Подключение библиотек

Основные уравнения, алгоритмы, зависимости и ф-и

Параметры расчета

Исходные данные

Коэф. запаса: $safety = 1.3$

Горючее: $Fuel = \text{"Керосин"}$

$turbine = \text{"ТВД"}$

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

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

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

	1
1	32.30
2	0.11
3	3.24

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Абс. скорость перед Т (м/с):

Абс. скорость после Т (м/с):

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

	1
1	100.0
2	180.0

[1, с.15] $80 \le c_{Т} \le 400 = 1$

Лопаточный КПД Т: $\eta_{Л} = 88\%$

$88\% \le \eta_{Л} \le 95\% = 1$

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

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

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

Исходные данные

Основне размеры Т

$z := ORIGIN..N_{г}$

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

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

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

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

Удельная работа Т (Дж/кг): $L^*_{T} := \dfrac{N_{T}}{mean(G_{г}, G_{т})} = 440.4 \cdot 10^{3}$ $L^*_{T} \le 550 \cdot 10^{3} = 1$

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

$$\begin{pmatrix} iteration \\ k_Г \\ P_Г \\ T_Г \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} iteration \leftarrow 0 \\ k_Г \leftarrow k_{ад}\left(Cp_{газ}\left(P^*_Г, T^*_Г, \alpha_{ox}, Fuel\right), R_{газ}\left(\alpha_{ox}, Fuel\right)\right) \\ \text{while } 1 > 0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} iteration \leftarrow iteration + 1 \\ Cp_Г \leftarrow \dfrac{k_Г}{k_Г - 1} \cdot R_{газ}\left(\alpha_{ox}, Fuel\right) \\ T_Г \leftarrow T^*_Г - \dfrac{c_Г^{\,2}}{2 \cdot Cp_Г} \\ P_Г \leftarrow P^*_Г \cdot \left(\dfrac{T_Г}{T^*_Г}\right)^{\frac{k_Г}{k_Г - 1}} \\ k'_Г \leftarrow k_{ад}\left(Cp_{газ}\left(P_Г, T_Г, \alpha_{ox}, Fuel\right), R_{газ}\left(\alpha_{ox}, Fuel\right)\right) \\ \text{if } \left|eps\left("rel", k_Г, k'_Г\right)\right| \le epsilon \\ \quad \left| \begin{array}{l} k_Г \leftarrow k'_Г \\ \text{break} \end{array} \right. \\ k_Г \leftarrow k'_Г \end{array} \right. \\ \left(iteration \;\; k_Г \;\; P_Г \;\; T_Г\right)^T \end{array} \right. =$$

	1
1	1.0
2	1.3
3	2705198.4
4	1769.2

Количество итераций: $iteration = 1$

Показатель адиабаты перед Т: $k_Г = 1.283$

Статическое давление перед Т (Па): $P_Г = 2705.2 \cdot 10^3$

Статическая температура перед Т (К): $T_Г = 1769.2$

Теплоемкость перед Т (Дж/кг/К): $Cp_Г := Cp_{газ}\left(P_Г, T_Г, \alpha_{ox}, Fuel\right) = 1309$

$$\begin{pmatrix} \text{iteration} \\ k_T \\ P_T \\ T_T \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{iteration} \leftarrow 0 \\ k_T \leftarrow k_Г \\ \text{while } 1 > 0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{iteration} \leftarrow \text{iteration} + 1 \\ k_{cp} \leftarrow \text{mean}(k_Г, k_T) \\ Cp \leftarrow \dfrac{k_{cp}}{k_{cp} - 1} \cdot R_{газ}(\alpha_{ox}, \text{Fuel}) \\ P_T \leftarrow P^*_Г \cdot \left(1 - \dfrac{H_T}{Cp \cdot T^*_Г}\right)^{\frac{k_{cp}}{k_{cp}-1}} \\ T_T \leftarrow T^*_Г - \dfrac{H_T \cdot \eta_Л}{Cp} \\ k'_T \leftarrow k_{ад}\left(Cp_{газ}(P_T, T_T, \alpha_{ox}, \text{Fuel}), R_{газ}(\alpha_{ox}, \text{Fuel})\right) \\ \text{if } \left|\text{eps}(\text{"rel"}, k_T, k'_T)\right| \le \text{epsilon} \\ \quad \left| \begin{array}{l} k_T \leftarrow k'_T \\ \text{break} \end{array} \right. \\ k_T \leftarrow k'_T \end{array} \right. \\ (\text{iteration} \;\; k_T \;\; P_T \;\; T_T)^T \end{array} \right.$$

	1
1	1
2	1.293
3	866477.23
4	1424.088

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

Показатель адиабаты после Т: $k_T = 1.293$

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

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

Теплоемкость после Т (Дж/кг/К): $Cp_T = Cp_{газ}(P_T, T_T, \alpha_{ox}, \text{Fuel}) = 1271.6$

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

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

Степень понижения давления: $\pi_T = \frac{P*_Г}{P_Т} = 3.15$

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

$$\begin{pmatrix} v_Г \\ v_Т \end{pmatrix} = R_{газ}(\alpha_{ox}, Fuel) \cdot \begin{pmatrix} \frac{T_Г}{P_Г} \\ \frac{T_Т}{P_Т} \end{pmatrix} =$$

	1
1	0.189
2	0.474

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

$$\begin{pmatrix} F_Г \\ F_Т \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{G_Г \cdot v_Г}{c_Г} \\ \frac{G_Т \cdot v_Т}{c_Т} \end{pmatrix} =$$

	1
1	60741
2	93341

$\cdot 10^{-6}$

Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

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

Определение количества ступеней Т

$$\begin{pmatrix} Z_{recomend} \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} c_{cp} = \text{mean}(c_Г, c_Т) \\ \alpha_{возв} = 0.025 \\ \text{while } 1 > 0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} Z = \text{round}\left[\dfrac{2 \cdot H_Т \cdot \dfrac{(1+\alpha_{возв})}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2} - 1}{\dfrac{u_Т^{\,2}}{(\mu_c \cdot c_{cp})^2 \cdot y_0^{\,2}} - 1}\right] \\ \text{break if } \left| \text{eps}\left[\text{"rel"}, \alpha_{возв}, \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_Т^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_л)\right] \right| < \text{epsilon} \\ \alpha_{возв} = \dfrac{Z-1}{2 \cdot Z} \cdot \left(\pi_Т^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot (1 - \eta_л) \\ \text{if } \alpha_{возв} = 0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} Z \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \text{break} \end{array} \right. \end{array} \right. \\ \begin{pmatrix} Z \\ \alpha_{возв} \end{pmatrix} \end{array} \right. =$$

	1
1	1.000
2	0.000

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

Количество ступеней: $Z = \left| \begin{array}{l} 1 \text{ if turbine} = \text{"ТВД"} \\ 4 \text{ if turbine} = \text{"ТНД"} \end{array} \right. = 1$

Дискретизация ступеней: $i = 1 .. Z$

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

Определение количества ступеней Т

Выбранный материал Л:

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

Плотность материала Л (кг/м^3):

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

Предел длительной прочности Л РК (Па):

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

Коэф. формы: $k_n = 6.8$

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

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

$material\_blade^T =$

	1
1	"ВКНА-1В"

$\rho\_blade^T =$

	1
1	7938

$\sigma\_blade\_long^T =$

	1
1	205

$\cdot 10^6$

Частота вращения Т

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

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

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

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

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

Ср. диаметр перед Т (м):

Ср. диаметр после Т (м):

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

Длина Л первой ступени Т (м):

Длина Л последней ступени Т (м):

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

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

Диаметр периферии после Т (м):

Диаметр корня после Т (м):

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

Частота вращения Т

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

$N_{ст}^T =$

	1
1	14.89

$\cdot 10^6$

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

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

Определение проточной части ОТ

Линейное распределение кольцевых площадей по сечениям:

$$F := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..2Z+1 \\ \quad F_i = \frac{F_т - F_г}{st(Z,3) - 1} \cdot i + \left(F_г - \frac{F_т - F_г}{st(Z,3) - 1} \right) \\ \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } a \in 2..3 \\ \quad\quad F_{st(i,a)} = F_{st(i,a-1)} \text{ if } ЗППЧ_{i,a-1} = \text{"const"} \\ F \end{array} \right.$$

