344	0.524	0.465	0.556	0.555
2	0.382	0.509	0.297	0.473	0.391	0.451	0.507	0.488	0.594
3	0.394	0.435	0.341	0.395	0.435	0.380	0.546	0.425	0.631

$M_W^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.347	0.553	0.236	0.522	0.321	0.495	0.437	0.527	0.525
2	0.358	0.481	0.277	0.446	0.366	0.425	0.478	0.459	0.564
3	0.370	0.409	0.320	0.371	0.409	0.356	0.517	0.398	0.602


Max
Приведенная скорость
Сечения
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
2
4
6
8
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: $j = \left|\begin{array}{l} j = Z \\ j = \left|\begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array}\right. \end{array}\right. = 4$

Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

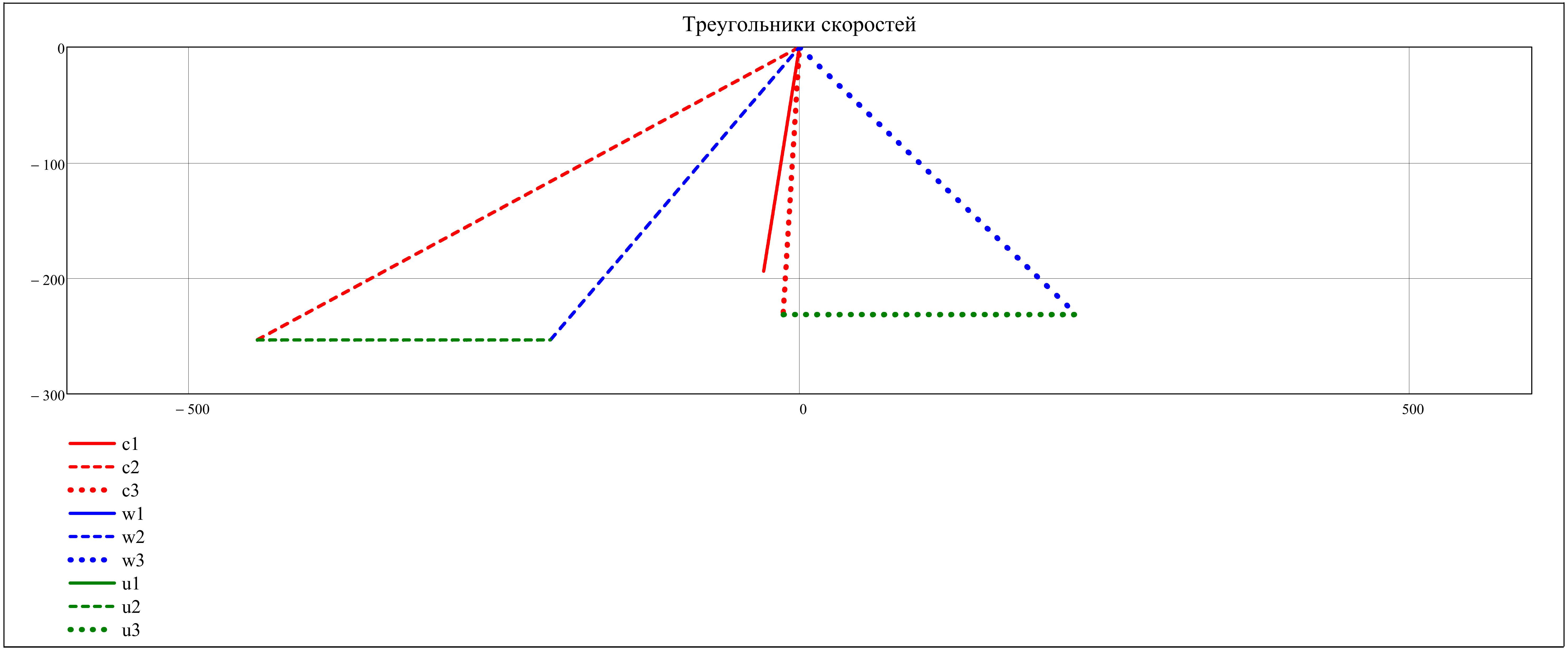
$$\Delta_w(v,i,j,r) = \left|\begin{array}{l} -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \quad \text{if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) \geq 0\right) \wedge \left(-\left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right| \leq v \leq 0\right) \wedge (j \neq 1) \\ -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot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

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

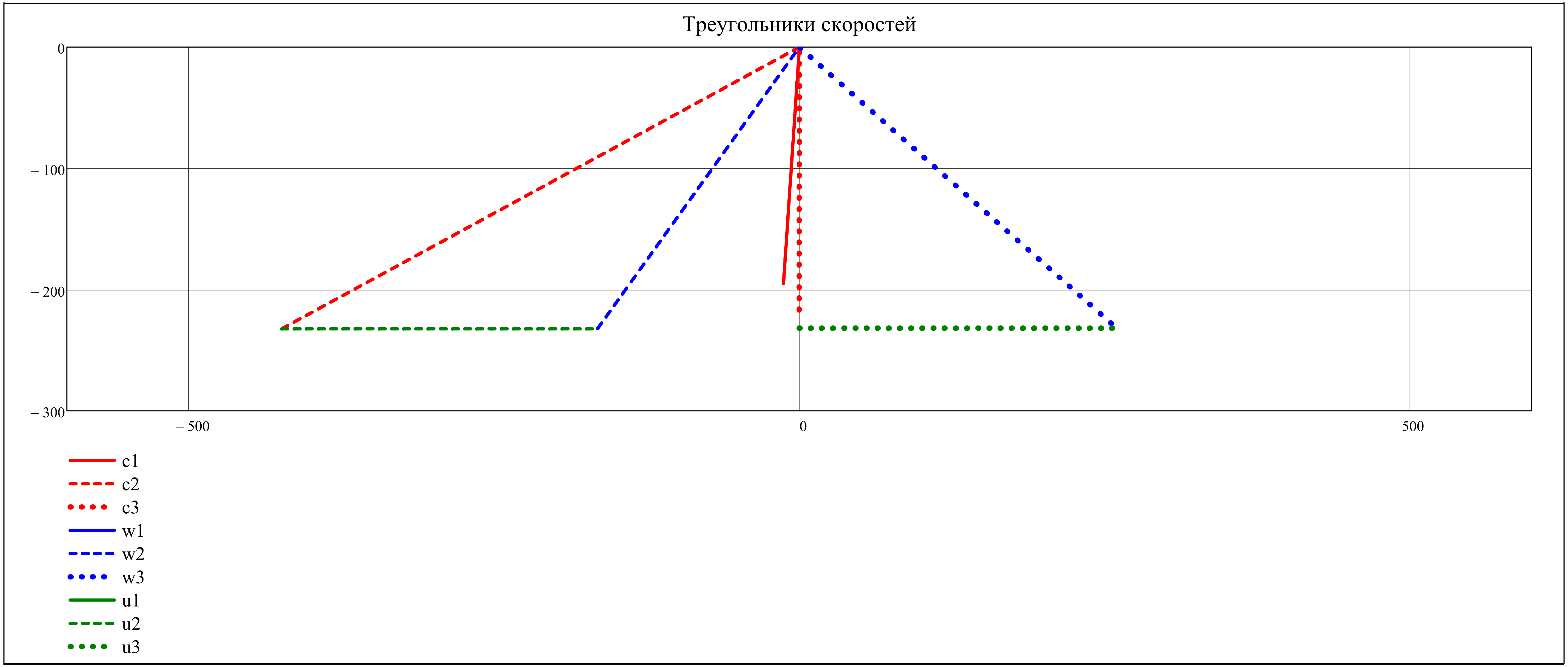
$$v_{lim} = \text{ceil}\left(\frac{\max(c,w,u)}{10^2}\right)\cdot 10^2 = 600.0$$

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

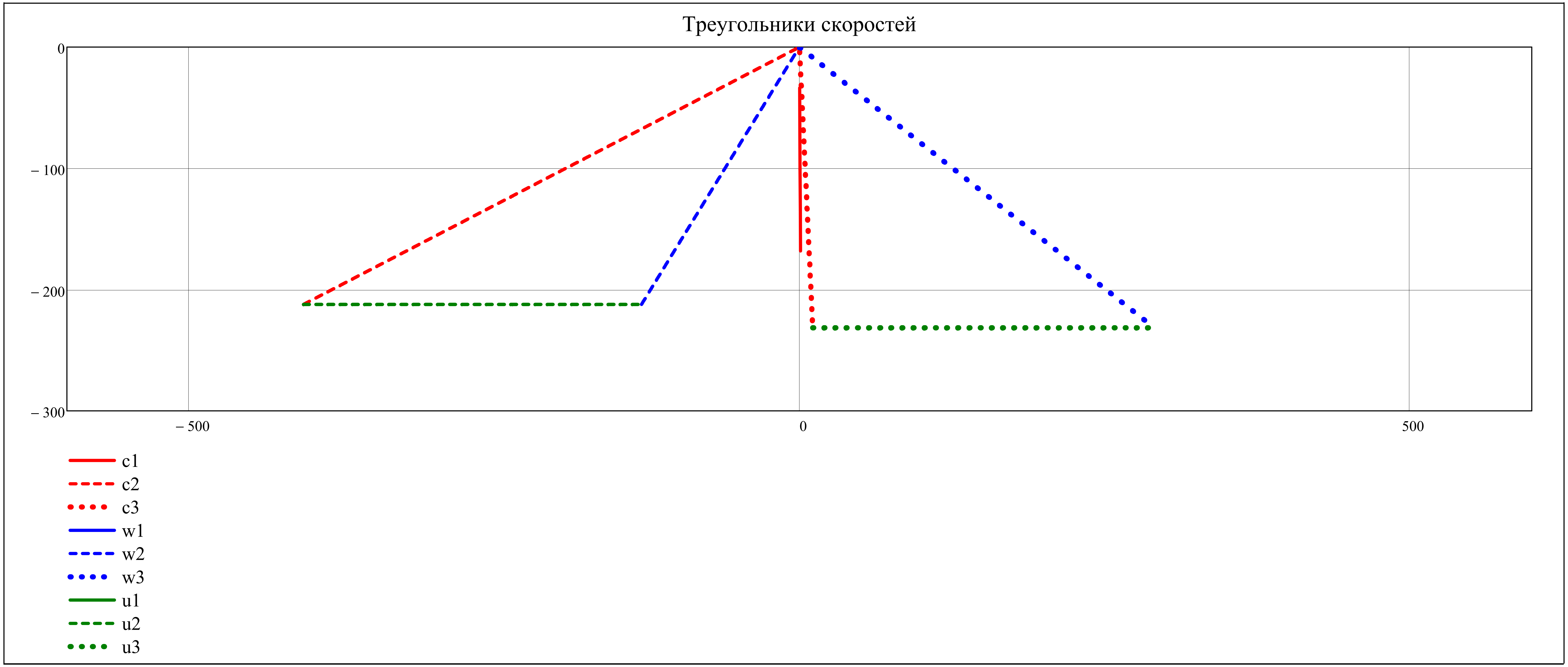
r = 1


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

$r = av(N_r)$


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

$r = N_r$



▲ Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

Расчет хорд Л по парусности

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

Длины хорд РК и СА (м):

$chord_{stator}^{T} =$ $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	58.7	50.6	60.4	69.4
2	58.7	50.6	60.4	69.4
3	58.7	50.6	60.4	69.4

$chord_{rotor}^{T} =$ $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	35.4	39.8	45.8	50.0
2	32.3	36.4	42.0	45.9
3	27.6	30.5	36.0	41.7

Расчет хорд Л по парусности

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

$\overline{x}_f = 0.45$

Расчет параметров решетки

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

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

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

Расчет параметров решетки

Результаты расчета параметров решеток

Относительные радиусы профилей ():

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

	1	2	3	4
1	2.800	2.800	2.800	2.800
2	3.600	3.600	3.600	3.600
3	4.400	4.400	4.400	4.400

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	4.900	4.900	4.900	4.900
2	3.150	3.150	3.150	3.150
3	2.450	2.450	2.450	2.450

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	1.400	1.400	1.400	1.400
2	1.800	1.800	1.800	1.800
3	2.200	2.200	2.200	2.200

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	2.100	2.100	2.100	2.100
2	1.350	1.350	1.350	1.350
3	1.050	1.050	1.050	1.050

$\cdot\%$

Относительная толщина профиля ():

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

	1	2	3	4
1	7.00	7.00	7.00	7.00
2	9.00	9.00	9.00	9.00
3	11.00	11.00	11.00	11.00

$\cdot\%$

$\overline{c}_{rotor}^{\,T} =$

	1	2	3	4
1	14.00	14.00	14.00	14.00
2	9.00	9.00	9.00	9.00
3	7.00	7.00	7.00	7.00

$\cdot\%$

Относительный шаг решетки ():

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

	1	2	3	4
1	0.6923	0.5507	0.5942	0.6244
2	0.7425	0.5950	0.6394	0.6714
3	0.7927	0.6394	0.6846	0.7183

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

	1	2	3	4
1	0.5592	0.5901	0.6211	0.6117
2	0.6605	0.6948	0.7272	0.7179
3	0.8317	0.8911	0.9077	0.8495

Относительная густота решетки ():

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

	1	2	3	4
1	1.444	1.816	1.683	1.602
2	1.347	1.681	1.564	1.490
3	1.262	1.564	1.461	1.392

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

	1	2	3	4
1	1.788	1.695	1.610	1.635
2	1.514	1.439	1.375	1.393
3	1.202	1.122	1.102	1.177

Длина хорды профиля [м]:

$$\mathrm{chord}_{stator}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 58.7 & 50.6 & 60.4 & 69.4 \\ \hline 2 & 58.7 & 50.6 & 60.4 & 69.4 \\ \hline 3 & 58.7 & 50.6 & 60.4 & 69.4 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{chord}_{rotor}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 35.4 & 39.8 & 45.8 & 50.0 \\ \hline 2 & 32.3 & 36.4 & 42.0 & 45.9 \\ \hline 3 & 27.6 & 30.5 & 36.0 & 41.7 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Радиусы профилей:

$$\mathrm{r\_inlet}_{stator}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 1.64 & 1.42 & 1.69 & 1.94 \\ \hline 2 & 2.11 & 1.82 & 2.17 & 2.50 \\ \hline 3 & 2.58 & 2.23 & 2.66 & 3.05 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{r\_inlet}_{rotor}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 1.73 & 1.95 & 2.24 & 2.45 \\ \hline 2 & 1.02 & 1.15 & 1.32 & 1.45 \\ \hline 3 & 0.68 & 0.75 & 0.88 & 1.02 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{r\_outlet}_{stator}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0.82 & 0.71 & 0.85 & 0.97 \\ \hline 2 & 1.06 & 0.91 & 1.09 & 1.25 \\ \hline 3 & 1.29 & 1.11 & 1.33 & 1.53 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\mathrm{r\_outlet}_{rotor}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0.74 & 0.83 & 0.96 & 1.05 \\ \hline 2 & 0.44 & 0.49 & 0.57 & 0.62 \\ \hline 3 & 0.29 & 0.32 & 0.38 & 0.44 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Толщина профиля [м]:

$$c_{stator}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 4.11 & 3.55 & 4.23 & 4.86 \\ \hline 2 & 5.28 & 4.56 & 5.43 & 6.24 \\ \hline 3 & 6.45 & 5.57 & 6.64 & 7.63 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$c_{rotor}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 4.95 & 5.57 & 6.41 & 7.00 \\ \hline 2 & 2.91 & 3.28 & 3.78 & 4.14 \\ \hline 3 & 1.93 & 2.13 & 2.52 & 2.92 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Шаг решетки [м]:

$$t_{stator}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 40.6 & 27.9 & 35.9 & 43.3 \\ \hline 2 & 43.6 & 30.1 & 38.6 & 46.6 \\ \hline 3 & 46.5 & 32.4 & 41.3 & 49.8 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$t_{rotor}^{\;T} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 19.8 & 23.5 & 28.4 & 30.6 \\ \hline 2 & 21.4 & 25.3 & 30.5 & 33.0 \\ \hline 3 & 22.9 & 27.1 & 32.7 & 35.4 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Угол поворота потока: $\varepsilon_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	64.11	21.99	38.24	51.72
2	67.34	33.86	47.53	57.46
3	71.88	45.69	56.39	62.72

$\cdot{}^{\circ}$

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

	1	2	3	4
1	66.40	86.85	90.35	83.28
2	80.41	94.34	93.47	83.71
3	93.16	102.10	96.11	82.82

$\cdot{}^{\circ}$

Угол установки профиля: $\upsilon_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	134.1	124.4	130.0	136.4
2	129.9	123.9	129.5	136.6
3	123.2	120.8	127.7	136.2

$\cdot{}^{\circ}$

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

	1	2	3	4
1	142.1	135.9	134.8	138.2
2	136.4	132.6	133.0	137.5
3	130.3	128.8	131.3	137.0

$\cdot{}^{\circ}$

Угол изгиба профиля: $\pi - \varepsilon_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	115.9	158.0	141.8	128.3
2	112.7	146.1	132.5	122.5
3	108.1	134.3	123.6	117.3

$\cdot{}^{\circ}$

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

	1	2	3	4
1	113.6	93.1	89.7	96.7
2	99.6	85.7	86.5	96.3
3	86.8	77.9	83.9	97.2

$\cdot{}^{\circ}$

▲ Результаты расчета параметров решеток

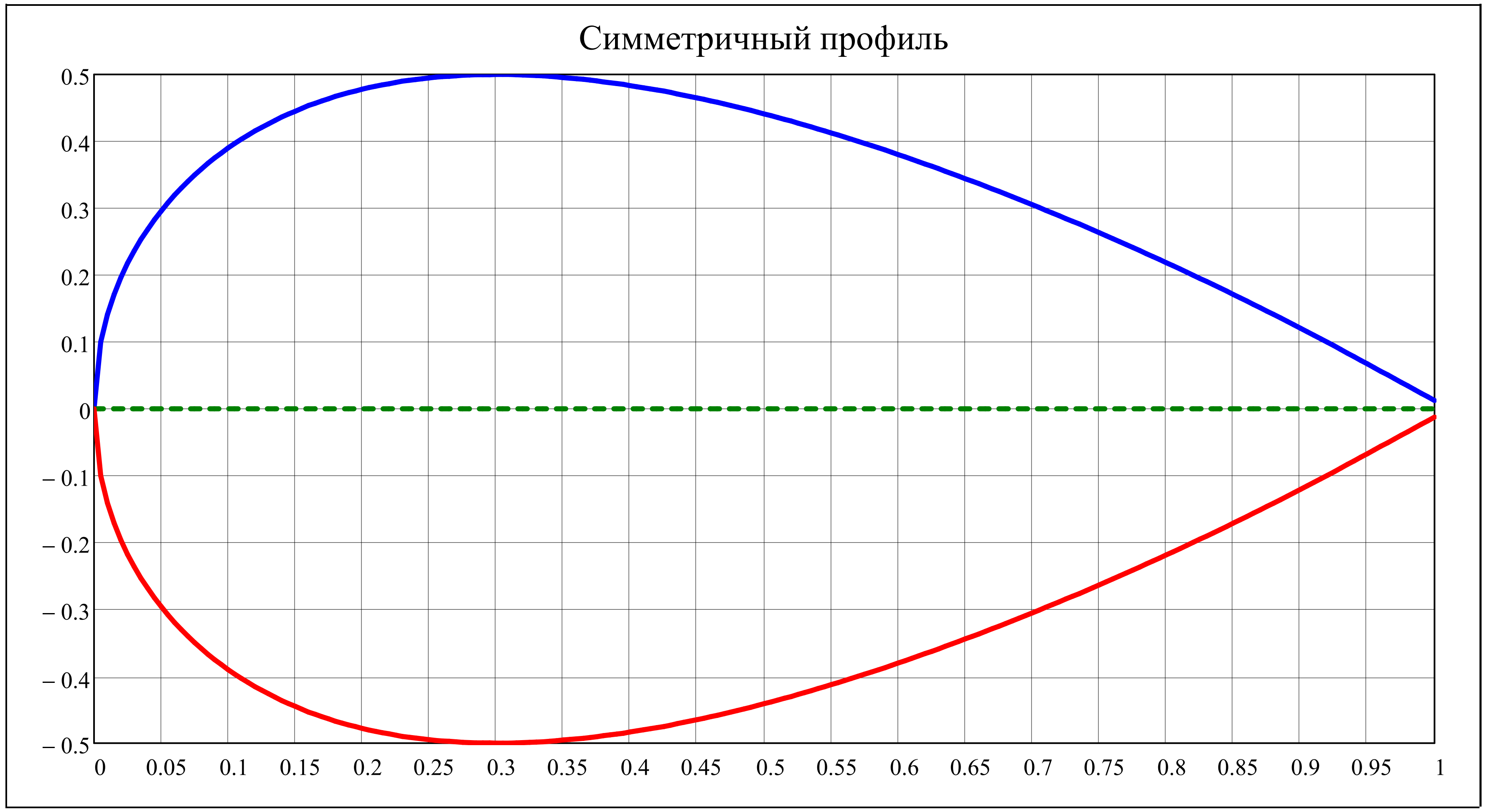
Подключение симметричного профиля

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

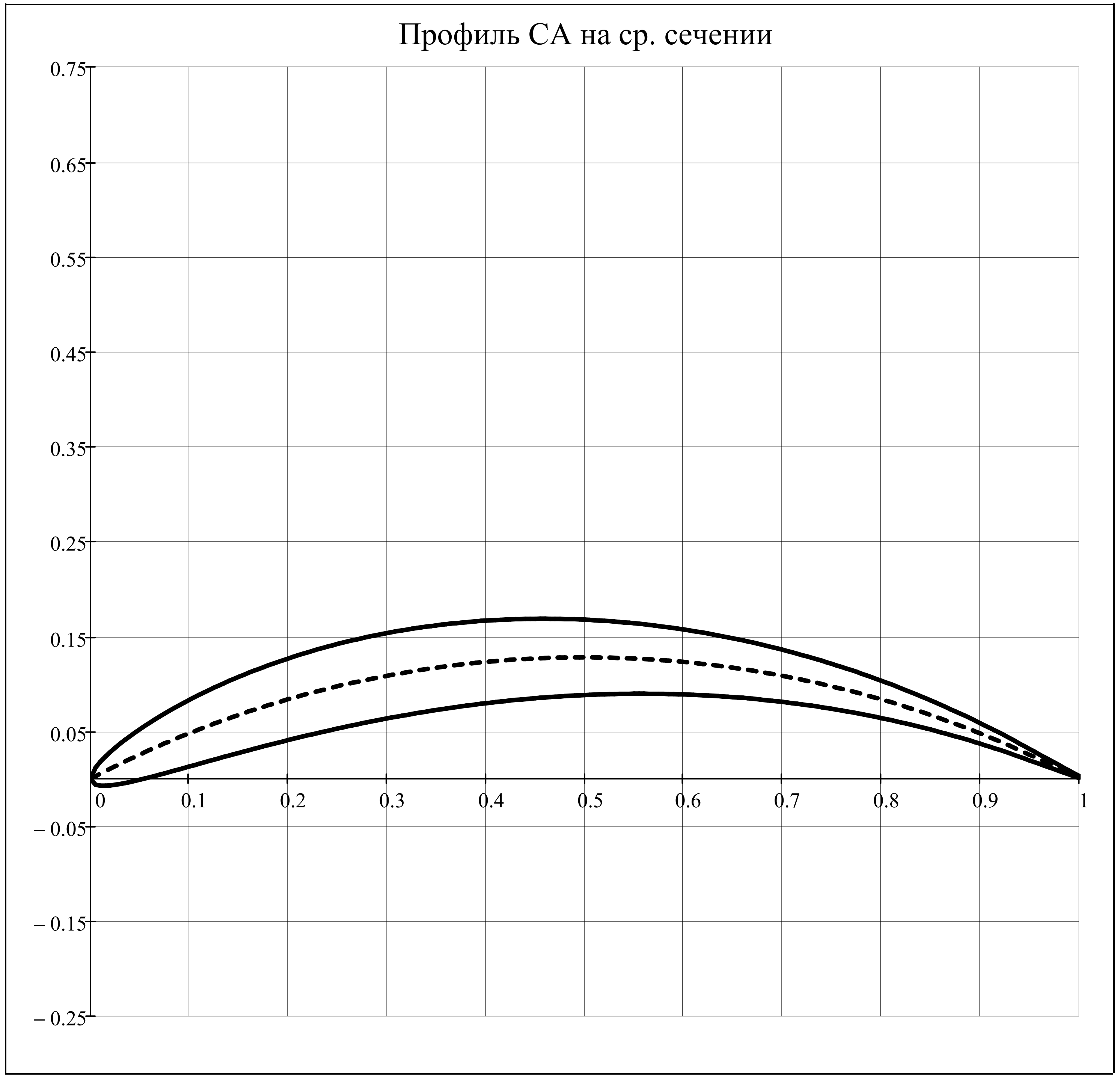
Относ. координаты профиля РК и СА:

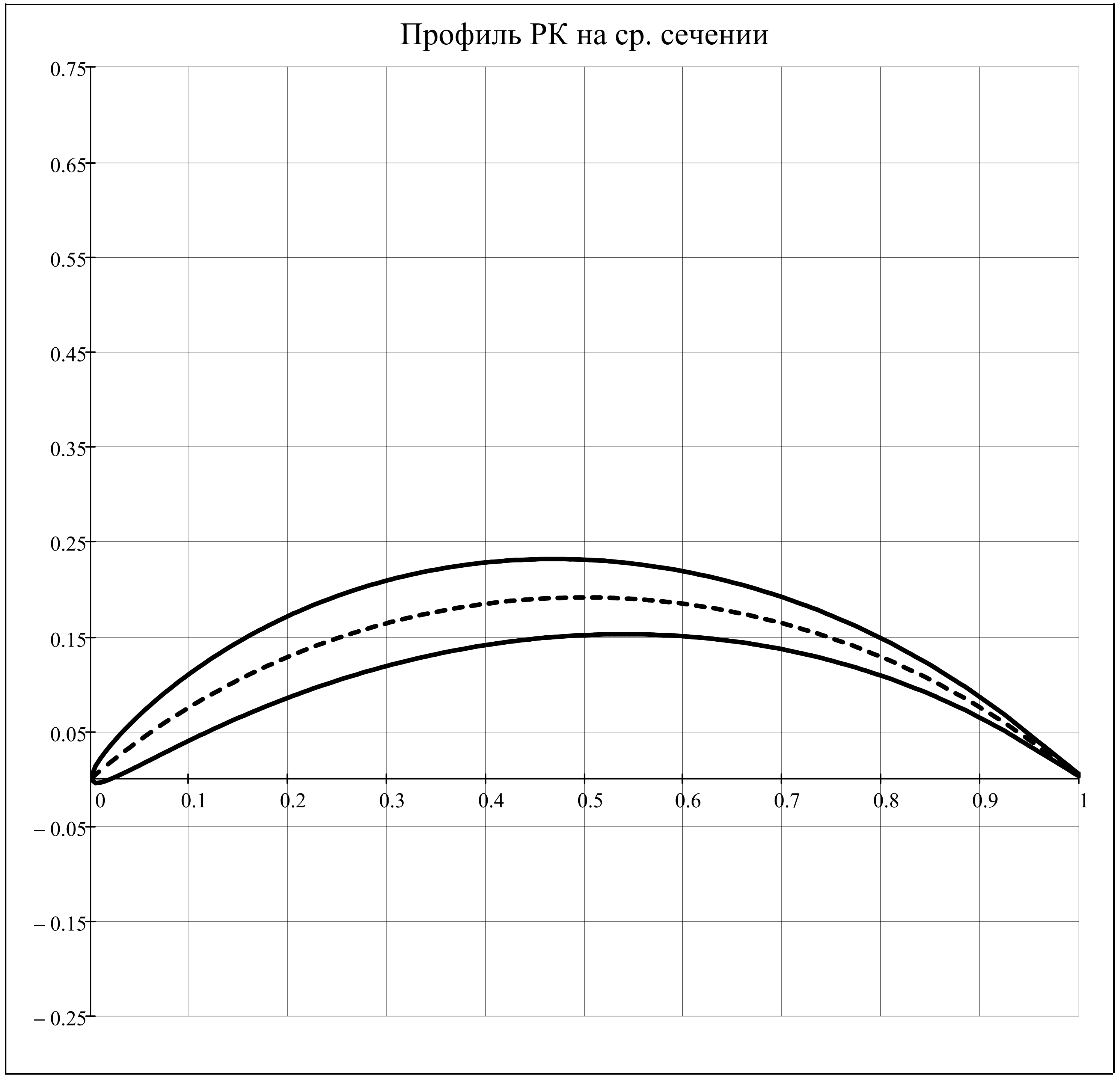
$$\mathrm{AIRFOIL}_0\left(x, line, \overline{f}, \overline{x}_f, \overline{c}\right) = \begin{cases} \begin{cases} \mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) & \text{if } line = \text{"+"} \\ \dfrac{\mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) + \mathrm{linterp}\left(X_L, Y_L, x\right)}{2} & \text{if } line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

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



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


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

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

	1	2	3	4
1	63.47	51.71	62.74	73.48
2	64.41	52.70	64.03	74.79
3	65.61	53.99	65.52	76.17

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	60.67	50.86	60.98	70.78
2	60.72	51.07	61.31	71.03
3	60.91	51.38	61.69	71.35

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	164.78	122.77	174.49	230.41
2	211.86	157.85	224.34	296.25
3	258.93	192.93	274.19	362.08

$\cdot 10^{-6}$

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

	1	2	3	4
1	1061.6	226.1	672.4	1396.3
2	1439.6	450.4	1082.8	2006.5
3	1890.1	749.6	1584.1	2693.9

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	4071.3	2618.3	4436.4	6732.1
2	5234.5	3366.4	5703.9	8655.5
3	6397.7	4114.5	6971.5	10579.0

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	24.7	21.3	25.4	29.2
2	24.7	21.3	25.4	29.2
3	24.7	21.3	25.4	29.2

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	6.4	1.8	3.9	6.1
2	6.8	2.9	4.8	6.8
3	7.3	3.9	5.8	7.4

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	39.66	46.66	54.18	58.15
2	36.48	42.49	48.89	52.24
3	31.76	35.92	41.76	46.84

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	36.43	41.97	48.58	52.49
2	34.08	39.38	45.33	48.71
3	29.93	33.74	39.30	44.33

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	119.78	151.28	200.50	239.04
2	64.32	81.62	108.55	129.92
3	36.38	44.43	61.95	83.13

$\cdot 10^{-6}$

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

	1	2	3	4
1	483.2	926.0	1479.2	1752.8
2	293.2	504.1	764.8	881.1
3	167.6	252.5	386.5	505.1

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	1784.1	2532.5	3864.1	5030.0
2	875.6	1251.6	1919.7	2513.8
3	422.4	570.0	938.6	1458.9

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	14.9	16.7	19.3	21.0
2	13.6	15.3	17.7	19.3
3	11.6	12.8	15.2	17.5

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	4.0	6.1	7.4	7.3
2	4.6	6.2	7.0	6.8
3	4.6	5.7	6.2	6.1

$\cdot 10^{-3}$

$Jx_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	7676	549	3039	9634
2	11083	1608	6143	15621
3	15756	3556	10770	23247

$\cdot 10^{-12}$

$Jy_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	131811	73173	147804	257737
2	169471	94079	190034	331377
3	207131	114986	232263	405016

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	27857	5131	18182	43361
2	37769	10217	29269	62292
3	49570	16997	42799	83602

$\cdot 10^{-12}$

$Jx0_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	837	133	448	1172
2	1301	323	916	2030
3	1960	644	1617	3204

$\cdot 10^{-12}$

$Jy0_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	31219	17331	35007	61045
2	40139	22283	45009	78486
3	49059	27234	55011	95928

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy0_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	1628	309	1086	2565
2	2200	612	1737	3666
3	2871	1010	2522	4894

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	3.06	1.03	1.80	2.45
2	3.23	1.59	2.25	2.74
3	3.48	2.17	2.70	3.01

$\cdot \circ$

$Jx_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	2310	6463	12383	14730
2	1494	3444	5964	6663
3	850	1571	2649	3398

$\cdot 10^{-12}$

$Jy_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	34823	55552	97582	138694
2	15620	25151	44488	63733
3	6426	9583	18633	33548

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	7643	16433	30208	39111
2	4234	8188	14327	18078
3	2061	3427	6201	9401

$\cdot 10^{-12}$

$Jx0_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	361	794	1471	1878
2	158	330	575	687
3	78	136	238	329

$\cdot 10^{-12}$

$Jy0_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	8248	13158	23112	32850
2	3700	5957	10537	15095
3	1522	2270	4413	7946

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy0_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	446	931	1701	2229
2	242	458	802	1029
3	115	188	345	536

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	3.22	4.28	4.47	4.09
2	3.90	4.62	4.57	4.07
3	4.54	5.01	4.70	4.01