$F^T =$

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

$\cdot 10^{-6}$

$$D = \left|\begin{array}{l}
\text{for } i \in 2Z+1 \\
\quad \text{for } r \in 1..N_r \\
\quad\quad D_{i,r} = \left|\begin{array}{ll} D_{т.кор} & \text{if } r = 1 \\ D_{т.ср} & \text{if } r = av(N_r) \\ D_{т.пер} & \text{if } r = N_r \end{array}\right. \\
\text{for } i \in Z..1 \\
\quad \text{for } a \in 2..1 \\
\quad\quad \text{for } r \in 1..N_r \\
\quad\quad\quad D_{st(i,a),r} = \left|\begin{array}{l}
\text{if } ЗППЧ_{i,a} = \text{"const"} \\
\quad \left|\begin{array}{ll}
D_{st(i,a+1),av(N_r)} - \dfrac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}} & \text{if } r = 1 \\
D_{st(i,a+1),av(N_r)} & \text{if } r = av(N_r) \\
D_{st(i,a+1),av(N_r)} + \dfrac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}} & \text{if } r = N_r
\end{array}\right. \\
\text{if } ЗППЧ_{i,a} = \text{"кор"} \\
\quad \left|\begin{array}{ll}
D_{st(i,a+1),1} & \text{if } r = 1 \\
\dfrac{1}{2}\cdot\left[D_{st(i,a+1),1} + \sqrt{\left(D_{st(i,a+1),1}\right)^2 + \dfrac{4\cdot F_{st(i,a)}}{\pi}}\right] & \text{if } r = av(N_r) \\
\sqrt{\left(D_{st(i,a+1),1}\right)^2 + \dfrac{4\cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} & \text{if } r = N_r
\end{array}\right. \\
\text{if } ЗППЧ_{i,a} = \text{"ср"} \\
\quad \left|\begin{array}{ll}
D_{st(i,a+1),av(N_r)} - \dfrac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}} & \text{if } r = 1 \\
D_{st(i,a+1),av(N_r)} & \text{if } r = av(N_r) \\
D_{st(i,a+1),av(N_r)} + \dfrac{F_{st(i,a)}}{\pi \cdot D_{st(i,a+1),av(N_r)}} & \text{if } r = N_r
\end{array}\right. \\
\text{if } ЗППЧ_{i,a} = \text{"пер"} \\
\quad \left|\begin{array}{ll}
\sqrt{\left(D_{st(i,a+1),N_r}\right)^2 - \dfrac{4\cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} & \text{if } r = 1 \\
\dfrac{1}{2}\cdot\left[\sqrt{\left(D_{st(i,a+1),N_r}\right)^2 - \dfrac{4\cdot F_{st(i,a)}}{\pi}} + D_{st(i,a+1),N_r}\right] & \text{if } r = av(N_r) \\
D \quad\quad \text{if } r = N
\end{array}\right.
\end{array}\right.
\end{array}\right.$$

$D^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

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

$R^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

$$\overline{d} = \left|\begin{array}{l}
\text{for } i \in 1..Z \\
\quad \text{for } a \in 1..3 \\
\quad\quad \overline{d}_{st(i,a)} = \dfrac{D_{st(i,a),1}}{D_{st(i,a),N_r}} \\
\overline{d}
\end{array}\right.$$

$\overline{d}^T =$

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

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

	1	2	3
1	0	0	1

$$h = \left|\begin{array}{l}
\text{for } i \in 1..2Z+1 \\
\quad h_i = \dfrac{F_i}{\pi \cdot D_{i,av(N_r)}} \\
h
\end{array}\right.$$

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

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

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

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

$$D$$

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

$u^T =$

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

$F^T =$

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

$\cdot 10^{-6}$

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

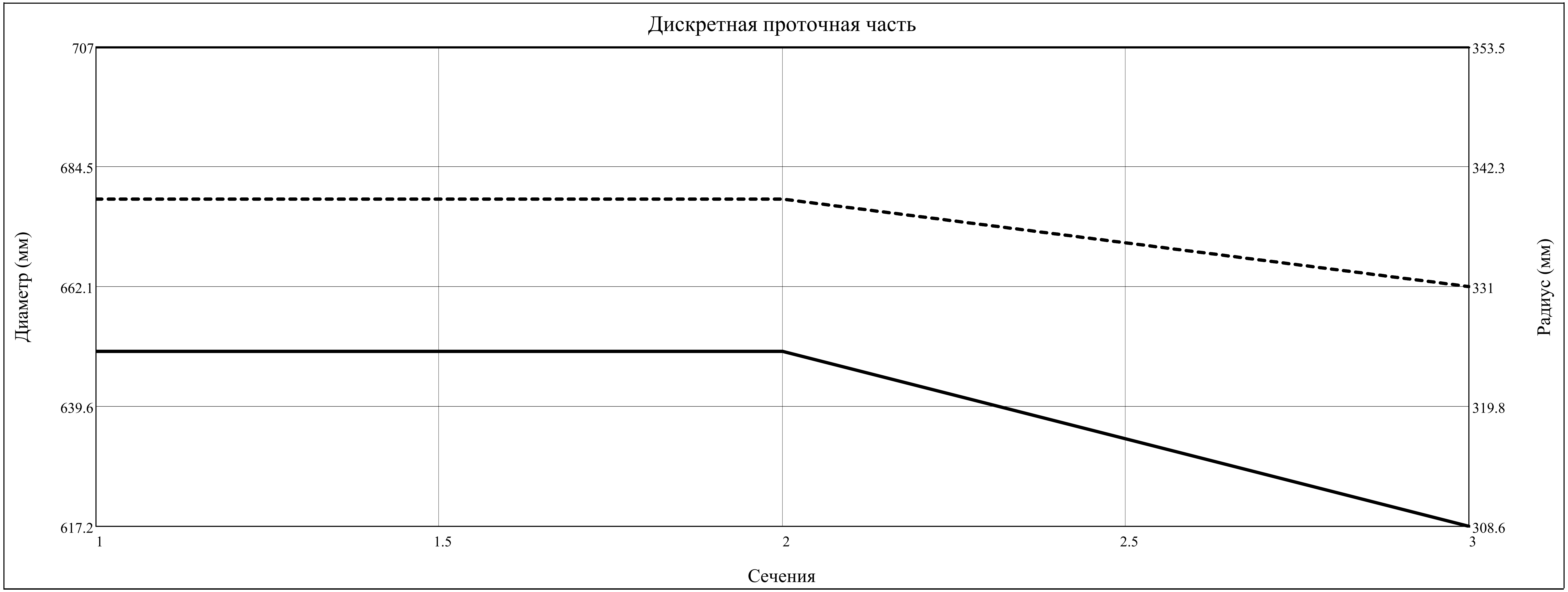
$\overline{d}^T =$

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

$D^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$



$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

Осевая ширина Л СА и РК [1, с.183]:

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

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

	1
1	40.9
2	30.1

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\Delta_r^{T} =$

	1	2	3
1	0.707	0.707	0.707

$\cdot 10^{-3}$

$\Delta_a^{T} =$

	1
1	10.234

$\cdot 10^{-3}$

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

	1

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

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

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

$\cdot °$

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 20 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 25 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -12 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -15 \cdot ° =$