$\cdot \circ$

$$\mathrm{Ju}_{\mathrm{stator}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 750 & 127 & 414 & 1063 \\ 2 & 1176 & 306 & 848 & 1855 \\ 3 & 1785 & 605 & 1499 & 2946 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Jv}_{\mathrm{stator}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 31306.3 & 17336.5 & 35041.3 & 61154.6 \\ 2 & 40263.3 & 22299.6 & 45077.7 & 78661.7 \\ 3 & 49233.3 & 27272.6 & 55130.2 & 96185.3 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Juv}_{\mathrm{stator}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & -0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & -0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Jp}_{\mathrm{stator}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 32056 & 17464 & 35455 & 62217 \\ 2 & 41440 & 22605 & 45925 & 80516 \\ 3 & 51018 & 27878 & 56629 & 99132 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Wp}_{\mathrm{stator}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 927.3 & 594.5 & 1008.3 & 1531.7 \\ 2 & 1196.3 & 767.4 & 1301.6 & 1976.7 \\ 3 & 1468.5 & 942.6 & 1598.5 & 2426.8 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$\mathrm{stiffness}_{\mathrm{stator}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 639.9 & 355.2 & 717.6 & 1251.3 \\ 2 & 1360.1 & 755.0 & 1525.1 & 2659.5 \\ 3 & 2483.2 & 1378.5 & 2784.5 & 4855.6 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Ju}_{\mathrm{rotor}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 336 & 725 & 1338 & 1718 \\ 2 & 141 & 293 & 511 & 614 \\ 3 & 68 & 120 & 209 & 291 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Jv}_{\mathrm{rotor}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 8273 & 13227 & 23245 & 33009 \\ 2 & 3716 & 5994 & 10601 & 15168 \\ 3 & 1531 & 2286 & 4442 & 7983 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Juv}_{\mathrm{rotor}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & -0 & 0 \\ 3 & 0 & -0 & 0 & 0 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Jp}_{\mathrm{rotor}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 8609 & 13952 & 24583 & 34727 \\ 2 & 3857 & 6288 & 11113 & 15782 \\ 3 & 1599 & 2406 & 4651 & 8275 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\mathrm{Wp}_{\mathrm{rotor}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 412.5 & 585.9 & 893.9 & 1163.7 \\ 2 & 200.3 & 286.2 & 439.0 & 575.0 \\ 3 & 96.3 & 129.8 & 213.9 & 332.6 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$\mathrm{stiffness}_{\mathrm{rotor}}{}^{\mathrm{T}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 676.2 & 1078.8 & 1895.0 & 2693.4 \\ 2 & 125.4 & 201.9 & 357.0 & 511.5 \\ 3 & 31.2 & 46.5 & 90.5 & 162.9 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$CPx_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	20.536	17.726	21.132	24.284
2	20.536	17.726	21.132	24.284
3	20.536	17.726	21.132	24.284

$\cdot 10^{-3}$

$CPx_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	12.380	13.914	16.018	17.490
2	11.315	12.746	14.699	16.082
3	9.649	10.663	12.592	14.586

$\cdot 10^{-3}$

$CPy_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

$\cdot 10^{-3}$

$CPy_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

$\cdot 10^{-3}$

▲ Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Вывод результатов расчета геометрических хар-к сечений Л

Профилирование решеток

Абс. координаты профиля:

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

Профилирование решеток

Рассматриваемая ступень: $j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 4$

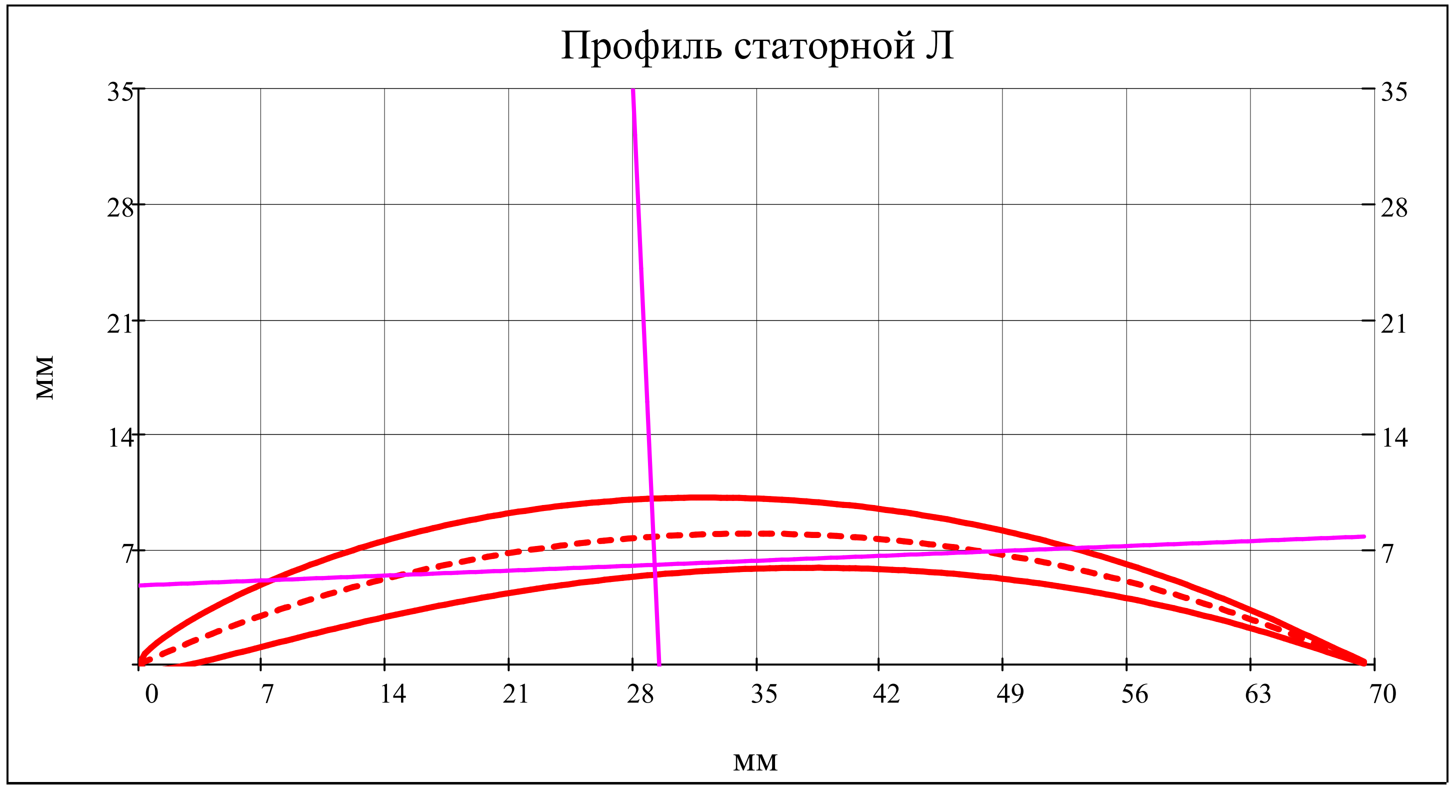
Построение профилей Л РК и НА

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

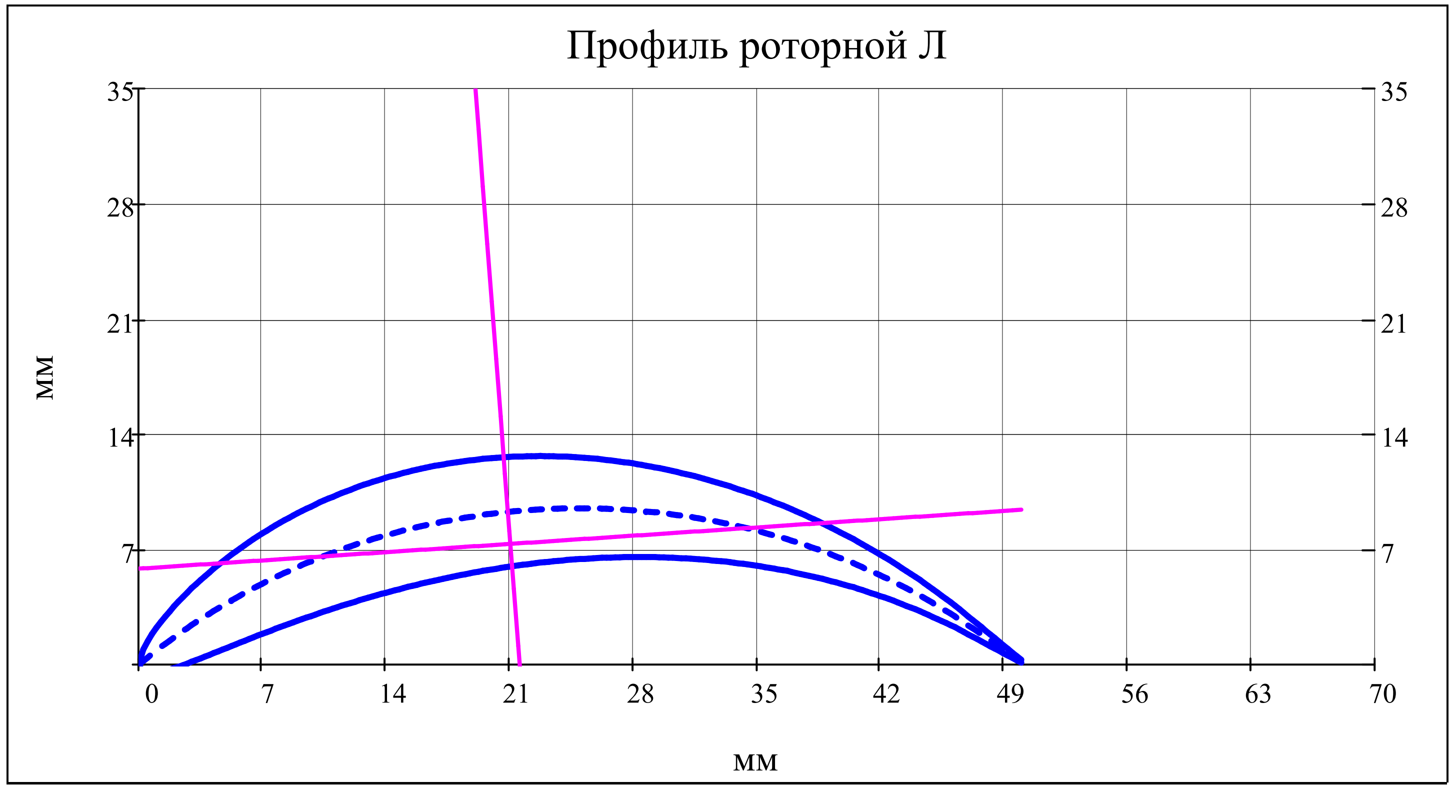
$$b_{lim} = \frac{\mathrm{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

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

$r = 1$

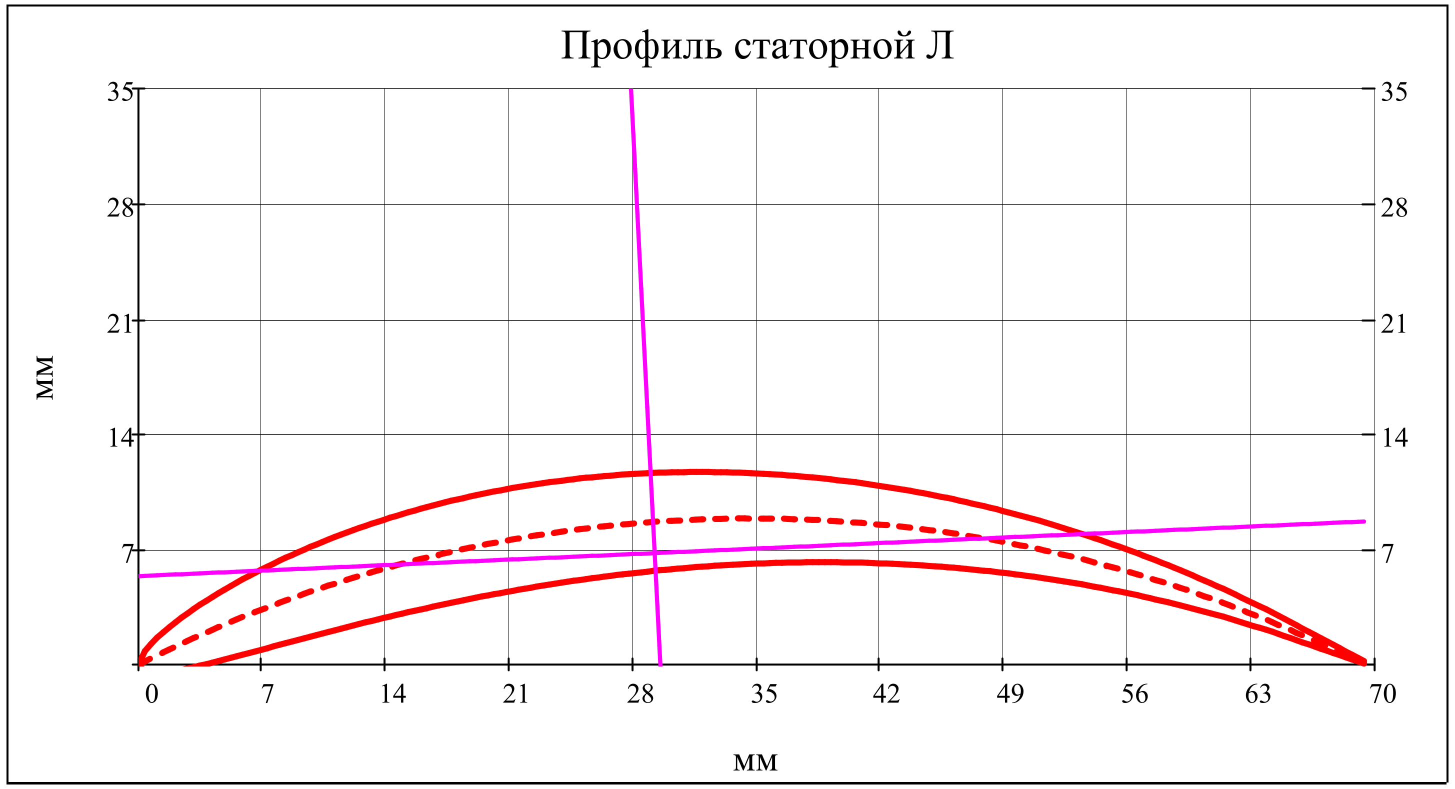


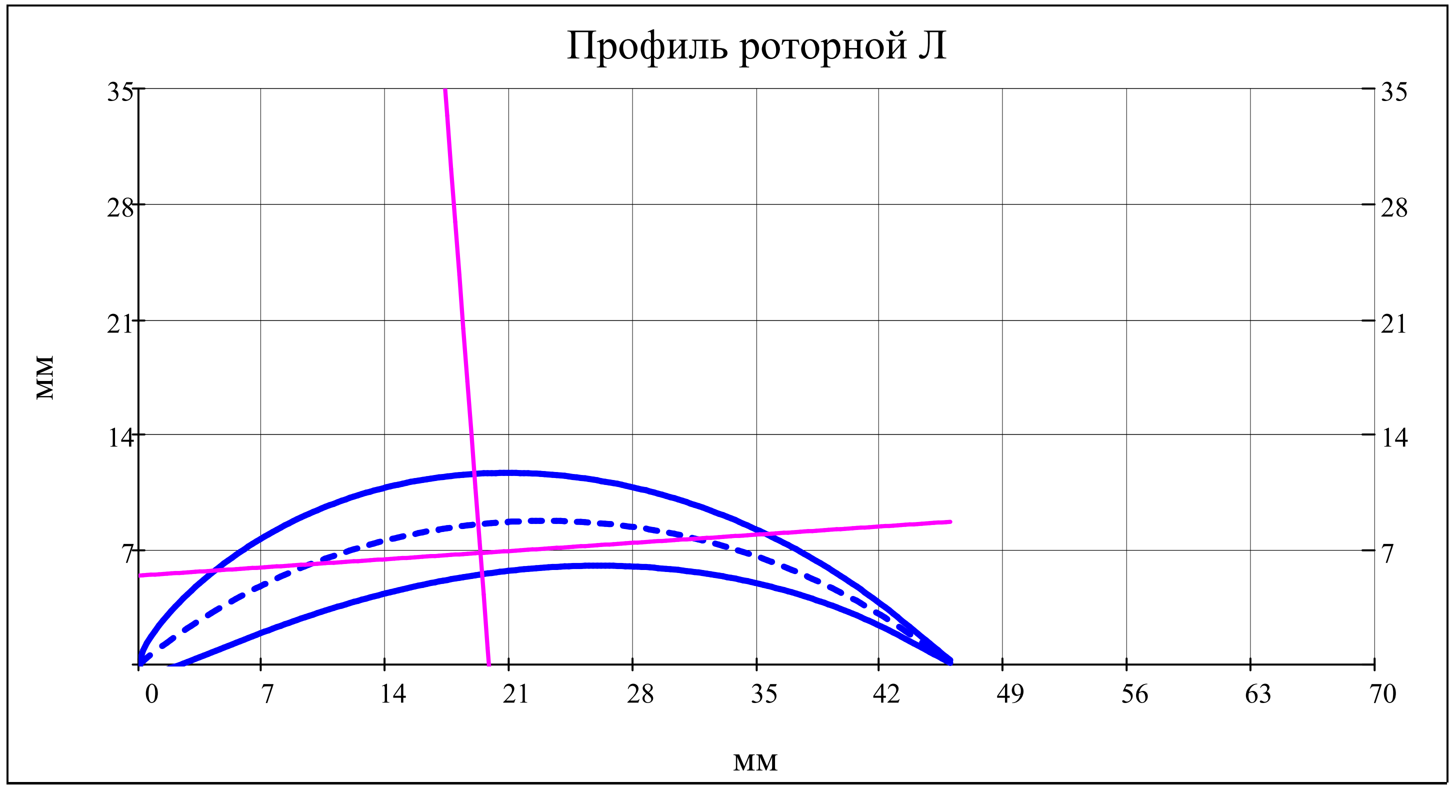
Профиль статорной Л
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм



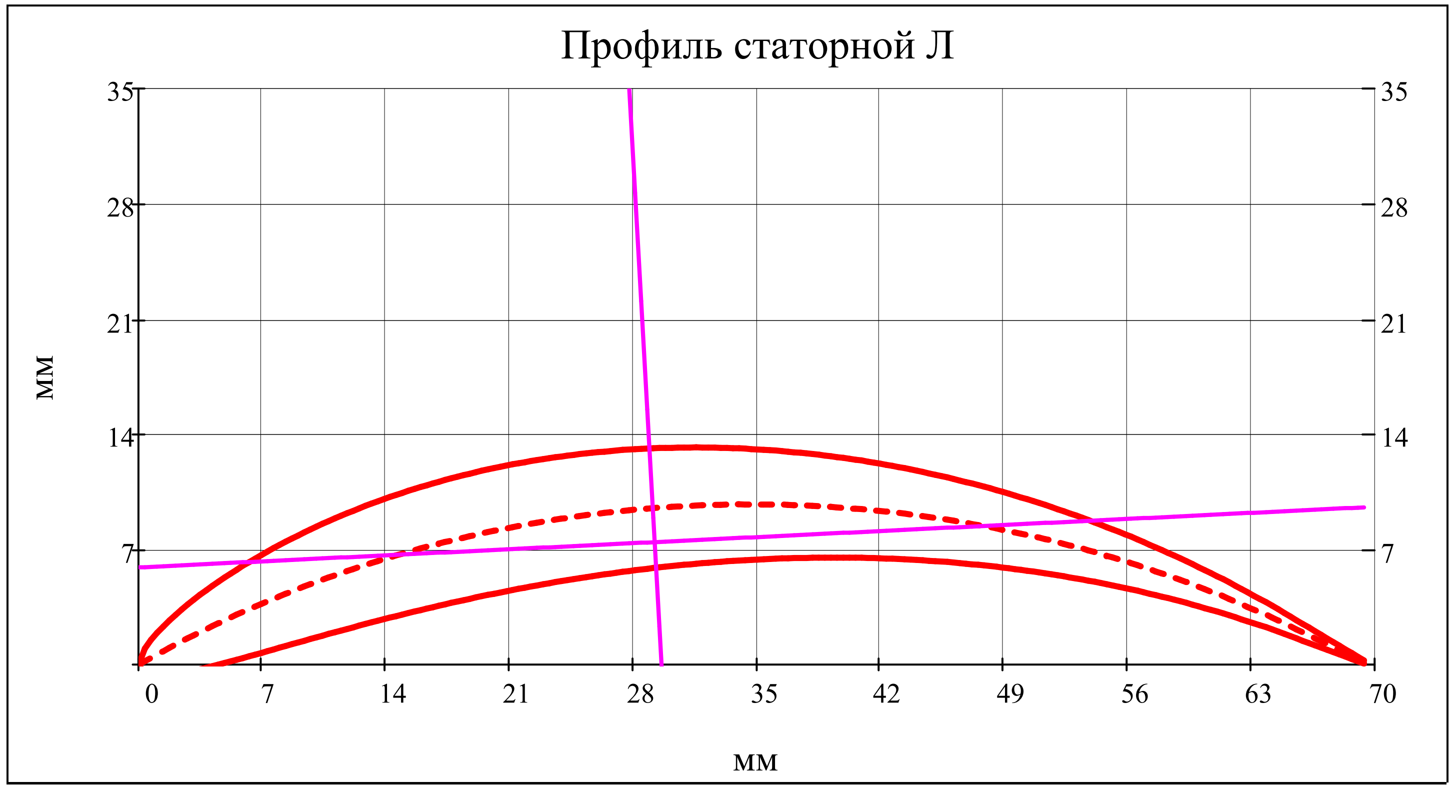
Профиль роторной Л
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм

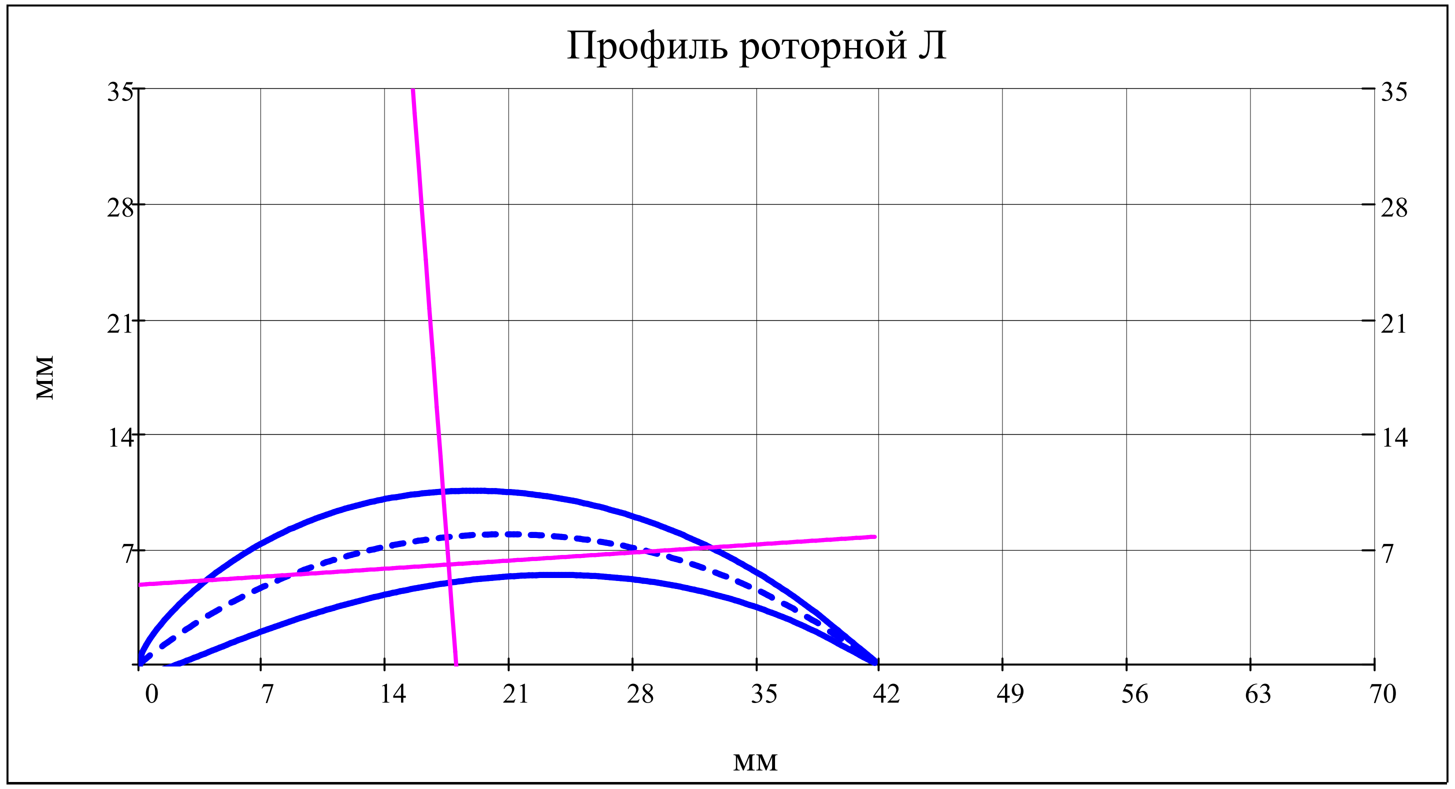
$r = av(N_r)$


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


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

$r = N_r$





Построение профилей Л РК и НА

Вывод координат для построения профиля Л

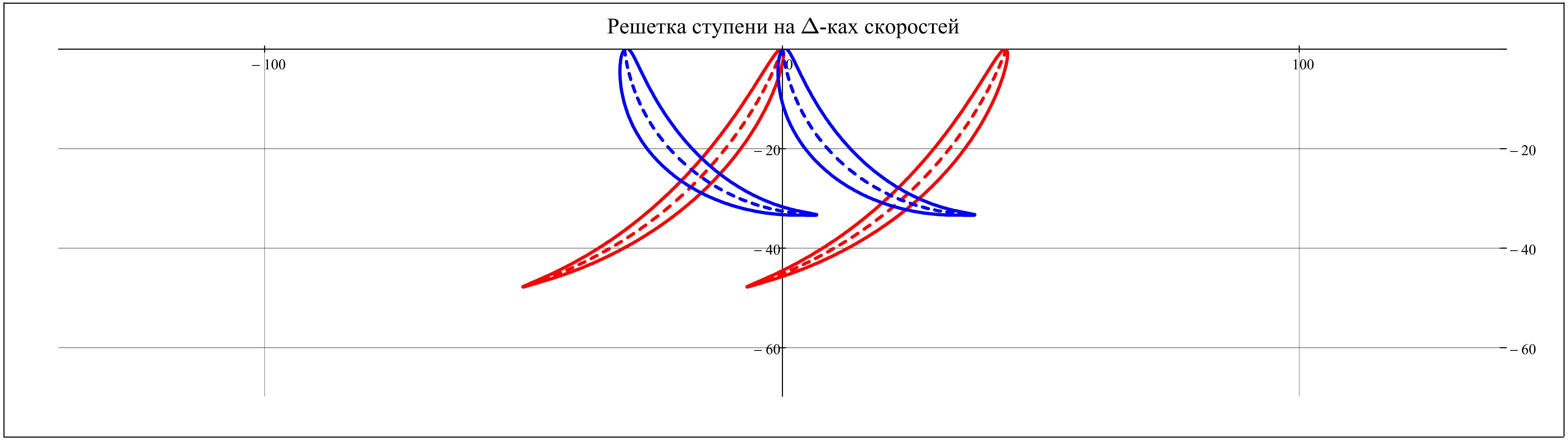
Рассматриваемая ступень:

$$j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 4$$

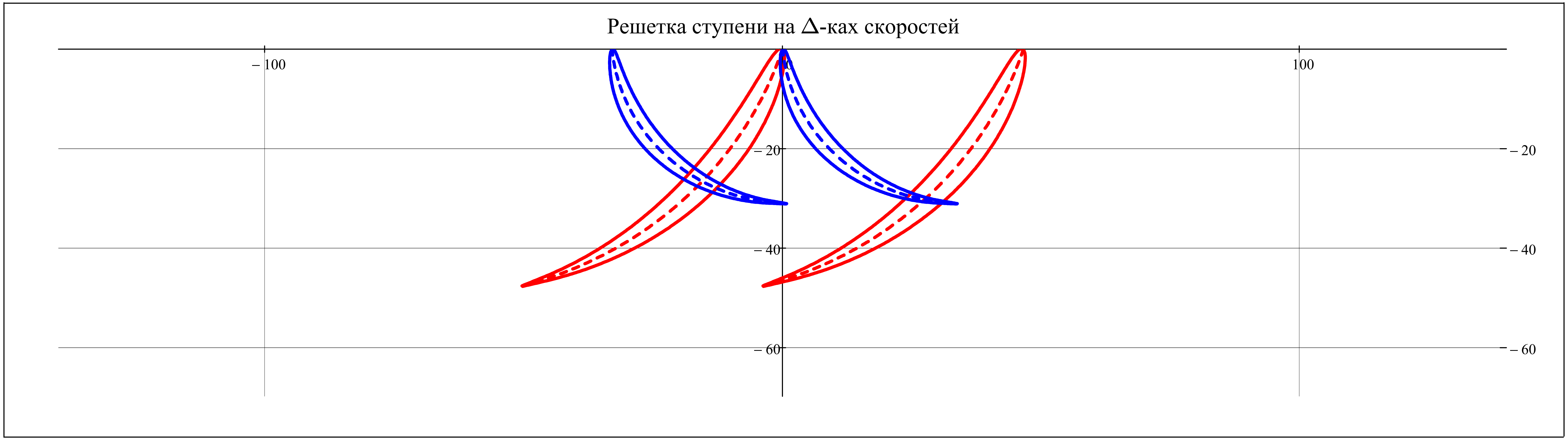
$$b_{lim} = \frac{\text{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

$r = 1$



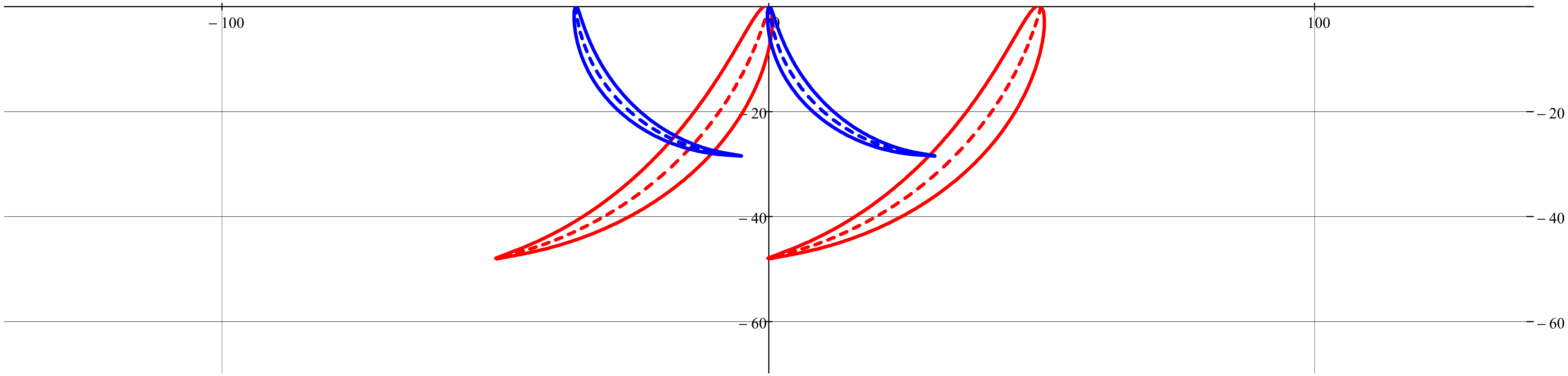
$r = av(N_r)$



Решетка ступени на Δ-ках скоростей

$r = N_r$

Решетка ступени на Δ-ках скоростей



▲ Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

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

Рассматриваемая ступень: $j = \left| \begin{array}{l} j = Z \\ j = \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 4$