	1	2
1	1	0

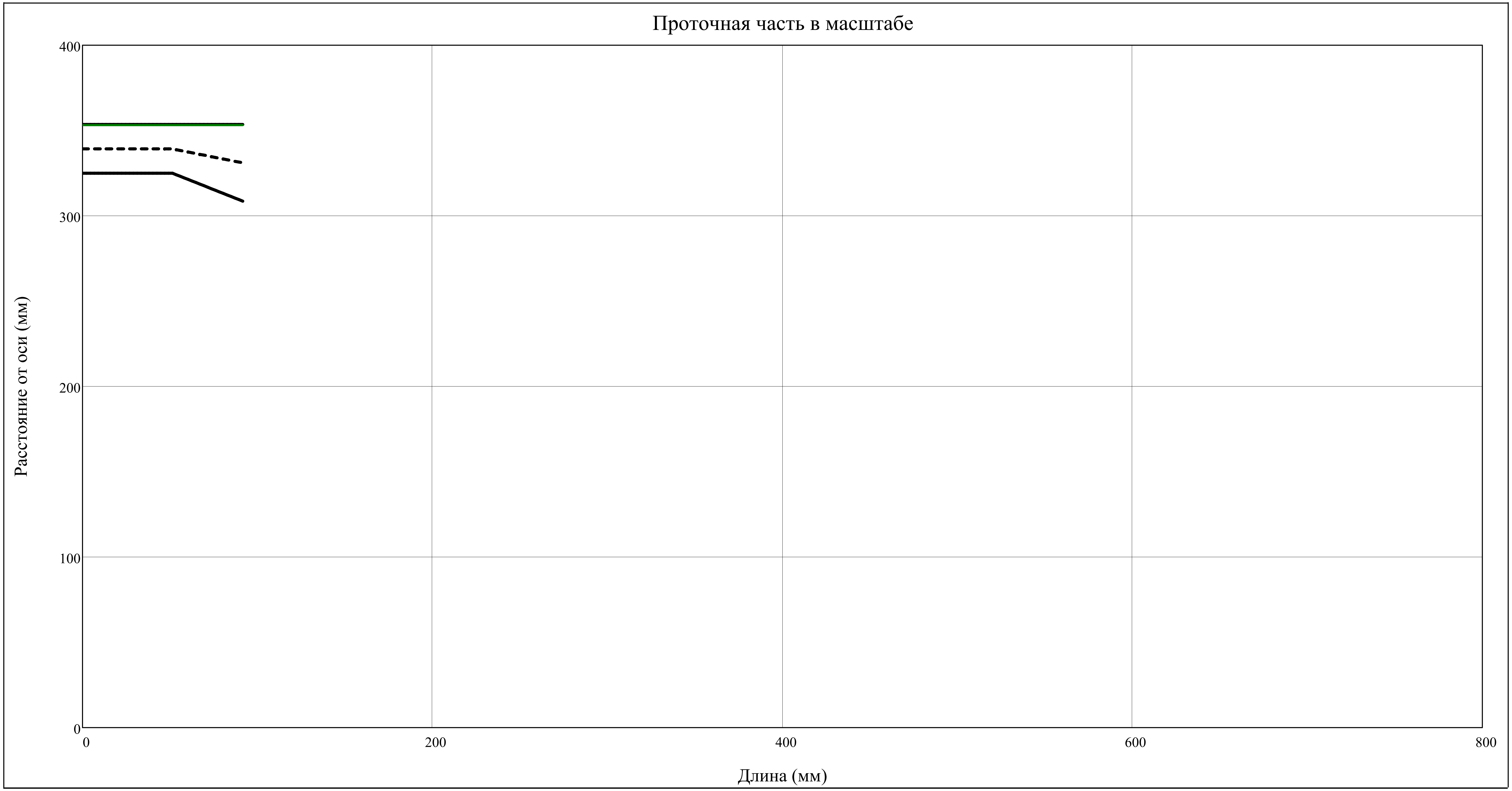
$$\begin{pmatrix} x_{ПЧ} \\ y_{ПЧпер} \\ y_{ПЧср} \\ y_{ПЧкор} \\ y_{Лпер} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} c = 1 \\ x_{ПЧ_c} = 0 \\ y_{ПЧпер_c} = D_{st(c,1),N_r} \\ y_{Лпер_c} = y_{ПЧпер_c} - \Delta_{r_c} \\ y_{ПЧср_c} = D_{st(c,1),av(N_r)} \\ y_{ПЧкор_c} = D_{st(c,1),1} \\ \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \left| \begin{array}{l} c = c+1 \\ x_{ПЧ_c} = x_{ПЧ_{c-1}} + 0.5\cdot\Delta_{a_i} + B_{CA_i} + 0.5\cdot\Delta_{a_i} \\ \begin{pmatrix} y_{ПЧпер_c} \\ y_{ПЧср_c} \\ y_{ПЧкор_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{st(i,2),N_r} \\ D_{st(i,2),av(N_r)} \\ D_{st(i,2),1} \end{pmatrix} \\ y_{Лпер_c} = y_{ПЧпер_c} - \Delta_{r_i} \\ c = c+1 \\ x_{ПЧ_c} = x_{ПЧ_{c-1}} + 0.5\cdot\Delta_{a_i} + B_{PK_i} + 0.5\cdot\Delta_{a_i} \\ \begin{pmatrix} y_{ПЧпер_c} \\ y_{ПЧср_c} \\ y_{ПЧкор_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{st(i+1,1),N_r} \\ D_{st(i+1,1),av(N_r)} \\ D_{st(i+1,1),1} \end{pmatrix} \\ y_{Лпер_c} = y_{ПЧпер_c} - \Delta_{r_i} \end{array} \right. \\ \begin{pmatrix} x_{ПЧ} \\ y_{ПЧпер} \\ y_{ПЧср} \\ y_{ПЧкор} \\ y_{Лпер} \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

$$Length = \sum_{i=1}^{Z} B_{CA_i} + \sum_{i=1}^{Z} \Delta_{a_i} + \sum_{i=1}^{Z} B_{PK_i} = 81.3\cdot10^{-3}$$

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

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

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



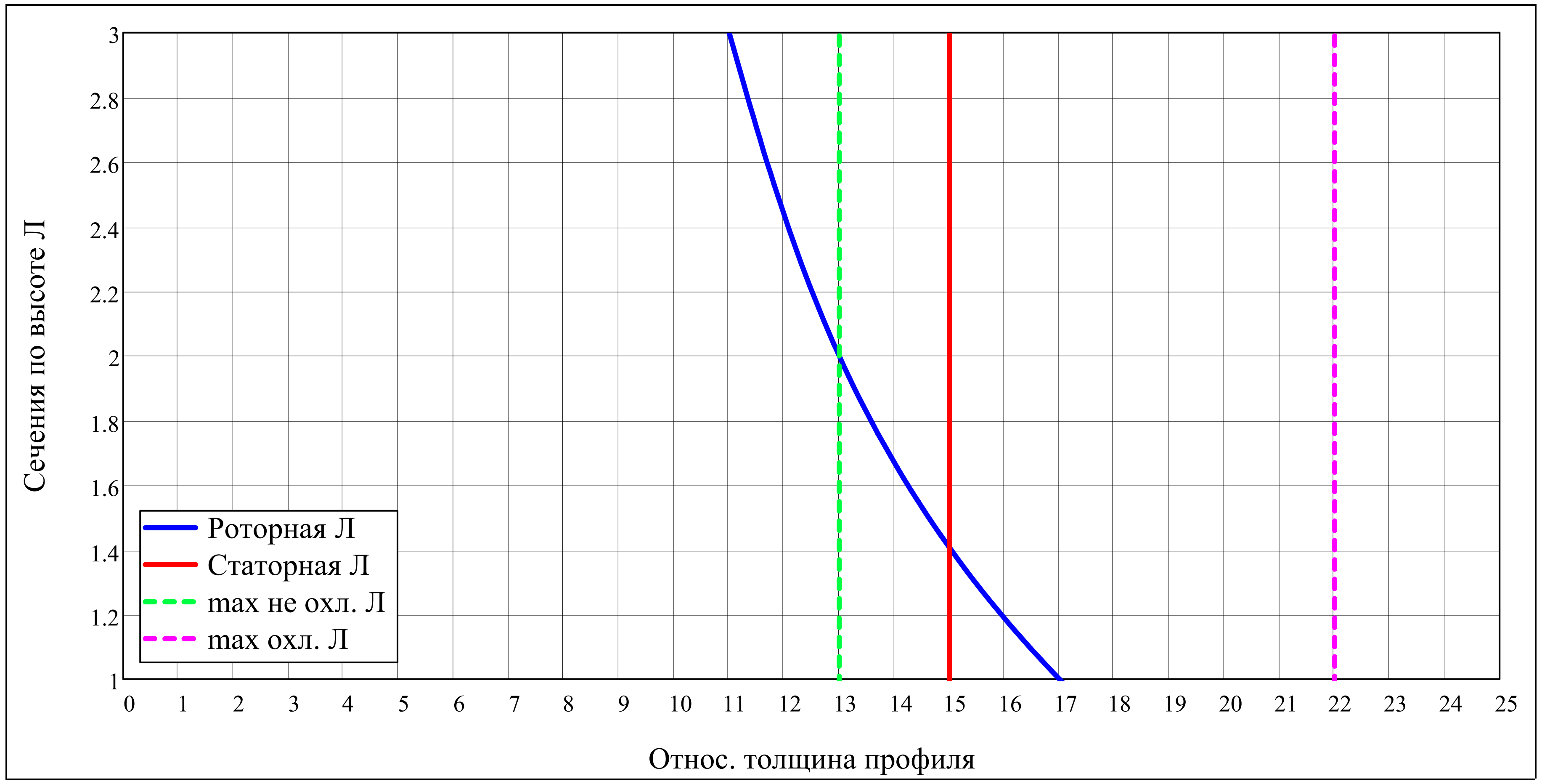
Определение проточной части ОТ

Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

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

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



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

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

	1
1	15.00
2	15.00
3	15.00

$\cdot\%$

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

	1
1	17.00
2	13.00
3	11.00

$\cdot\%$

$$\begin{pmatrix} \overline{r}\_inlet_{rotor} & \overline{r}\_inlet_{stator} \\ \overline{r}\_outlet_{rotor} & \overline{r}\_outlet_{stator} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } r \in 1..N_r \\ \qquad \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \overline{r}\_inlet_{stator_{i,r}} \\ \overline{r}\_outlet_{stator_{i,r}} \end{pmatrix} = \overline{c}_{stator.}(r) \cdot \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \overline{r}\_inlet_{rotor_{i,r}} \\ \overline{r}\_outlet_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \overline{c}_{rotor.}(r) \cdot \begin{pmatrix} 0.35 \\ 0.15 \end{pmatrix} \end{array} \right. \\ \begin{pmatrix} \overline{r}\_inlet_{rotor} & \overline{r}\_inlet_{stator} \\ \overline{r}\_outlet_{rotor} & \overline{r}\_outlet_{stator} \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