Поперечная часть ступени

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

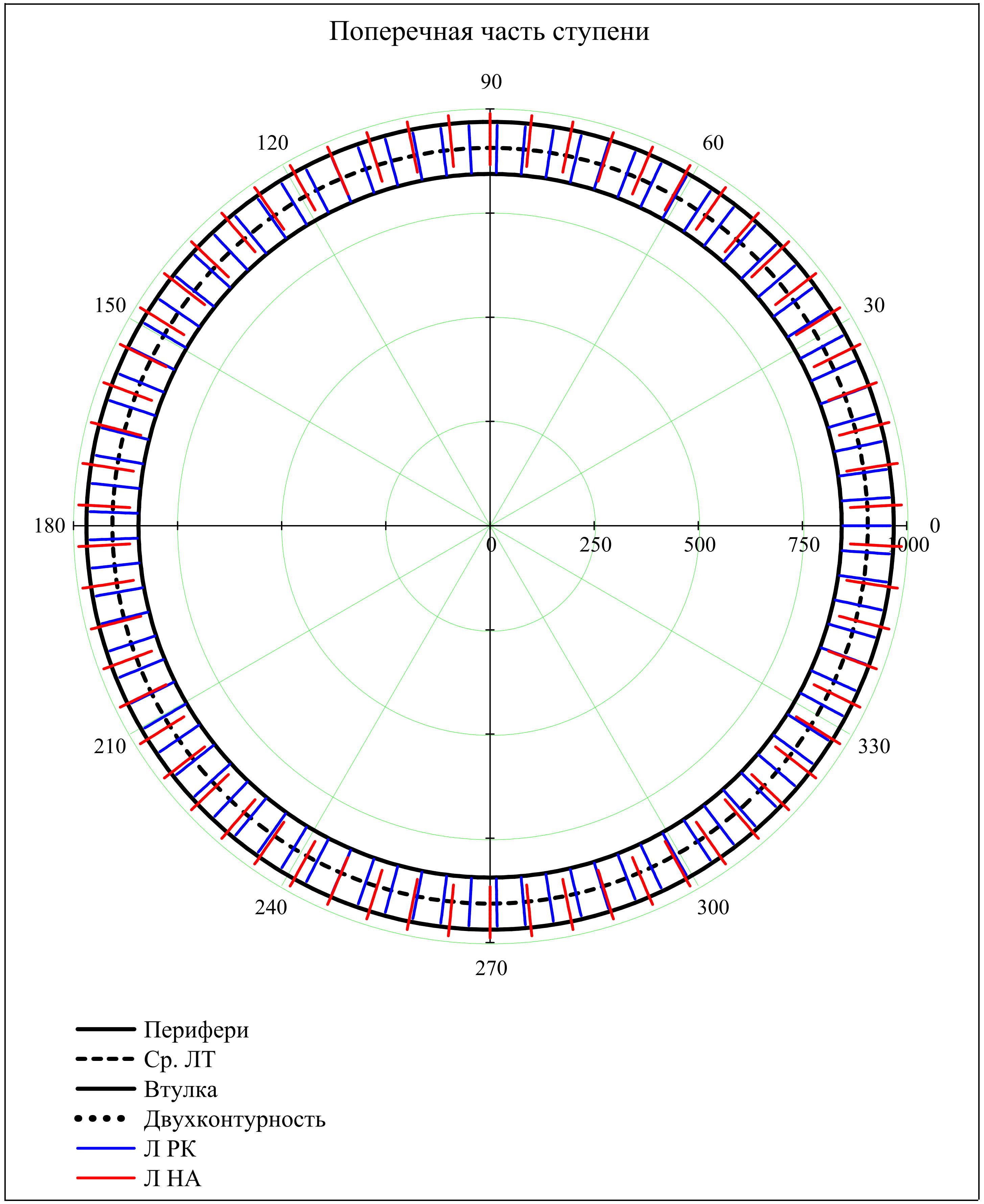
$$i_{rotor} = 1 .. Z_{rotor_j}$$

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

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

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

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



Поперечная часть ступени

Расчет собственных частот колебаний Л

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

```
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	3263	1318	1559	1694	1618	1636	1616	1298
2	20449	8261	9769	10618	10139	10252	10130	8134
3	57262	23133	27357	29734	28391	28708	28368	22777
4	112296	45365	53649	58311	55677	56299	55632	44667
5	185556	74961	88649	96353	92001	93028	91925	73807
6	277118	111950	132392	143897	137398	138932	137285	110226

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	3	4	5	6	7	8
1	3125	2608	2392	2193	2761	2440	2268	2039
2	9376	7823	7177	6578	8284	7319	6803	6118
3	15626	13038	11962	10963	13806	12199	11339	10197
4	21877	18253	16747	15348	19329	17078	15875	14275
5	28128	23468	21532	19733	24851	21958	20410	18354
6	34378	28683	26317	24118	30374	26838	24946	22433

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6251	5215	4785	4385	5523	4880	4536	4079
2	12501	10430	9570	8770	11045	9759	9071	8157
3	18752	15645	14355	13155	16568	14639	13607	12236
4	25002	20860	19140	17540	22090	19518	18143	16315
5	31253	26076	23924	21925	27613	24398	22678	20394
6	37503	31291	28709	26310	33135	29277	27214	24472

▲ Расчет собственных частот колебаний Л

Вывод результатов расчета собственных частот колебаний Л

Расчетный узел: $type = \text{"turbine"}$

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

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

▶ Расчет Л на прочность

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

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

▶ Определение координат точек профиля Л, наиболее удаленных от НЛ

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$u\_u_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & -1.160 & -1.024 & -0.986 & -1.003 \\ 2 & 0.261 & 0.336 & 0.342 & -0.616 \\ 3 & 0.241 & 0.281 & 0.268 & 0.223 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_u_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 4.927 & 5.365 & 5.441 & 5.299 \\ 2 & 3.698 & 3.973 & 3.956 & 3.765 \\ 3 & 3.189 & 3.344 & 3.240 & 3.002 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_l_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 28.375 & 28.028 & 27.933 & 28.008 \\ 2 & 25.969 & 25.738 & 25.725 & 25.849 \\ 3 & 23.420 & 23.278 & 23.334 & 23.497 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_l_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & -7.980 & -10.413 & -10.906 & -10.223 \\ 2 & -8.576 & -10.135 & -10.108 & -9.138 \\ 3 & -8.916 & -9.837 & -9.322 & -8.081 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_u_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & -6.048 & 18.972 & 16.627 & 15.685 \\ 2 & 14.809 & 34.565 & 38.064 & 22.591 \\ 3 & -11.210 & -18.804 & -18.046 & 37.611 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_u_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 29.582 & 4.200 & 5.221 & 6.027 \\ 2 & 38.137 & 20.800 & 13.898 & 8.774 \\ 3 & 7.817 & 9.146 & 23.918 & 15.820 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$u\_l_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & -9.648 & -27.201 & -27.296 & -26.659 \\ 2 & 2.702 & -20.244 & -22.418 & -24.751 \\ 3 & 34.492 & 34.701 & 10.465 & -19.527 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$v\_l_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & -39.707 & -6.703 & -9.605 & -12.000 \\ 2 & -30.181 & -20.609 & -18.668 & -15.935 \\ 3 & -22.276 & -20.913 & -39.336 & -22.312 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

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

$\sigma\_p_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	-49.58	-38.69	-24.96	-15.94
2	-31.38	-25.94	-16.28	-8.77
3	-4.79	-6.12	-2.55	-0.07

$\cdot 10^{6}$

$\sigma\_p_{rotor}{}^{T} \le 70\cdot 10^{6} =$

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1

$\sigma\_n_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	86.83	79.81	53.31	33.39
2	76.42	69.01	43.71	22.64
3	13.77	18.44	7.63	0.20

$\cdot 10^{6}$

$\sigma\_n_{rotor}{}^{T} \le 70\cdot 10^{6} =$

	1	2	3	4
1	0	0	1	1
2	0	1	1	1
3	1	1	1	1

$\sigma\_p_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	0.00	1.03	0.58	0.05
2	1.78	12.03	7.28	2.32
3	-10.85	-20.23	-8.47	8.70

$\cdot 10^{6}$

$\sigma\_p_{stator}{}^{T} \le 70\cdot 10^{6} =$

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1

$\sigma\_n_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	0.00	-1.58	-1.01	-0.10
2	-0.09	-9.17	-6.42	-3.38
3	31.68	42.27	8.54	-7.36

$\cdot 10^{6}$

$\sigma\_n_{stator}{}^{T} \le 70\cdot 10^{6} =$

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1

```
$\begin{pmatrix}\sigma_{rotor}\\ \sigma_{stator}\end{pmatrix} =$
    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	2	3	4
1	113.20	114.67	95.63	80.56
2	97.50	97.27	77.14	56.67
3	22.50	32.20	20.77	3.32

$\cdot 10^6$

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

	1	2	3	4
1	0.00	1.09	0.70	0.16
2	2.67	12.08	7.36	2.47
3	31.86	42.31	8.71	8.81

$\cdot 10^6$

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

$safety_{rotor}{}^T =$

	1	2	3	4
1	1.06	1.05	1.25	1.49
2	1.23	1.23	1.56	2.12
3	5.33	3.73	5.78	36.17

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

	1	2	3	4
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	1	1	1	1

$safety_{stator}{}^T =$

	1	2
1	0000000000000000000000000000000	
2	44.88	
3	3.77	

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

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1

Рассматриваемая ступень:

$$j = \left| \begin{array}{l} j = \left| \begin{array}{l} 1 \text{ if } type = \text{"compressor"} \\ Z \text{ if } type = \text{"turbine"} \end{array} \right. \\ j = \left| \begin{array}{l} \text{"Такой ступени не существует!"} \text{ if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j \text{ otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 4$$

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

Расстояния от оси ЛМ до рассматриваемой ступени (м):

$$Rj = \mathrm{submatrix}\left(R, 2\cdot j - 1, 2\cdot j + 1, 1, N_r\right) = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 422.0 & 453.2 & 484.5 \\ 2 & 433.0 & 466.0 & 499.1 \\ 3 & 433.0 & 468.5 & 503.9 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

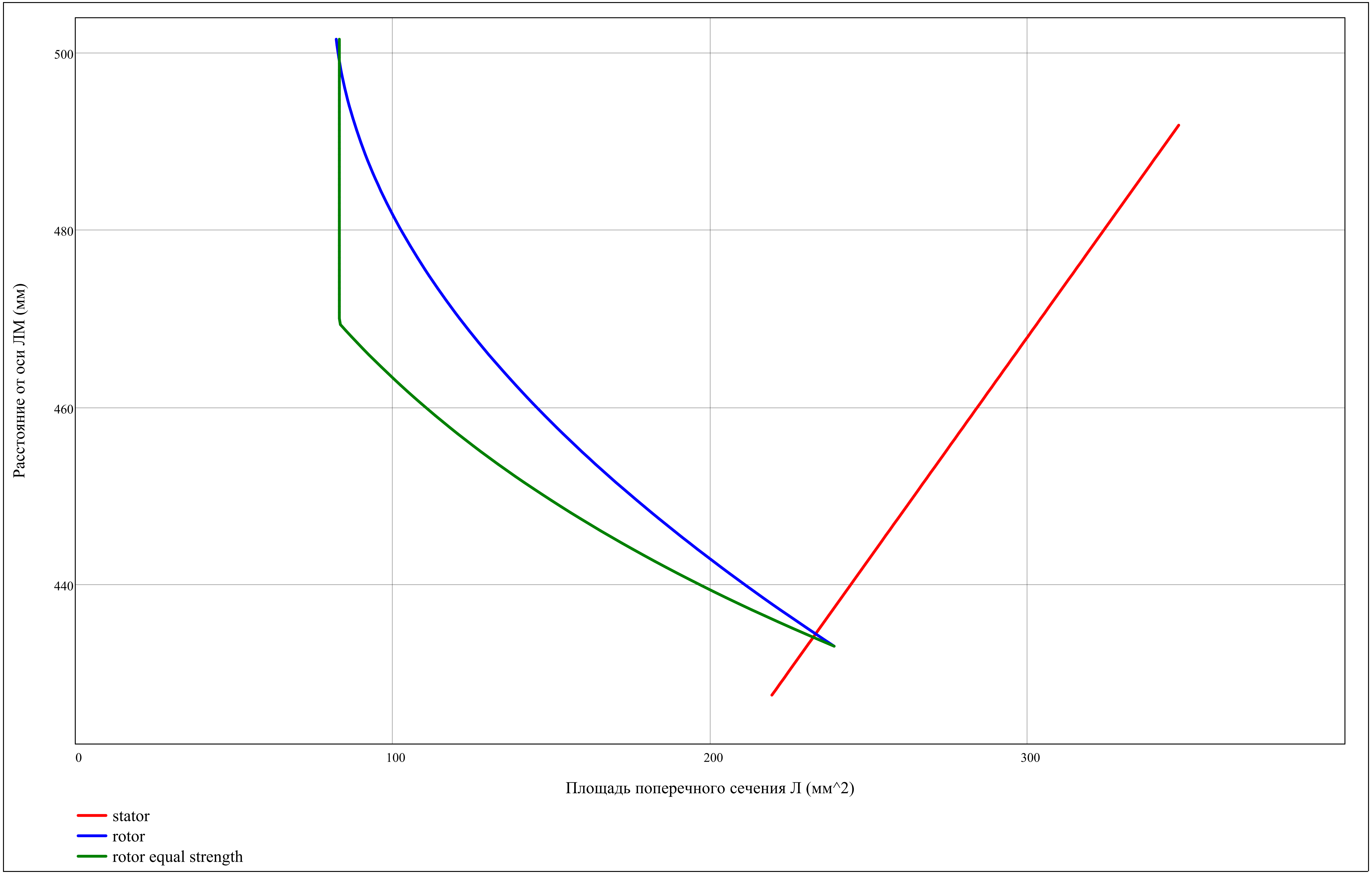
Дискретизация по высоте Л:

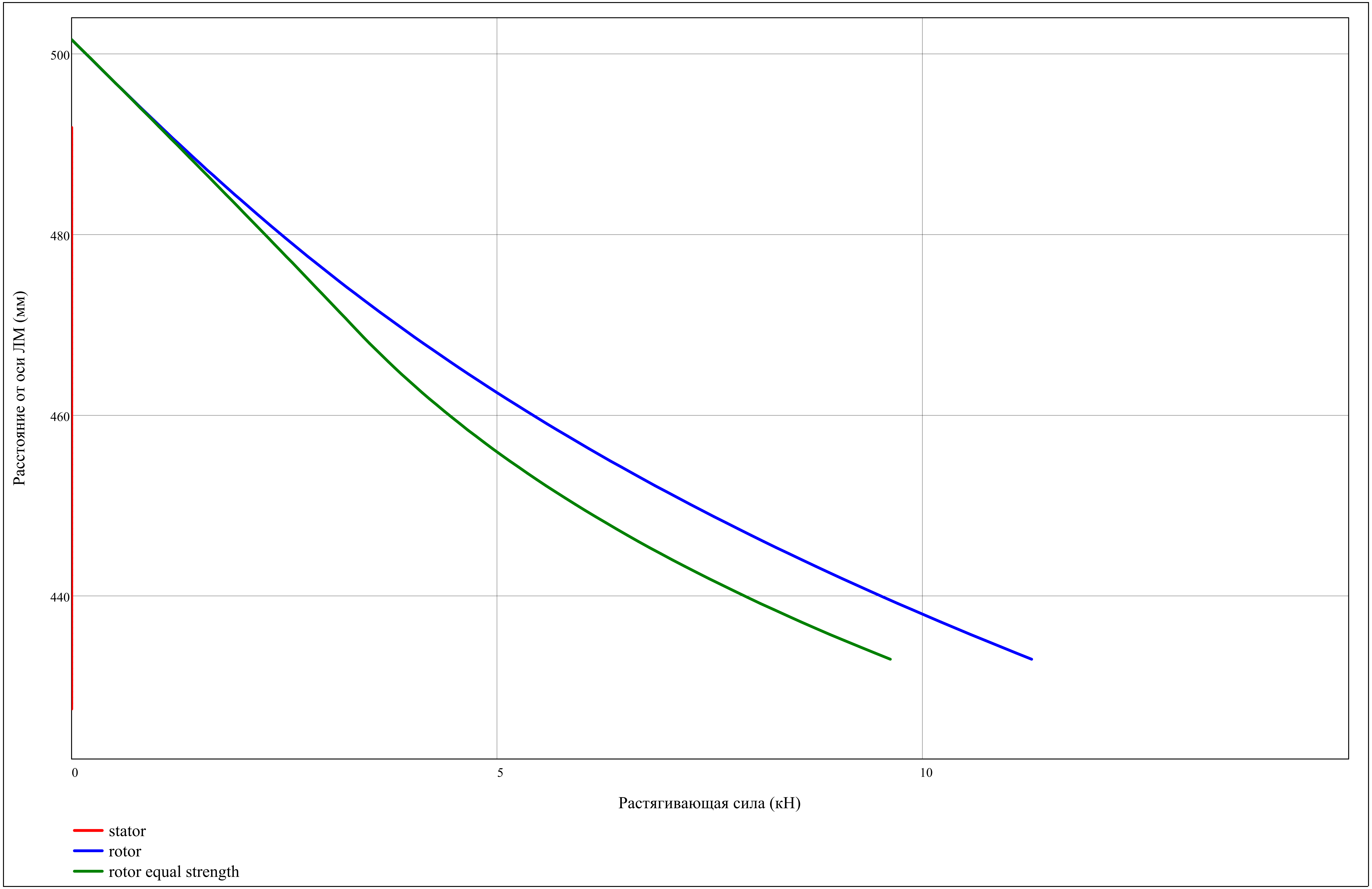
$$z = \min(Rj), \min(Rj) + \frac{\max(Rj) - \min(Rj)}{100} .. \max(Rj)$$