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

	1
1	6.000
2	6.000
3	6.000

$\cdot\%$

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

	1
1	5.950
2	4.550
3	3.850

$\cdot\%$

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

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

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

	1
1	2.550
2	1.950
3	1.650

$\cdot\%$

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

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

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

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 $1 > 0$

$$iteration_{ст_i} = iteration_{ст_i} + 1$$

$$\mathrm{trace}\left(\mathrm{concat}\left(\text{"   iteration.ст = "}, \mathrm{num2str}\left(\mathrm{iteration}_{ст_i}\right)\right)\right)$$

$$H_{ст_i} = N_{ст_i} \cdot \begin{cases} \dfrac{1}{G_{st(i,1)} \cdot 0.9} & \text{if } \left(\mathrm{iteration}_{ст_i} = 1\right) \\ \dfrac{1}{\mathrm{mean}\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right) \cdot \eta_{мощь_i}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_{L_{i,r}} = R_{L.cp_i}$$

$$c_{ад_{st(i,1),r}} = \sqrt{2 \cdot H_{ст_i}}$$

$$H_{stator_i} = H_{ст_i} \cdot \left(1 - R_{L_{i,r}}\right)$$

$$c_{ад_{st(i,2),r}} = \sqrt{2 \cdot H_{stator_i}}$$

$$\overline{\upsilon}_{stator_i} = 1$$

$$\mathrm{iteration}_{CA_i} = 0$$

while $1 > 0$

$$\mathrm{iteration}_{CA_i} = \mathrm{iteration}_{CA_i} + 1$$

$$\mathrm{trace}\left(\mathrm{concat}\left(\text{"   iteration.CA = "}, \mathrm{num2str}\left(\mathrm{iteration}_{CA_i}\right)\right)\right)$$

$$c_{st(i,2),r} = \overline{\upsilon}_{stator_i} \cdot c_{ад_{st(i,2),r}}$$

$$\theta_{CA_i} = \theta_{глубина}\left(T^*{}_{st(i,1),r}, T^*{}_{cooling}, T_{Л.доп}\right)$$

$$g_{охлCA_i} = \begin{cases} \dfrac{0.035 \cdot \theta_{CA_i}}{1 - \theta_{CA_i}} & \text{if } \dfrac{0.035 \cdot \theta_{CA_i}}{1 - \theta_{CA_i}} \ge 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$G_{st(i,2)} = G_{st(i,1)} \cdot \left(1 + g_{охлCA_i}\right)$$

$$\alpha_{ox_{st(i,2)}} = \alpha_{ox_{st(i,1)}} + g_{охлCA_i}$$

$$\alpha_{окCA_i} = \mathrm{mean}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}\right)$$

$$k_{st(i,2),r} = k_{st(i,1),r}$$

while $1 > 0$

$$k_{CA_i} = \mathrm{mean}\left(k_{st(i,1),r}, k_{st(i,2),r}\right)$$

$$T_{ад_{st(i,2),r}} = T^*{}_{st(i,1),r} - \frac{H_{stator_i}}{\dfrac{k_{CA_i}}{k_{CA_i} - 1} \cdot R_{газ.cp}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, \alpha_{ox_{st(i,2)}}, \mathrm{Fuel}\right)}$$

k_{CA_i}

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

$$T_{st(i,2),r} = T^*_{st(i,1),r} - \frac{H_{stator_i}\cdot\left(\overline{\upsilon}_{stator_i}\right)^2}{\frac{k_{CA_i}}{k_{CA_i}-1}\cdot R_{газ.ср}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}},\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right)}$$

$$Cp_2 = Cp_{газ}\left(P_{st(i,2),r},T_{st(i,2),r},\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right)$$

$$k' = k_{ад}\left(Cp_2,R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right)\right)$$

if $\left|eps("rel",k_{st(i,2),r},k')\right| \le epsilon$

$k_{st(i,2),r} = k'$

break

$k_{st(i,2),r} = k'$

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

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

$$\begin{pmatrix} T^*см_{st(i,2),r} \\ P^*см_{st(i,2),r}\end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{смешение}\left[P^*ад_{st(i,2),r},T^*ад_{st(i,2),r},G_{st(i,1)},\alpha_{ox_{st(i,1)}},P^*_{cooling},T^*_{cooling},\left(g_{охлCA_i}\cdot G_{st(i,1)}\right),\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right] \\ P_{смешение}\left[P^*ад_{st(i,2),r},G_{st(i,1)},P^*_{cooling},\left(g_{охлCA_i}\cdot G_{st(i,1)}\right)\right]\end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T^*_{st(i,2),r} \\ P^*_{st(i,2),r}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^*см_{st(i,2),r} \\ P^*см_{st(i,2),r}\end{pmatrix}$$

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

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

$$k_{st(i,2),r} = k_{ад}\left(Cp_{газ}\left(P_{st(i,2),r},T_{st(i,2),r},\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right),R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right)\right)$$

$$v_{st(i,2),r} = \frac{R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}},Fuel\right)\cdot T_{st(i,2),r}}{P_{st(i,2),r}}$$

$$\alpha_{st(i,2),r} = asin\left(\frac{G_{st(i,2)}\cdot v_{st(i,2),r}}{}\right.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\left(\pi \cdot \text{mean}\left(D_{st(i,1),r}, D_{st(i,2),r}\right)\right)$$

$$\operatorname{ceil}\left(\frac{\pi\cdot \mathrm{mean}(D_{st(i,1),r},D_{st(i,2),r})}{\overline{t}_{\text{оптСА}_i}\cdot \mathrm{chord}_{stator_{i,r}}}\right)+1 \quad \text{otherwise}$$

for $r \in 1..N_r$

$$t_{stator_{i,r}} = \frac{\pi\cdot \mathrm{mean}\left(D_{st(i,1),r},D_{st(i,2),r}\right)}{Z_{stator_i}}$$

$$\xi_{\text{трСА}_i} = \xi_{\text{трение}}\left(\alpha_{st(i,1),r},\alpha_{st(i,2),r}\right)$$

$$\xi_{\text{крСА}_i} = \xi_{\text{кромка}}\left(\overline{r}\_outlet_{stator_{i,r}}\cdot \mathrm{chord}_{stator_{i,r}},t_{stator_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r}\right)$$

$$\xi_{\text{ReСА}_i} = \xi_{\text{Re}}\left(\frac{c_{st(i,2),r}\cdot \mathrm{chord}_{stator_{i,r}}}{\mu_{\text{газ}}\left(T_{st(i,2),r},\alpha_{ox_{st(i,2)}}\right)\cdot v_{st(i,2),r}}\right)$$

$$\xi_{\lambda\text{СА}_i} = \xi_{\text{сжимаемость}}\left(\text{"СА"},\lambda_{c_{st(i,2),r}}\right)$$

$$\xi_{\text{прСА}_i} = \xi_{\text{трСА}_i}+\xi_{\text{крСА}_i}+\xi_{\text{ReСА}_i}+\xi_{\lambda\text{СА}_i}$$

$$\xi_{\text{втСА}_i} = \xi_{\text{вторичные}}\left(\xi_{\text{трСА}_i},t_{stator_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r},h_{st(i,2)}\right)$$

$$\xi_{\text{тдСА}_i} = \frac{\xi_{\text{ТД}}\left(\text{"СА"},T^*{\text{см}}_{st(i,2),r},T^*{\text{ад}}_{st(i,2),r},P_{st(i,2),r},Cp_{\text{газ}}\left(P_{st(i,2),r},T_{st(i,2),r},\alpha_{ox_{st(i,2)}},\text{Fuel}\right),R_{\text{газ}}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}},\text{Fuel}\right),G_{st(i,2)},F_{st(i,2)},\alpha_{st(i,2),r},0\right)}{H_{stator_i}}$$

$$\xi_{\text{смСА}_i} = \xi_{\text{смешение}}\left(\text{"СА"},g_{\text{охлСА}_i}\right)$$

if $\left|\mathrm{eps}\left(\text{"rel"},\sqrt{1-\xi_{\text{смСА}_i}-\xi_{\text{тдСА}_i}-\xi_{\text{втСА}_i}-\xi_{\text{прСА}_i}},\overline{\upsilon}_{stator_i}\right)\right| \le \text{epsilon}$

$$\overline{\upsilon}_{stator_i} = \sqrt{1-\xi_{\text{смСА}_i}-\xi_{\text{тдСА}_i}-\xi_{\text{втСА}_i}-\xi_{\text{прСА}_i}}$$

break

$$\overline{\upsilon}_{stator_i} = \sqrt{1-\xi_{\text{смСА}_i}-\xi_{\text{тдСА}_i}-\xi_{\text{втСА}_i}-\xi_{\text{прСА}_i}}$$

$$H_{rotor_i} = H_{\text{ст}_i}\cdot R_{L_{i,av(N_r)}}\cdot\frac{T_{st(i,2),r}}{T_{\text{ад}_{st(i,2),r}}}$$

$$w_{\text{ад}_{st(i,3),r}} = \sqrt{\left(w_{st(i,2),r}\right)^2+2\cdot H_{rotor_i}+\left(u_{st(i,3),r}\right)^2-\left(u_{st(i,2),r}\right)^2}$$

$$\overline{\upsilon}_{rotor_i} = 1$$

$$\text{iteration}_{\text{РК}_i} = 0$$

while $1 > 0$

$$\text{iteration}_{\text{РК}_i} = \text{iteration}_{\text{РК}_i}+1$$

trace(concat("   iteration.РК = " , num2str($\text{iteration}_{\text{РК}_i}$)))