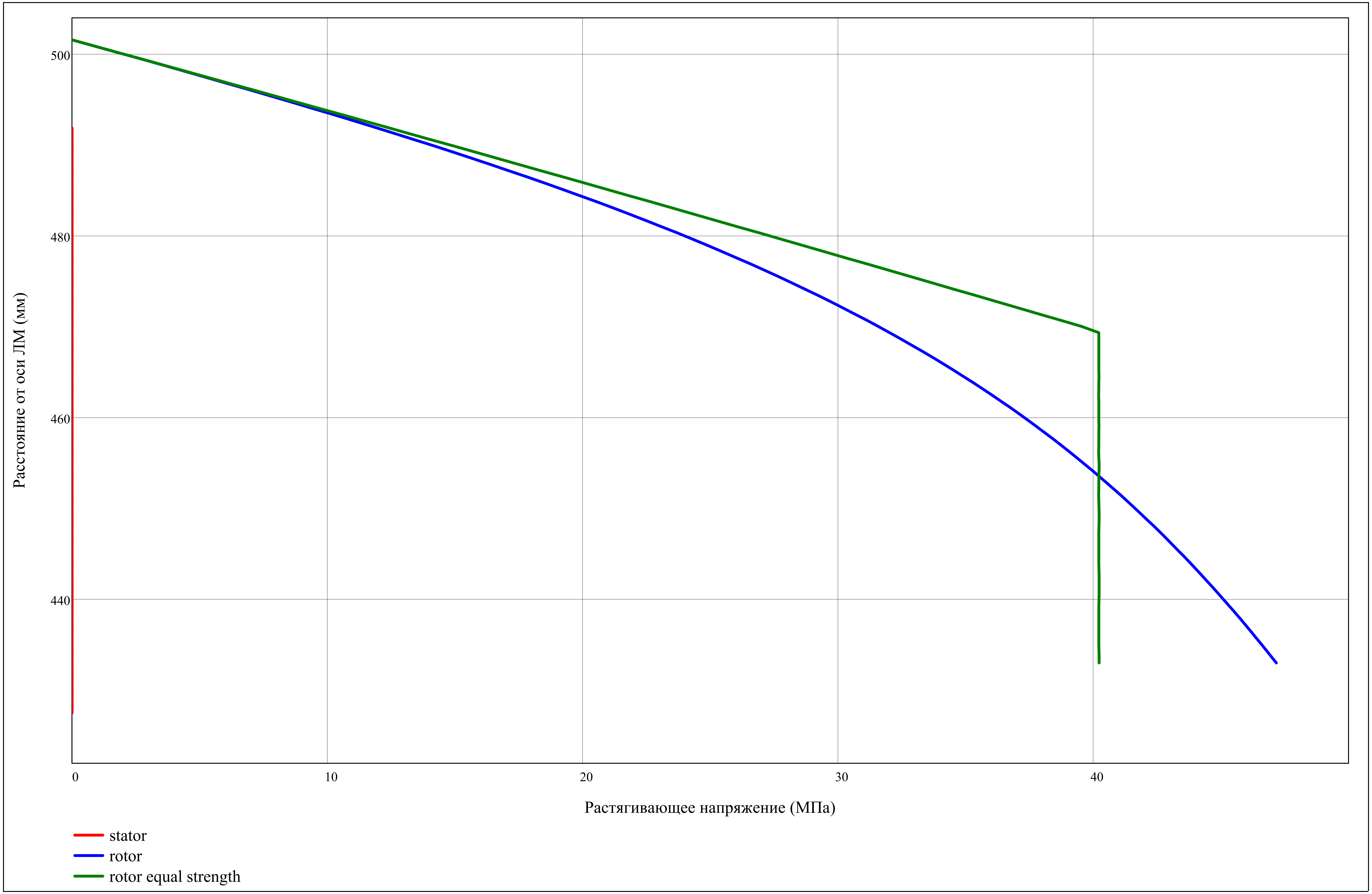
$$z_{rotor} = \left| \begin{array}{l} \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right), \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right) + \dfrac{\mathrm{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) - \mathrm{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right)}{100} .. \mathrm{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) \text{ if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

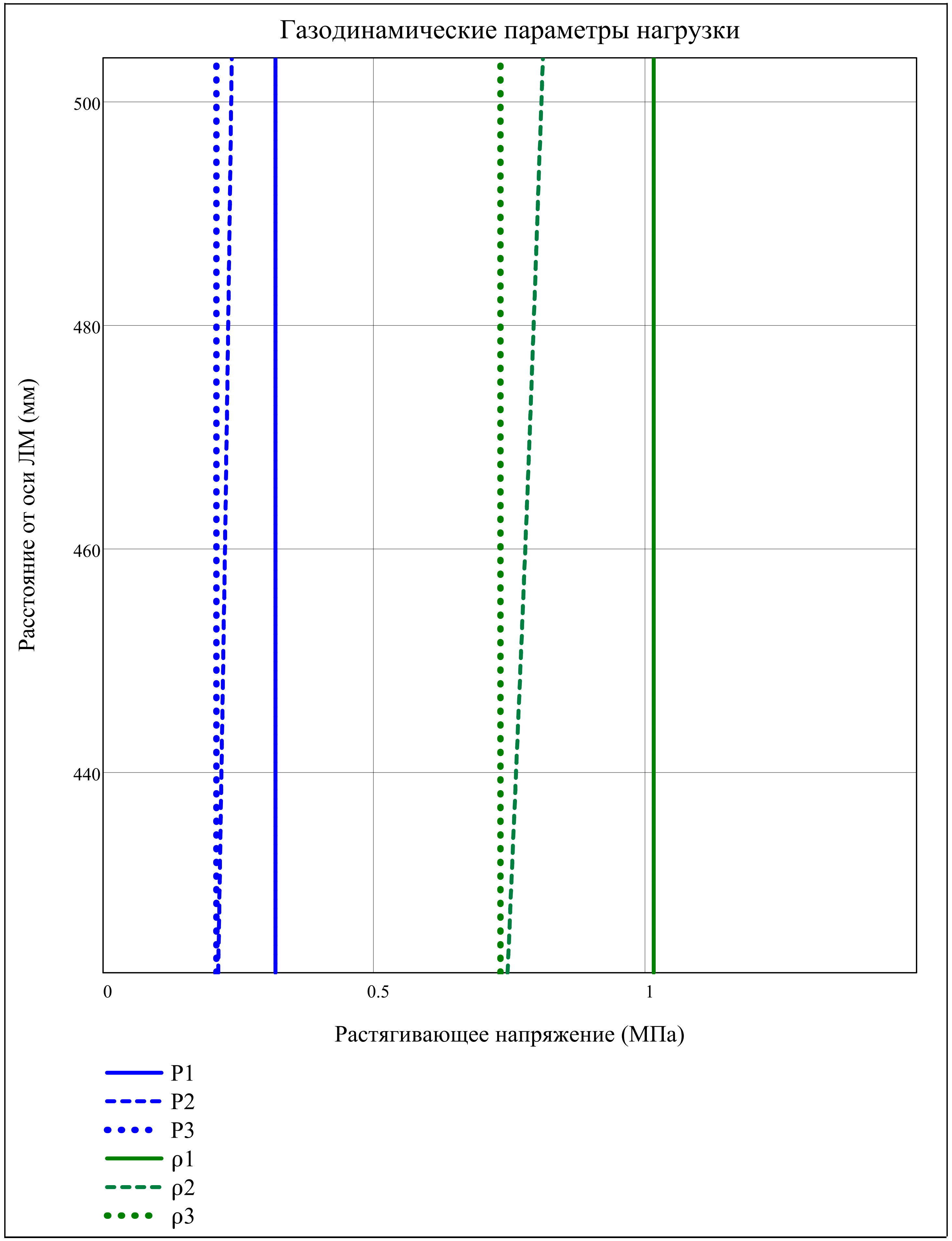
$$z_{stator} = \left| \begin{array}{l} \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right), \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right) + \dfrac{\mathrm{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) - \mathrm{mean}\left(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}\right)}{100} .. \mathrm{mean}\left(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}\right) \text{ if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

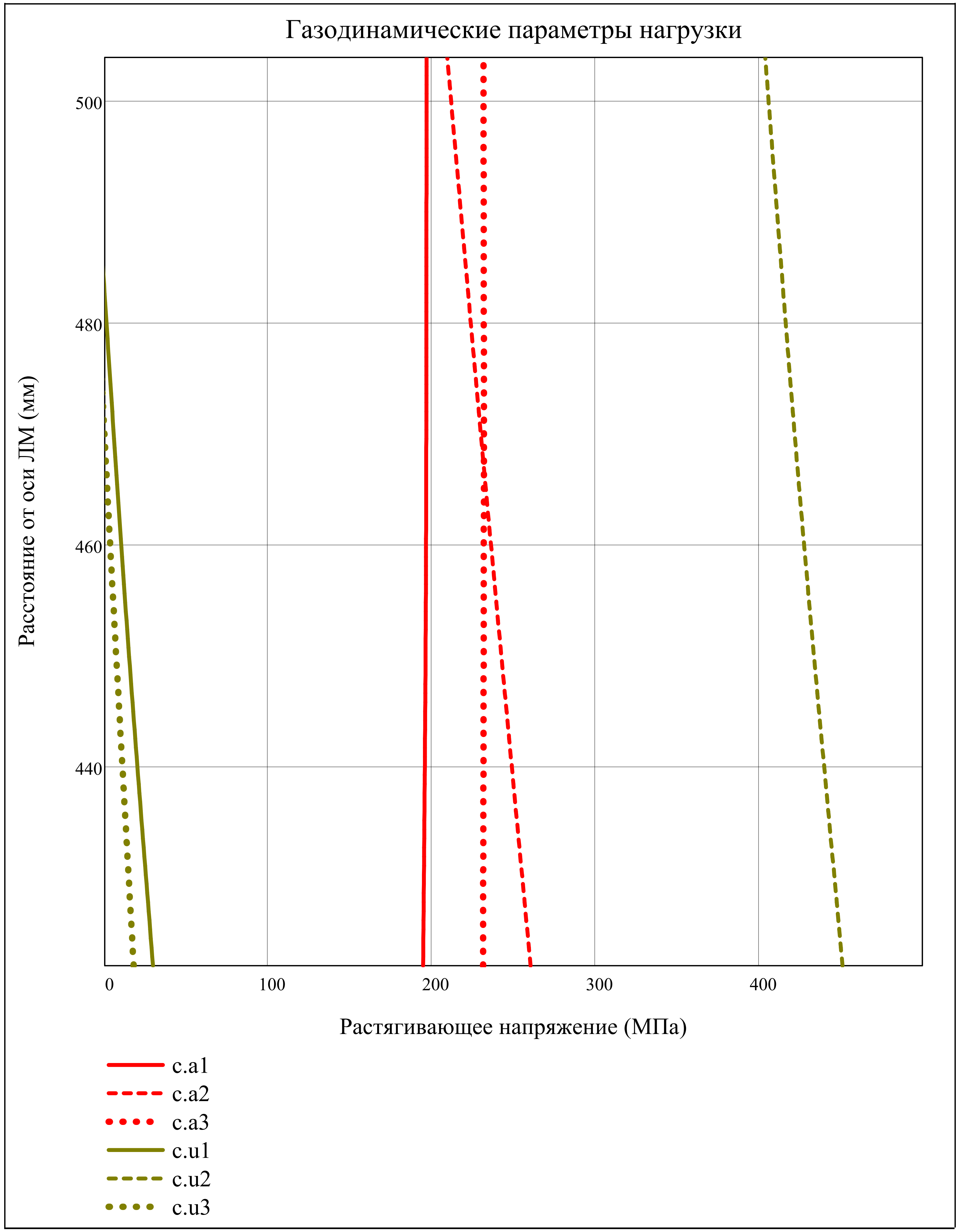
▾ Результаты расчета на прочность Л

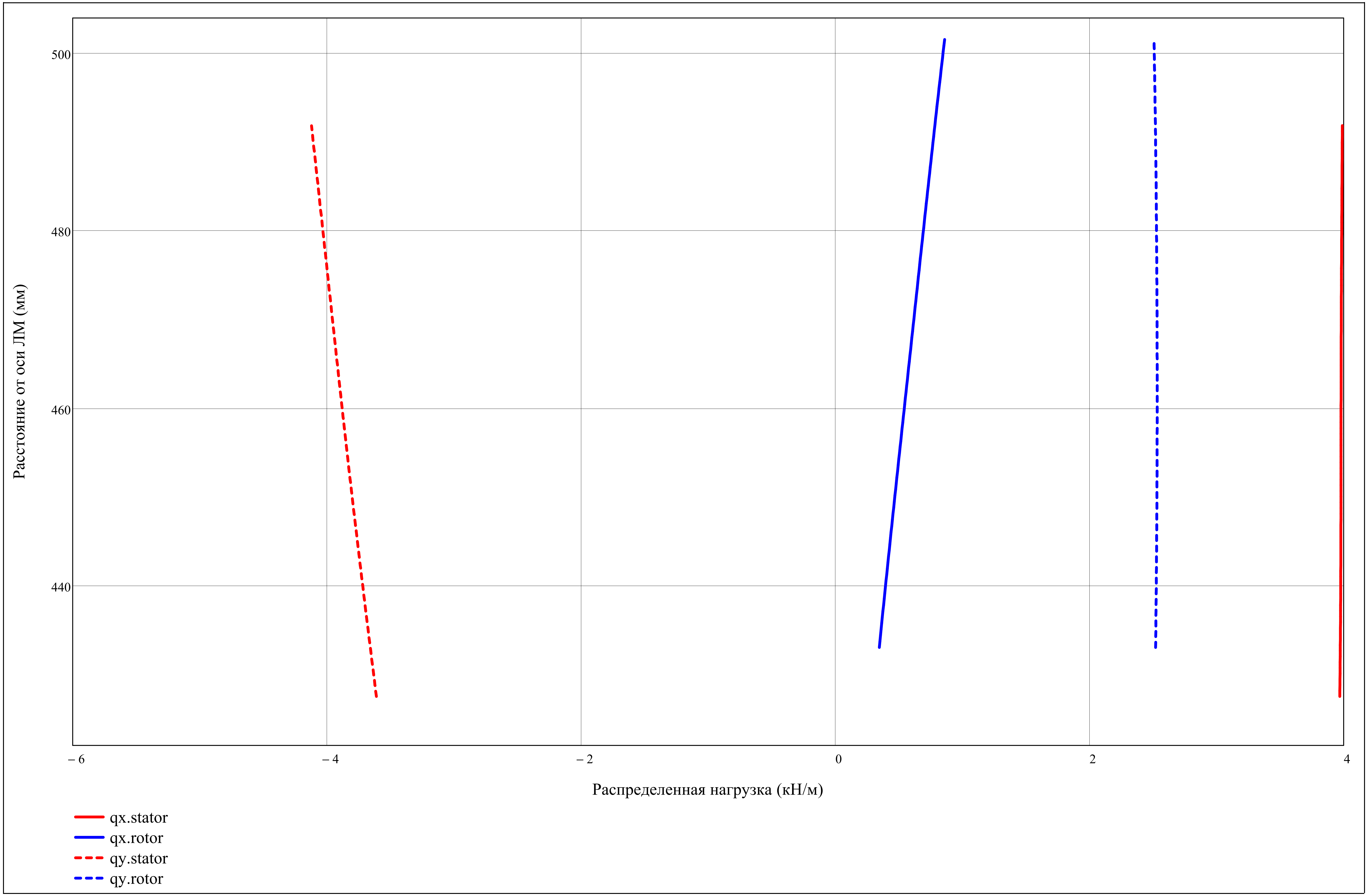

500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
100
200
300
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength

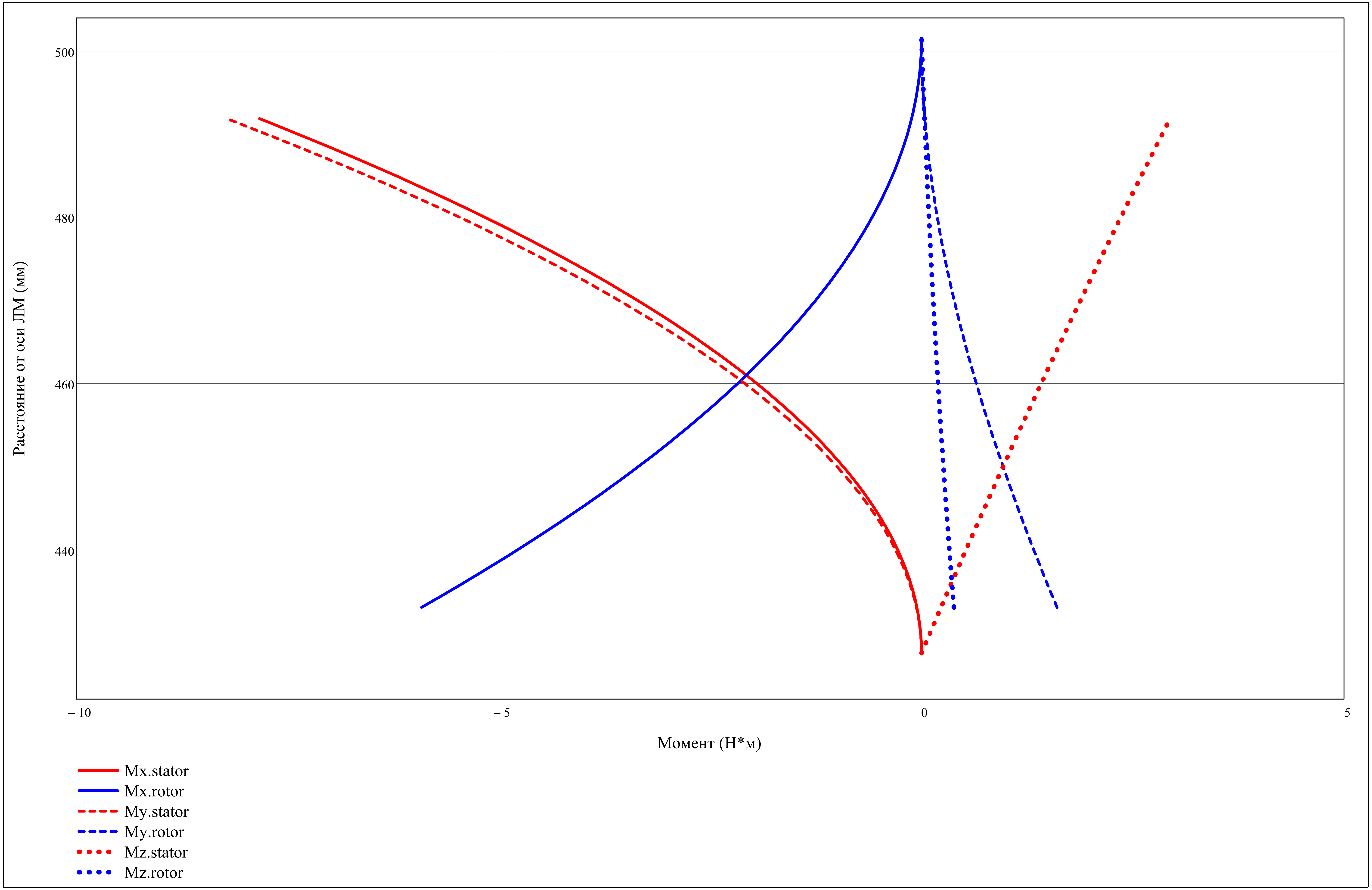

500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
5
10
Растягивающая сила (кН)
stator
rotor
rotor equal strength


500
480
460
440
0
10
20
30
40
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Растягивающее напряжение (МПа)
stator
rotor
rotor equal strength

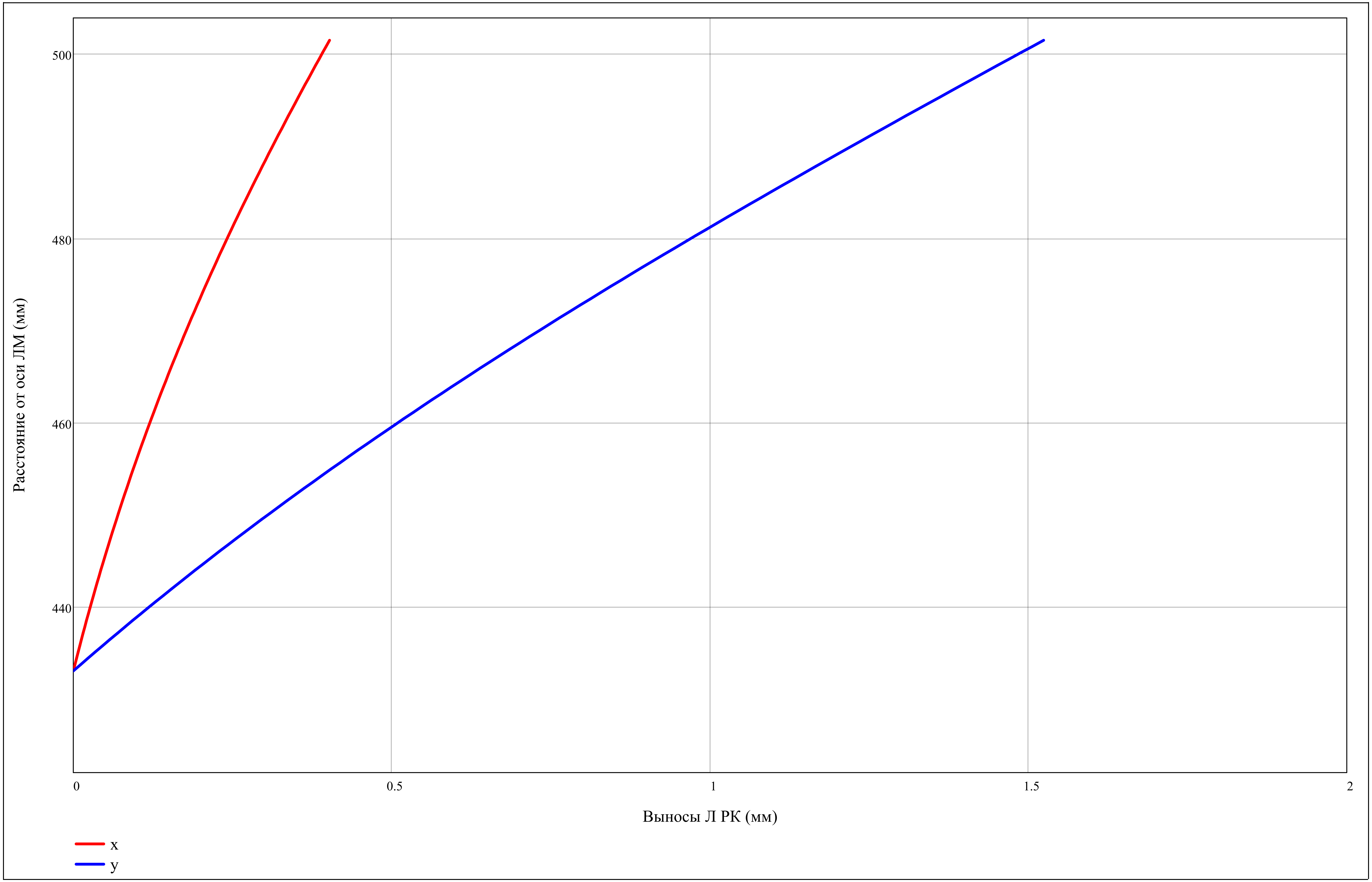

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
0
0.5
1
Растягивающее напряжение (МПа)
P1
P2
P3
ρ1
ρ2
ρ3

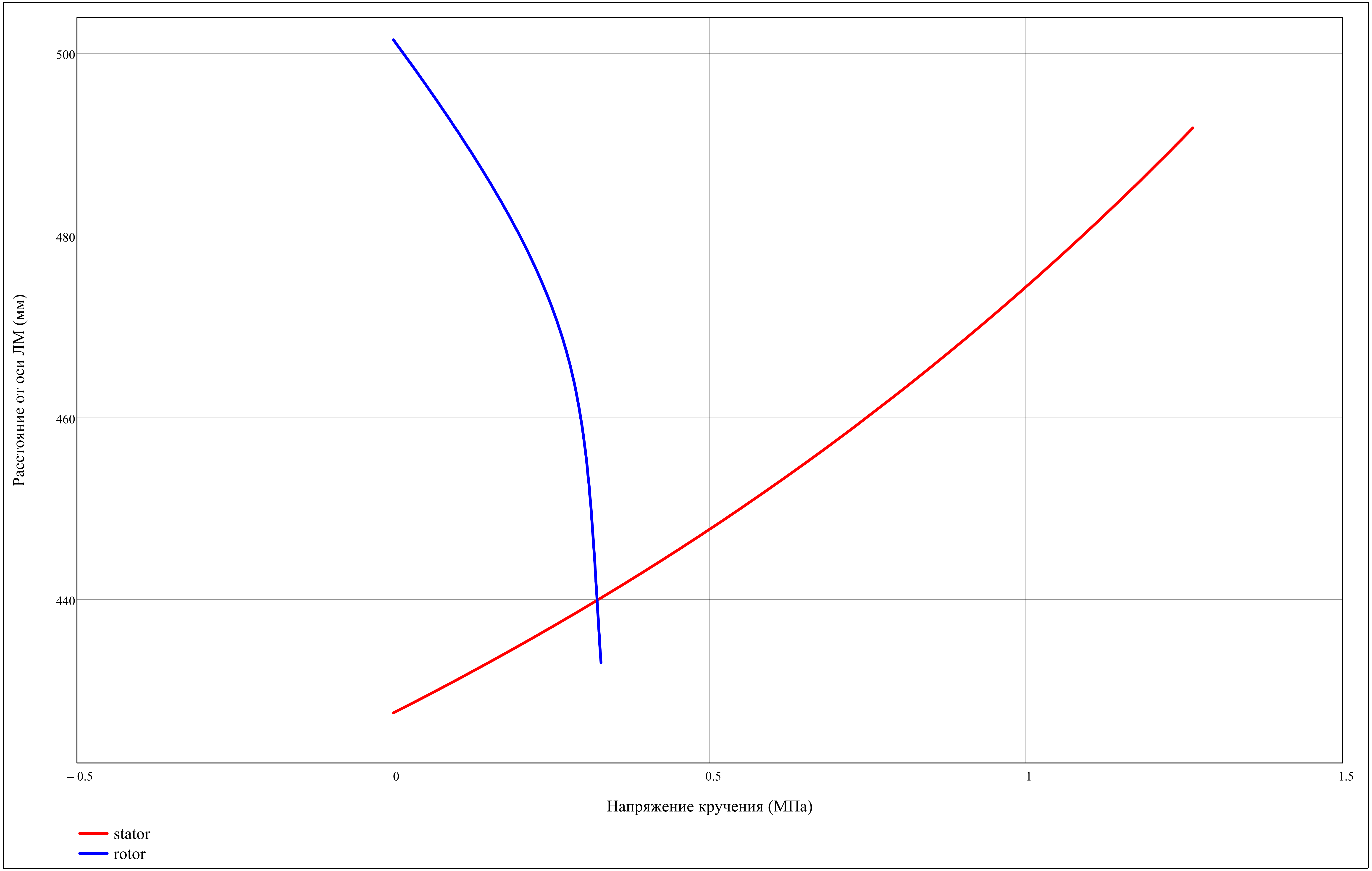

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
0
100
200
300
400
Растягивающее напряжение (МПа)
c.a1
c.a2
c.a3
c.u1
c.u2
c.u3

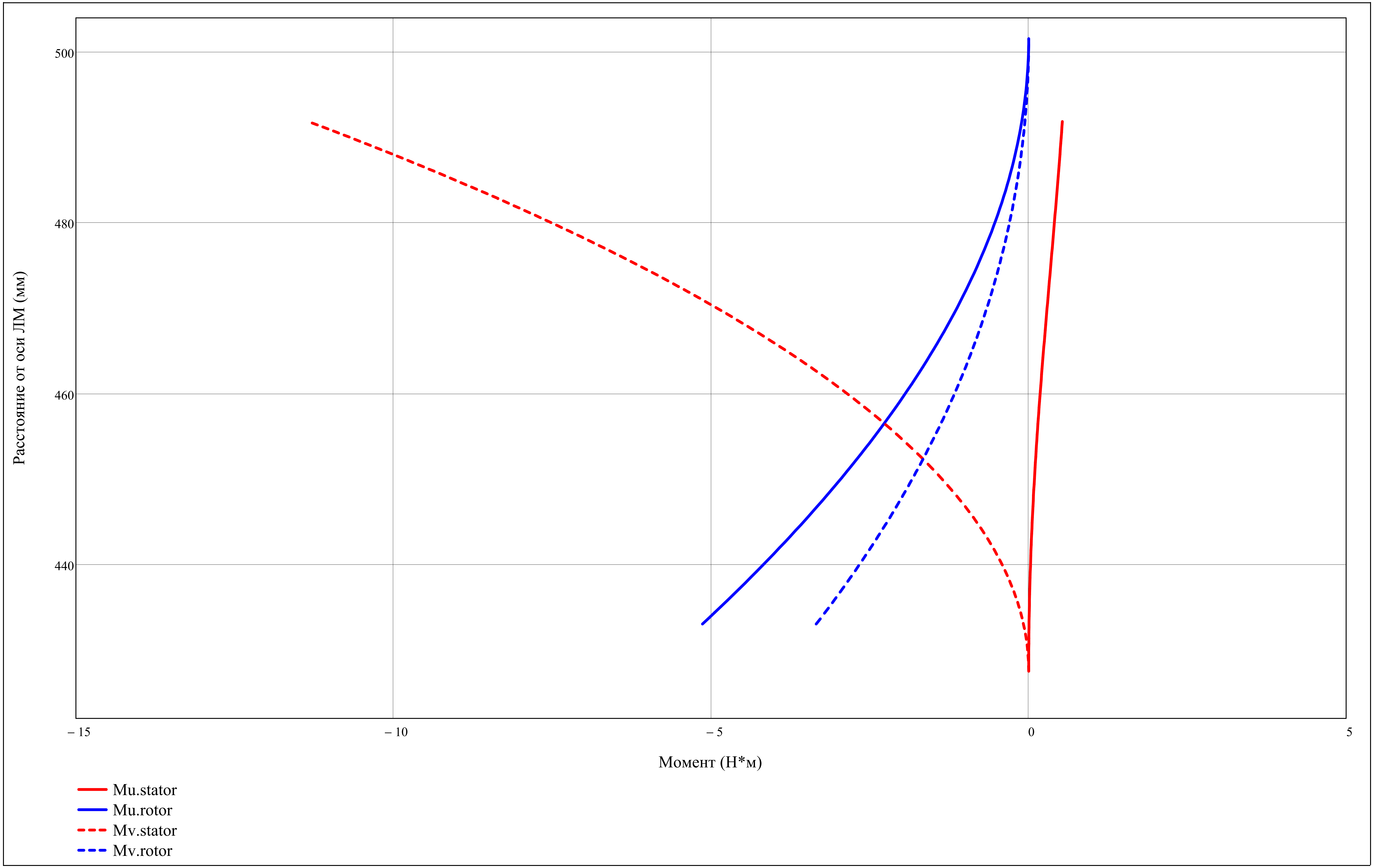

Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
– 6
– 4
– 2
0
2
4
Распределенная нагрузка (кН/м)
qx.stator
qx.rotor
qy.stator
qy.rotor