$$w_{st(i,3),r} = \overline{\upsilon}_{rotor_i}\cdot w_{\text{ад}_{st(i,3),r}}$$

$$\theta_{PK_i} = \theta_{глубина}\left(T^*w_{st(i,2),r}, T^*_{cooling}, T_{Л.доп}\right)$$

$$g_{охлPK_i} = \begin{cases} \dfrac{0.035\cdot\theta_{PK_i}}{1-\theta_{PK_i}} & \text{if } \dfrac{0.035\cdot\theta_{PK_i}}{1-\theta_{PK_i}} \ge 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$G_{st(i,3)} = G_{st(i,2)}\cdot\left(1 + g_{охлPK_i}\right)$$

$$\alpha_{ox_{st(i,3)}} = \alpha_{ox_{st(i,2)}} + g_{охлPK_i}$$

$$k_{st(i,3),r} = k_{st(i,2),r}$$

while $1 > 0$

$$k_{PK_i} = \text{mean}\left(k_{st(i,2),r}, k_{st(i,3),r}\right)$$

$$T_{ад_{st(i,3),r}} = T_{st(i,2),r} - \frac{H_{rotor_i}}{\dfrac{k_{PK_i}}{k_{PK_i}-1}\cdot R_{газ.cp}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)}$$

$$P_{st(i,3),r} = P_{st(i,2),r}\cdot\left(\frac{T_{ад_{st(i,3),r}}}{T_{st(i,2),r}}\right)^{\frac{k_{PK_i}}{k_{PK_i}-1}}$$

$$T_{st(i,3),r} = T_{st(i,2),r} - \frac{\left(w_{st(i,3),r}\right)^2 - \left(w_{st(i,2),r}\right)^2 - \left(u_{st(i,3),r}\right)^2 + \left(u_{st(i,2),r}\right)^2}{2\cdot\dfrac{k_{PK_i}}{k_{PK_i}-1}\cdot R_{газ.cp}\left(\alpha_{ox_{st(i,2)}}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)}$$

$$Cp_3 = Cp_{газ}\left(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)$$

$$k' = k_{ад}\left(Cp_3, R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)\right)$$

if $\left|eps\left(\text{"rel"}, k_{st(i,3),r}, k'\right)\right| \le epsilon$

$$k_{st(i,3),r} = k'$$

break

$$k_{st(i,3)} = k'$$

$$v_{st(i,3),r} = \frac{R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right)\cdot T_{st(i,3),r}}{P_{st(i,3),r}}$$

$$\beta_{st(i,3),r} = \text{asin}\left(\frac{G_{st(i,3)}\cdot v_{st(i,3),r}}{w_{st(i,3),r}\cdot F_{st(i,3)}}\right)$$

$$\begin{pmatrix} c_{u_{st(i,3),r}} \\ c_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{st(i,3),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,3),r}\right) - u_{st(i,3),r} \\ w_{st(i,3),r}\cdot\sin\left(\beta_{st(i,3),r}\right) \end{pmatrix}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{pmatrix} \lambda_{w_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \dfrac{w_{st(i,3),r}}{a^*_{w_{st(i,3),r}}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} M_{c_{st(i,3),r}} \\ M_{w_{st(i,3),r}} \end{pmatrix} = \frac{1}{a_{зв_{st(i,3),r}}} \cdot \begin{pmatrix} c_{st(i,3),r} \\ w_{st(i,3),r} \end{pmatrix}$$

$$\upsilon_{rotor_i} = \upsilon_{установки}\left(\beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}\right)$$

$$chord_{rotor_{i,r}} = \frac{B_{РК_i}}{\sin\left(\upsilon_{rotor_i}\right)}$$

$$\overline{t}_{оптРК_i} = \overline{t}_{опт}\left(\text{"РК"}, g_{охлРК_i} > 0, \beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}, \max\left(\text{submatrix}\left(\overline{c}_{rotor}, i, i, 1, N_r\right)\right)\right)$$

$$Z_{rotor_i} = \left| \begin{array}{l} Z_{rotor_i} = \text{ceil}\left(\dfrac{\pi \cdot \text{mean}\left(D_{st(i,2),r}, D_{st(i,3),r}\right)}{\overline{t}_{оптРК_i} \cdot chord_{rotor_{i,r}}}\right) \\ \text{while } \gcd\left(Z_{rotor_i}, Z_{stator_i}\right) \neq 1 \\ \quad Z_{rotor_i} = Z_{rotor_i} + 1 \end{array} \right.$$

for $r \in 1 .. N_r$

$$t_{rotor_{i,r}} = \frac{\pi \cdot \text{mean}\left(D_{st(i,2),r}, D_{st(i,3),r}\right)}{Z_{rotor_i}}$$

$$\xi_{трРК_i} = \xi_{трение}\left(\beta_{st(i,2),r}, \beta_{st(i,3),r}\right)$$

$$\xi_{крРК_i} = \xi_{кромка}\left(\overline{r}\_outlet_{rotor_{i,r}} \cdot chord_{rotor_{i,r}}, t_{rotor_{i,r}}, \beta_{st(i,3),r}\right)$$

$$\xi_{ReРК_i} = \xi_{Re}\left(\frac{w_{st(i,3),r} \cdot chord_{rotor_{i,r}}}{\mu_{газ}\left(T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}\right) \cdot v_{st(i,3),r}}\right)$$

$$\xi_{\lambda РК_i} = \xi_{сжимаемость}\left(\text{"РК"}, \lambda_{w_{st(i,3),r}}\right)$$

$$\xi_{прРК_i} = \xi_{трРК_i} + \xi_{крРК_i} + \xi_{ReРК_i} + \xi_{\lambda РК_i}$$

$$\xi_{втРК_i} = \xi_{вторичные}\left(\xi_{трРК_i}, t_{rotor_{i,r}}, \beta_{st(i,3),r}, h_{st(i,3)}\right)$$

$$\xi_{тдРК_i} = \frac{\xi_{ТД}\left(\text{"РК"}, T^*_{см_{st(i,3),r}}, T^*_{ад_{st(i,3),r}}, P_{st(i,3),r}, Cp_{газ}\left(P_{st(i,3),r}, T_{st(i,3),r}, \alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right), R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,3)}}, Fuel\right), G_{st(i,3)}, F_{st(i,3)}, \beta_{st(i,3),r}, u_{st(i,3),r}\right)}{H_{rotor_i}}$$

$$\xi_{смРК_i} = \xi_{смешение}\left(\text{"РК"}, g_{охлРК_i}\right)$$

$$\text{if } \left|\text{eps}\left(\text{"rel"}, \sqrt{1 - \xi_{смРК_i} - \xi_{тдРК_i} - \xi_{втРК_i} - \xi_{прРК_i}}, \overline{\upsilon}_{rotor_i}\right)\right| \leq \text{epsilon}$$

$$\left| \begin{array}{l} \overline{\upsilon}_{rotor_i} = \sqrt{1 - \xi_{смРК_i} - \xi_{тдРК_i} - \xi_{втРК_i} - \xi_{прРК_i}} \\ \text{break} \end{array} \right.$$

$$\overline{\upsilon}_{rotor_i} = \sqrt{1 - \xi_{смРК_i} - \xi_{тдРК_i} - \xi_{втРК_i} - \xi_{прРК_i}}$$

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

$$\begin{pmatrix} \xi_{CA_i} \\ \xi_{РК_i} \\ \xi_{САиРК_i} \end{pmatrix} = \frac{1}{H_{ст_i}} \cdot \begin{pmatrix} \xi_Л\left(\overline{\upsilon}_{stator_i}, c_{st(i,2),r}\right) \\ \xi_Л\left(\overline{\upsilon}_{rotor_i}, w_{st(i,3),r}\right) \\ \xi_Л\left(\overline{\upsilon}_{stator_i}, c_{st(i,2),r}\right) \cdot \dfrac{T_{ад_{st(i,3),r}}}{T_{st(i,2),r}} \end{pmatrix}$$

$$\xi_{вых_i} = \frac{\xi_{выход}\left(c_{st(i,3),r}\right)}{H_{ст_i}}$$

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

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

$$\eta_{u1_i} = \frac{Lu_{ст_i}}{H_{ст_i}}$$

$$\eta_{лоп_i} = 1 - \xi_{САиРК_i} - \xi_{РК_i} - \xi_{\Delta r_i} - \xi_{тр.в_i}$$

$$\eta_{u2_i} = 1 - \xi_{САиРК_i} - \xi_{РК_i} - \xi_{вых_i}$$

$$\eta_{мощь_i} = 1 - \xi_{САиРК_i} - \xi_{РК_i} - \xi_{вых_i} - \xi_{\Delta r_i} - \xi_{тр.в_i}$$

$$L_{ст_i} = H_{ст_i} \cdot \eta_{мощь_i}$$

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

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

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

$$Lu_{нагрузка_i} = \frac{Lu_{ст_i}}{\left(mean\left(u_{st(i,2),r}, u_{st(i,3),r}\right)\right)^2}$$