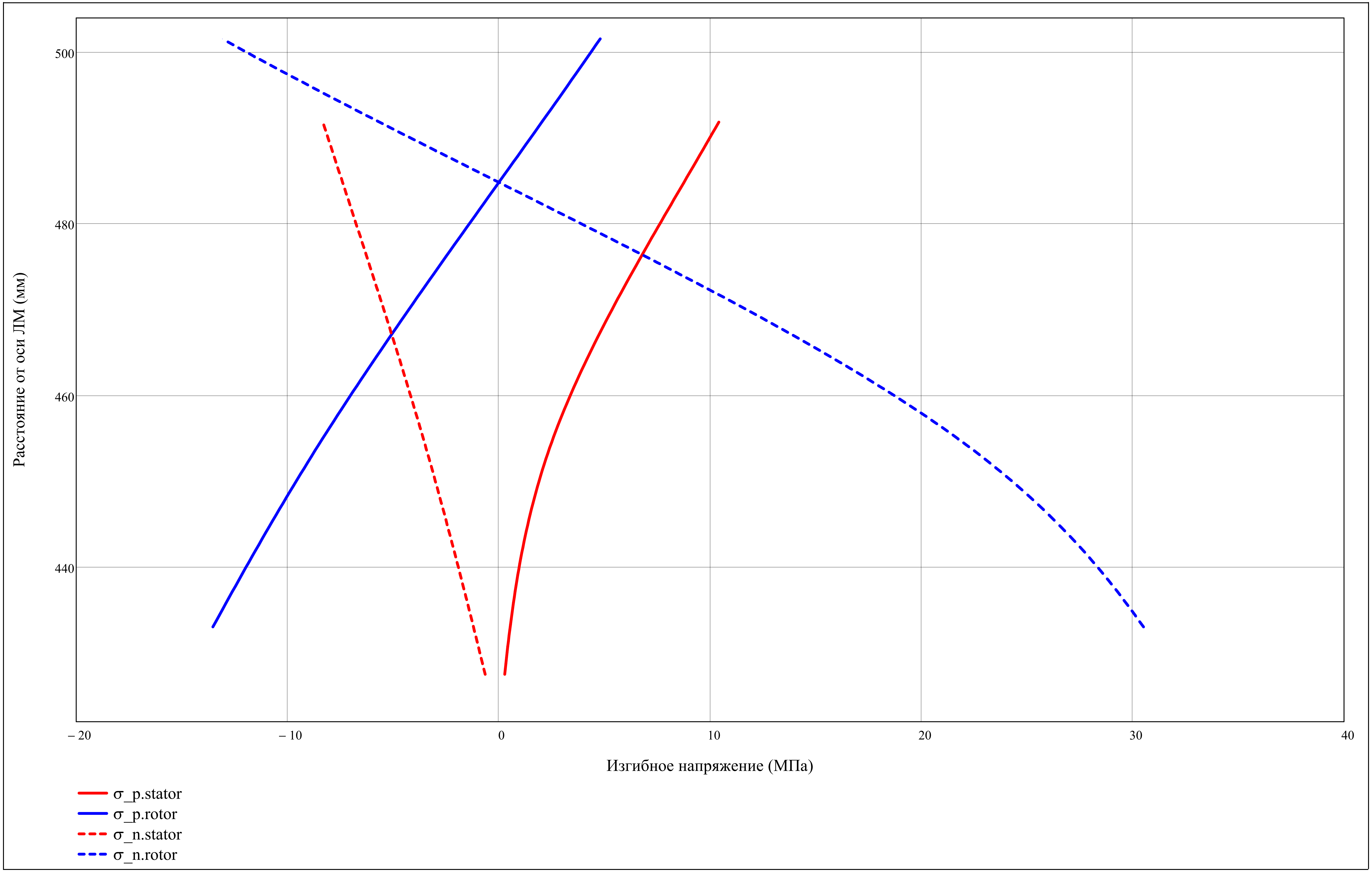


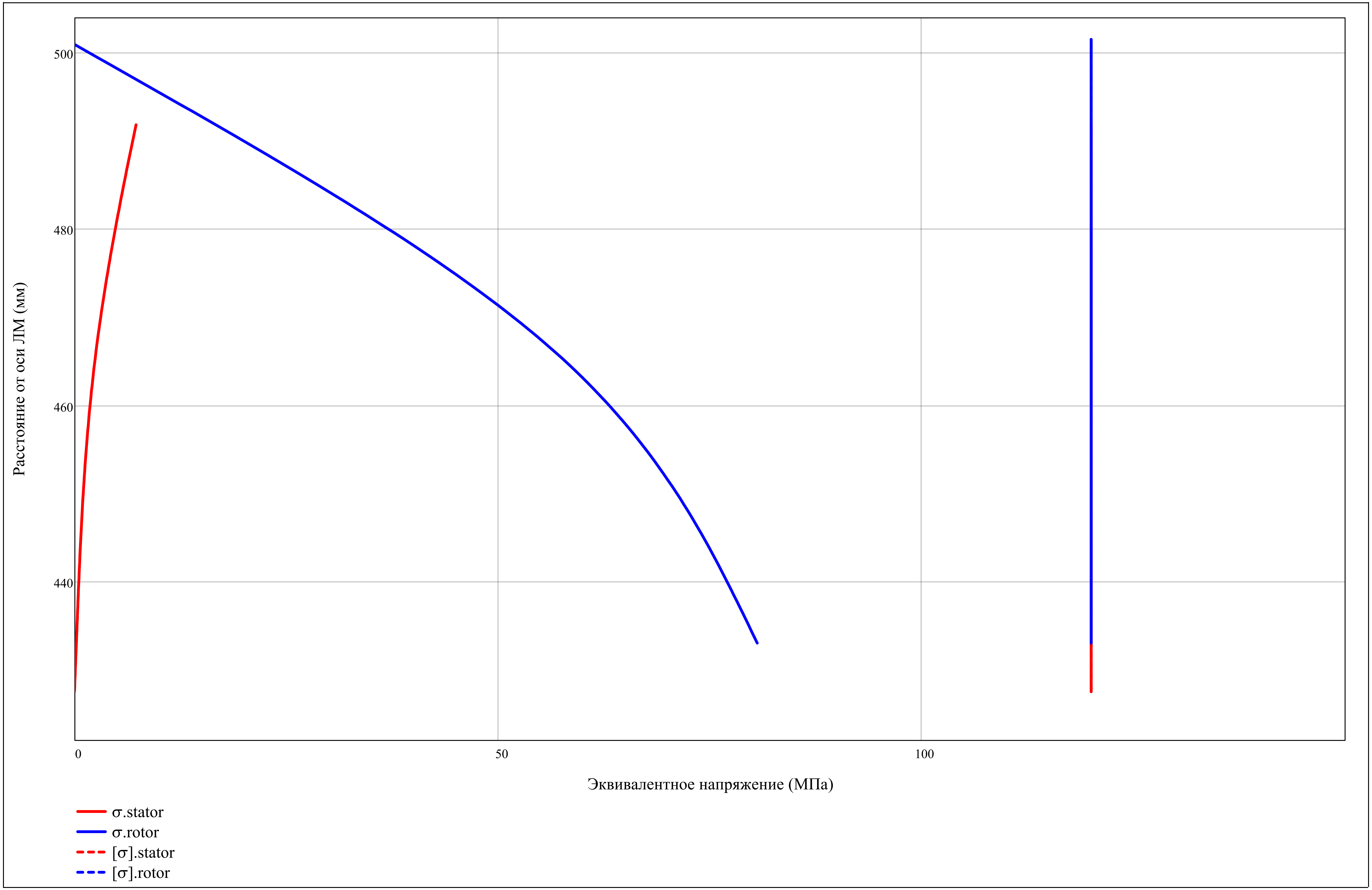
500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 10
– 5
0
5
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor


500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
0.5
1
1.5
2
Выносы Л РК (мм)
x
y


500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 0.5
0
0.5
1
1.5
Напряжение кручения (МПа)
stator
rotor


Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
– 15
– 10
– 5
0
5
Момент (Н*м)
Mu.stator
Mu.rotor
Mv.stator
Mv.rotor


500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 20
– 10
0
10
20
30
40
Изгибное напряжение (МПа)
σ_p.stator
σ_p.rotor
σ_n.stator
σ_n.rotor

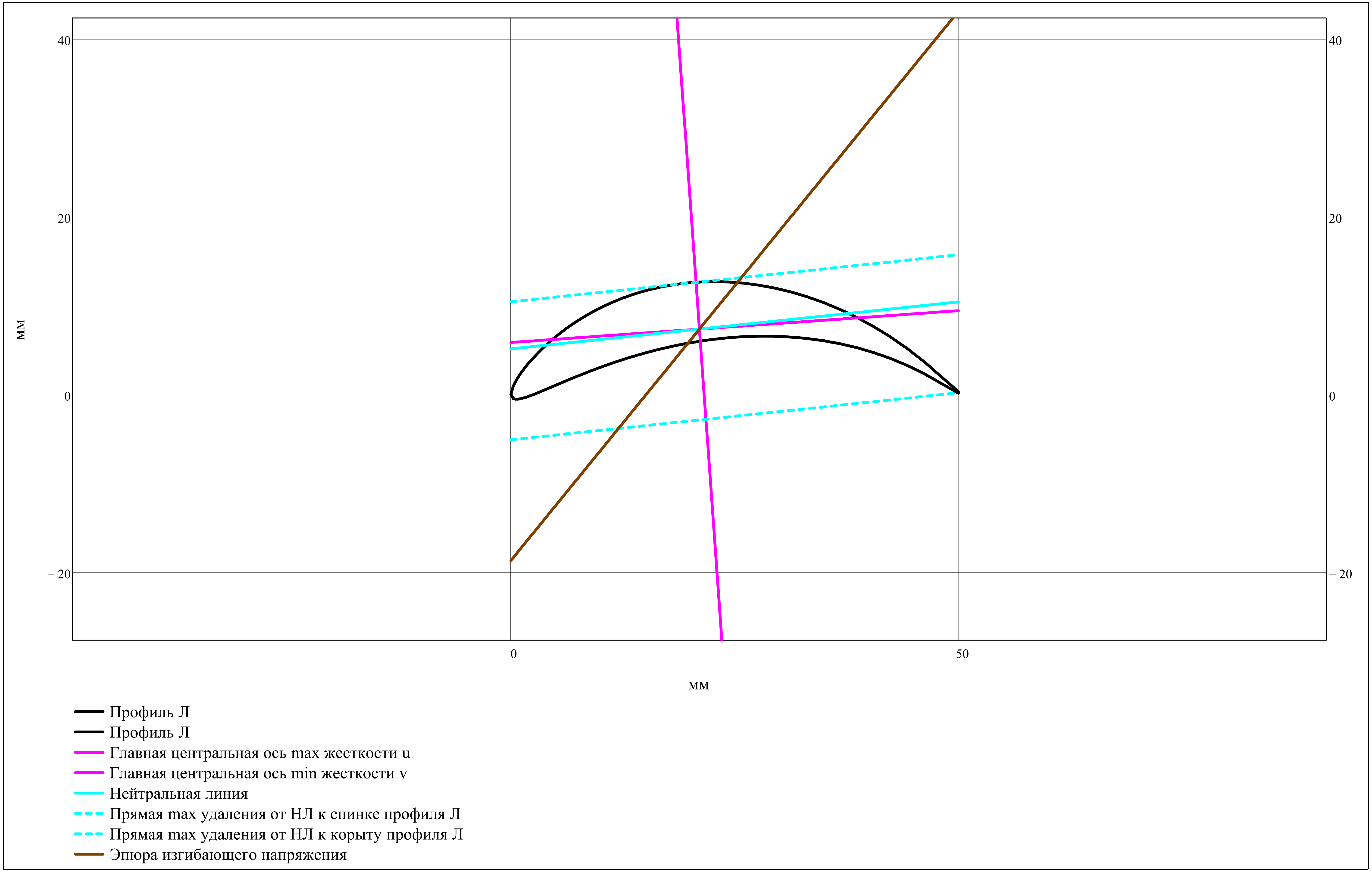

500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
50
100
Эквивалентное напряжение (МПа)
σ.stator
σ.rotor
[σ].stator
[σ].rotor

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

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} \text{ if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 5.299 \\ \hline 2 & -10.223 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} x0_{rotor_{j,r}} \\ y0_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} \text{ if blade = "rotor"} \\ \begin{pmatrix} x0_{stator_{j,r}} \\ y0_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 21.043 \\ \hline 2 & 7.333 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\text{chord} = \left| \begin{array}{l} \text{chord}_{rotor_{j,r}} \text{ if blade = "rotor"} \\ \text{chord}_{stator_{j,r}} \text{ if blade = "stator"} \end{array} \right. = 50.0 \cdot 10^{-3}$$


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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

	1	2
1	-1.00	5.30
2	28.01	-10.22
3	15.69	6.03
4	-26.66	-12.00

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2
1	-15.9	0.1
2	33.4	-0.1

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	0.2
2	80.6

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	751.571
2	1.490

▲ Результаты расчета на прочность Л

Вывод результатов расчета Л на прочность

▼ Выбор материала Д

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

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

Плотность материала Д (кг/м^3):

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

Предел длительной прочности Д (Па):

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

$material\_disk^T =$

	1	2	3	4
1	"ЭП742"	"ЭП742"	"ЭП742"	"ЭП742"

$\rho\_disk^T =$

	1	2	3	4
1	8320	8320	8320	8320

$\sigma\_disk\_long^T =$

	1	2	3	4
1	680	680	680	680

$\cdot 10^6$

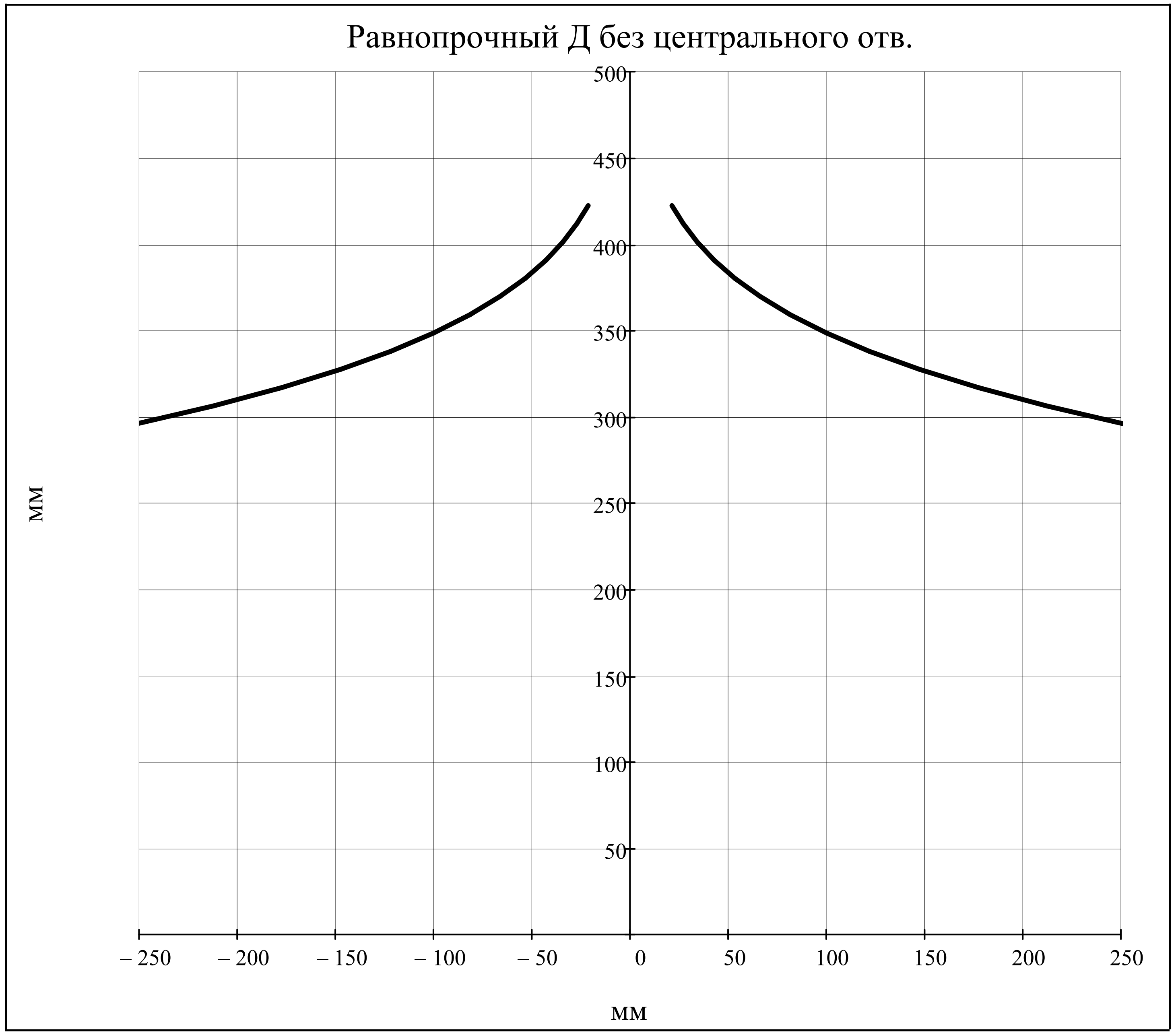
▲ Выбор материала Д

Рассматриваемая ступень: $$j := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow Z \\ j \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. = 4$$

▾ Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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



▴ Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

3

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

$R^T =$

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

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

$\bar{d}^T =$

	1	2	3	4
1	0.9194	0.9194	0.8730	

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

	1	2	3
1	0	0	1

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

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 196.80 \\ 511.29 \\ 231.75 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 194.59 \\ 253.24 \\ 231.37 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 282.51 \\ 325.09 \\ 324.12 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 81.41 \\ 29.69 \\ 86.70 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 234.20 \\ 240.32 \\ 240.32 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 43.53 \\ 128.83 \\ 45.55 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 51.72 \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 83.28 \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 196.62 \\ 483.45 \\ 231.73 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 196.19 \\ 232.28 \\ 231.73 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 308.77 \\ 285.12 \\ 348.14 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 86.17 \\ 28.72 \\ 89.95 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 251.56 \\ 258.65 \\ 260.00 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 39.45 \\ 125.44 \\ 41.73 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 57.46 \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 83.71 \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 196.61 \\ 458.40 \\ 231.72 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 196.60 \\ 212.23 \\ 231.46 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 333.95 \\ 248.53 \\ 371.50 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.30 \\ 27.58 \\ 92.70 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 268.92 \\ 276.98 \\ 279.68 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 36.07 \\ 121.36 \\ 38.54 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 62.72 \cdot ^{\circ}$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 82.82 \cdot ^{\circ}$$