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

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

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

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

for $i \in 1..Z$

for $j \in 1..3$

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

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

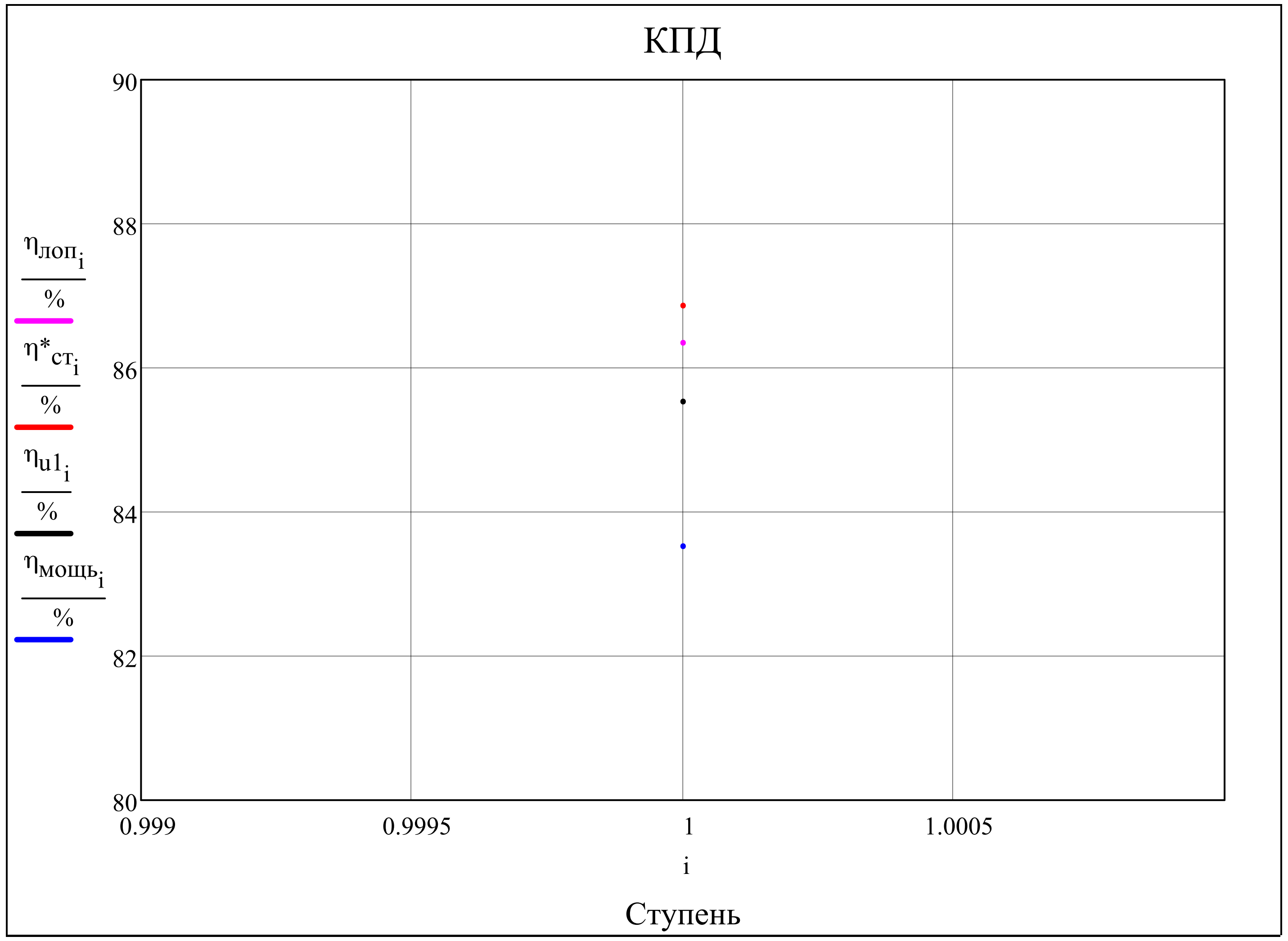
$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{stator_{i,av(N_r)}} \\ \varepsilon_{rotor_{i,av(N_r)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{st(i,2),av(N_r)} - \alpha_{st(i,1),av(N_r)} \\ \beta_{st(i,3),av(N_r)} - \beta_{st(i,2),av(N_r)} \end{pmatrix}$$

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

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

Поступенчатый расчет ОТ

Параметры турбины



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

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

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

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

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

Степень понижения полного давления Т:
Степень понижения давления Т:

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

	1
1	3.14
2	3.26

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

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

	1
1	516.1
2	536.7

$\cdot 10^3$

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

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

Лопаточный КПД Т:

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

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

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

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

Мощностной КПД Т:

$$\eta_{Tмощь} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \dfrac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)}}{H_T} = 83.58 \cdot \%$$

$L_{ст}{}^{T} =$

	1
1	448.3

$\cdot 10^{3}$

$N_{ст}{}^{T} =$

	1
1	14.89

$\cdot 10^{6}$

$Lu_{ст}{}^{T} =$

	1
1	459.1

$\cdot 10^{3}$

$Lu_{нагрузка}{}^{T} =$

	1
1	1.7

$H_{ст}{}^{T} =$

	1
1	536.7

$\cdot 10^{3}$

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

	1
1	450.9
2	87.0

$\cdot 10^{3}$

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

	1
1	0.2

$G^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	32.193	33.050	33.350						

$\alpha_{ox}{}^{T} =$

	1	2	3
1	2.267	2.294	2.303

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

	1
1	0.432
2	0.206

$\mathrm{stack}\left(g_{охлCA}{}^{T}, g_{охлPK}{}^{T}\right) =$

	1
1	26.61
2	9.09

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\mathrm{stack}\left(G_{охлCA}{}^{T}, G_{охлPK}{}^{T}\right) =$

	1
1	0.9
2	0.3

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

$G_{cooling} = 3.2$

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

	1
1	2
2	2

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

	1	2	3
1	1.283	1.293	1.295

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

	1	2	3
1	2731.8	2413.7	870.5

$\cdot 10^{3}$

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

	1	2	3
1	2705.2	1017.3	838.1

$\cdot 10^{3}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

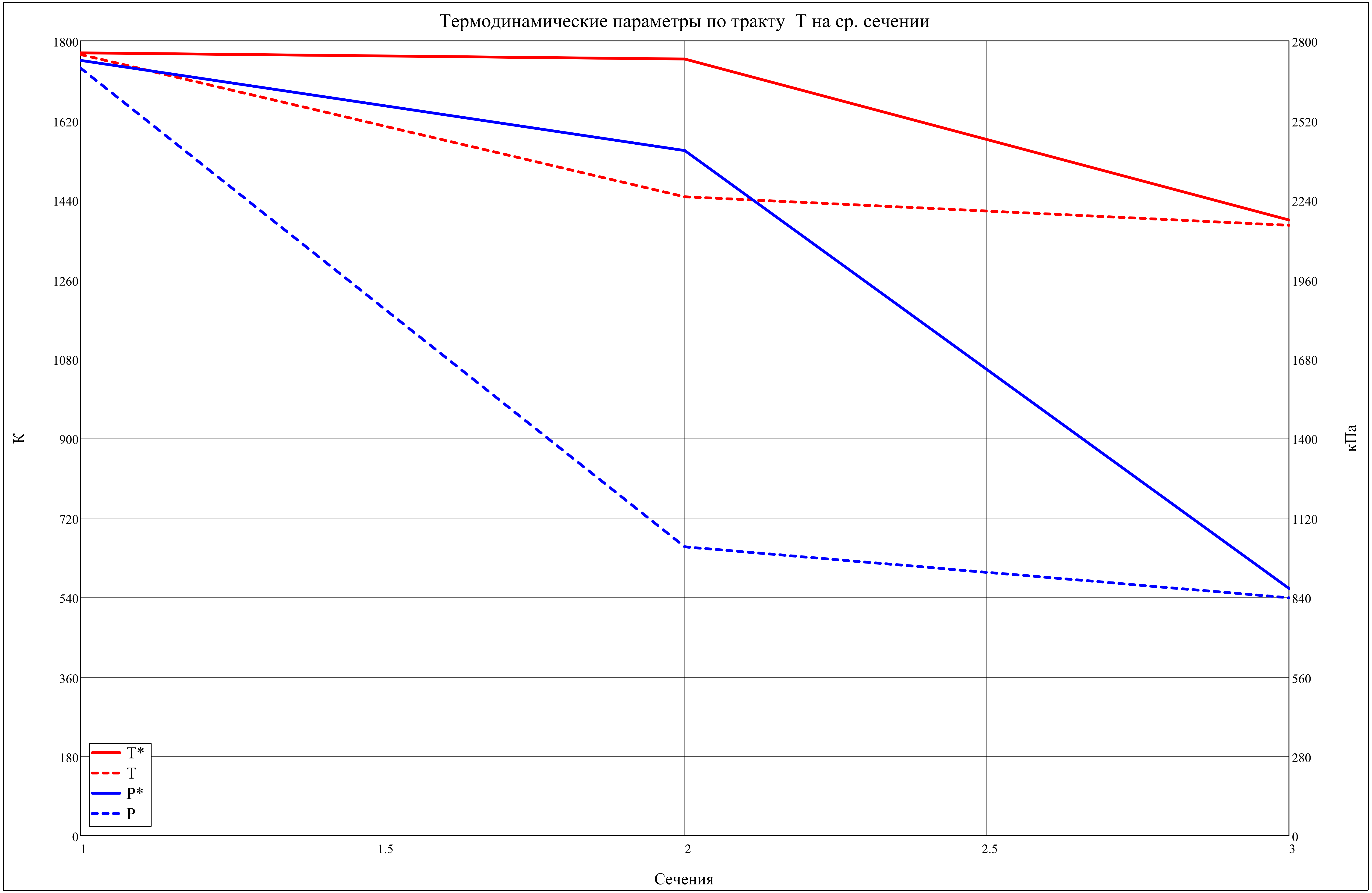
	1	2	3
1	0.189	0.410	0.487

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

	1	2	3
1	5.341	4.756	2.164

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

	1	2	3
1	5.300	2.437	2.053


Термодинамические параметры по тракту Т на ср. сечении
К
кПа
Сечения
T*
T
P*
P
1800
1620
1440
1260
1080
900
720
540
360
180
0
2800
2520
2240
1960
1680
1400
1120
840
560
280
0
1
1.5
2
2.5
3

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

	1	2	3
1	809.2	734.6	718.7

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

	1	2	3
1	758.2	756.5	673.8

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

	1	2	3
1	0.0	700.8	698.9

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

	1	2	3
1	100.0	892.5	174.1

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

	1	2	3
1	0.0	864.2	-2.7

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

	1	2	3
1	100.0	223.3	174.0

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

	1	2	3
1	0.0	399.5	545.8

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

	1	2	3
1	0.0	331.3	517.3

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

	1	2	3
1	0.0	223.3	174.0

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

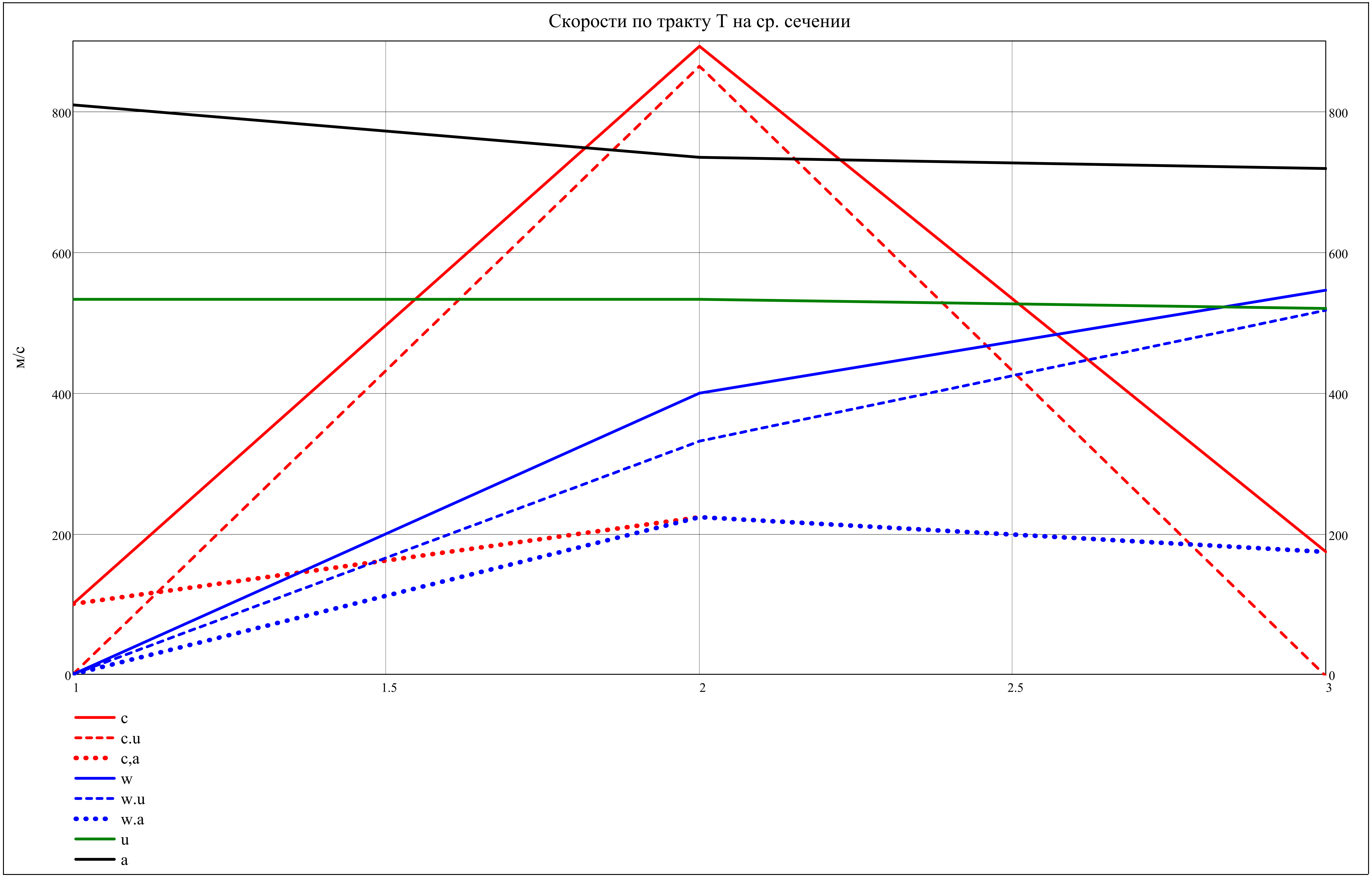
	1	2
1	1036.1	949.6

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

	1	2	3
1	0.0	0.0	565.7

$u^{T} =$

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



Скорости по тракту Т на ср. сечении
м/с
0
200
400
600
800
1
1.5
2
2.5
3
c
c.u
c,a
w
w.u
w.a
u
a

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

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

$\cdot°$

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

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

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

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

$\cdot°$

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

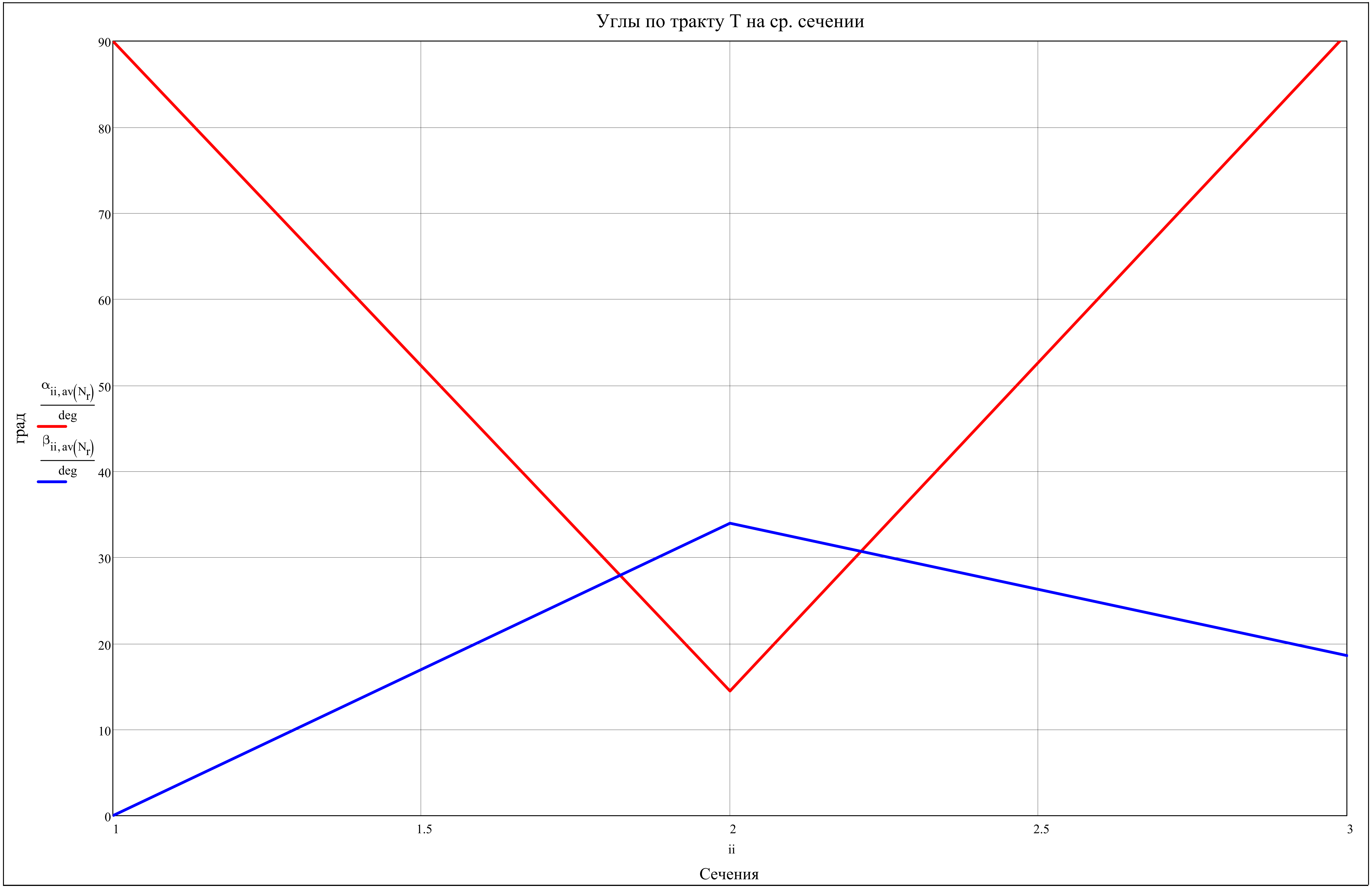
	1	2	3	4	5	6
1	-75.51					

$\cdot°$

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

	1	2	3	4	5	6
1	-15.39					

$\cdot°$



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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.1319	1.1799	0.2583						

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0000	0.5701	0.7810						

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.1236	1.2150	0.2422						

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

	1
1	37.03
2	67.08

$\cdot°$

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

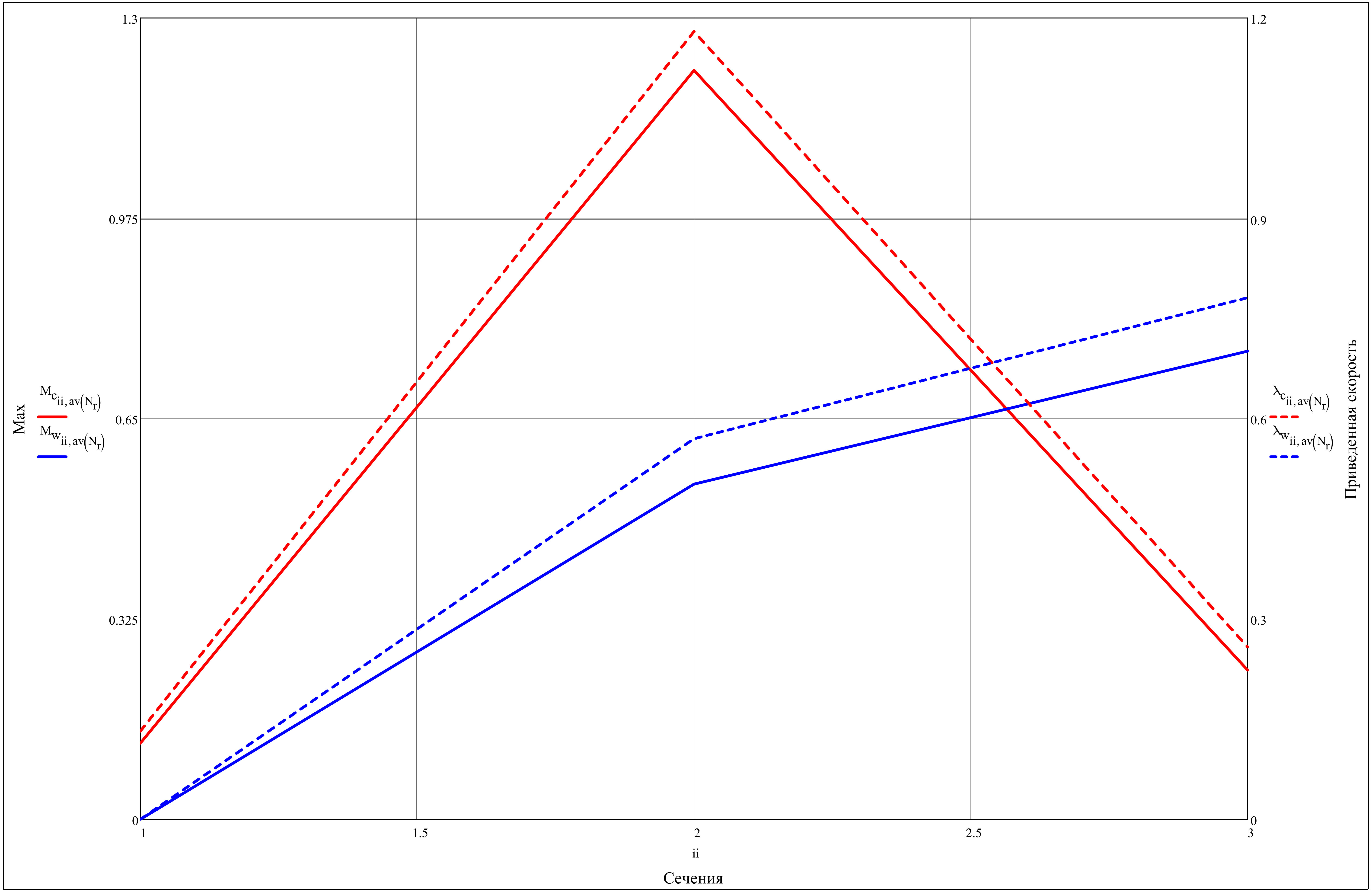
	1	2	3
1	1	0	1

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0000	0.5438	0.7594						

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

	1	2	3
1	1	1	1



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

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

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

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

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

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

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

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

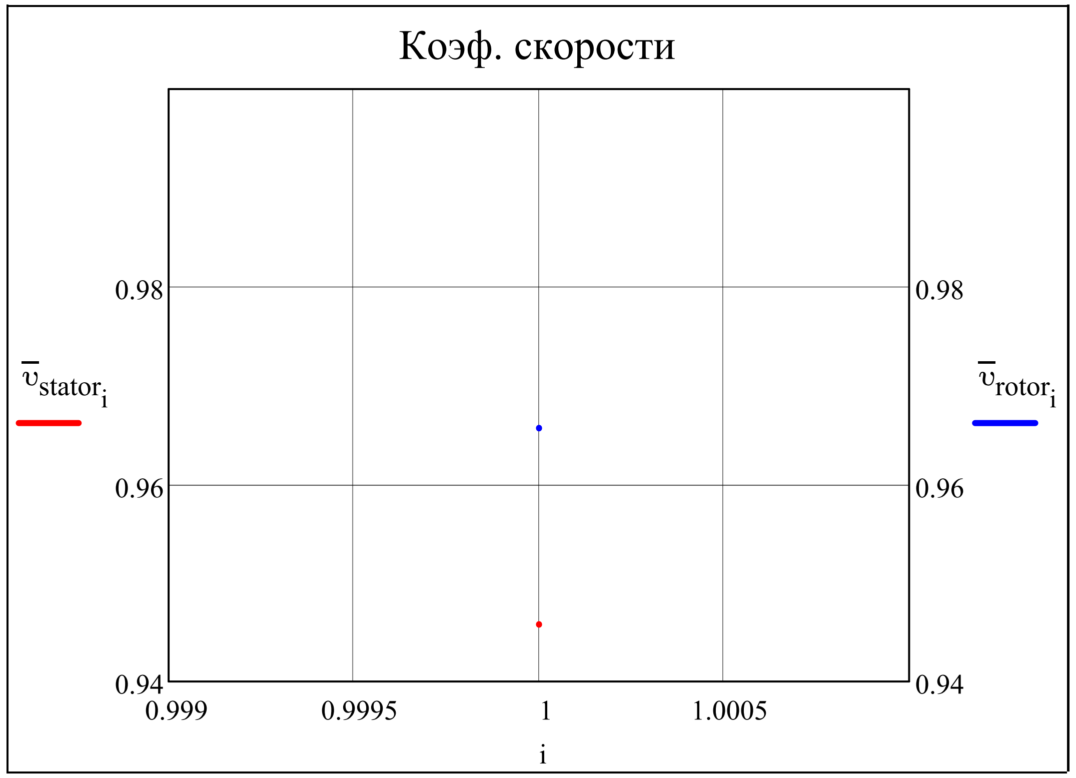
$$0.7 \le \frac{t_{stator_{i,av(N_r)}}}{chord_{stator_{i,av(N_r)}}} \le 1 = \boxed{1}$$

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

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

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

	1
1	0.9458
2	0.9657



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

	1
1	1.398
2	2.620

$\cdot\%$

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

	1
1	2.753
2	1.689

$\cdot\%$

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

	1
1	6.451
2	4.418

$\cdot\%$

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

	1
1	-0.135
2	0.085

$\cdot\%$

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

	1
1	2.434
2	0.024

$\cdot\%$

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

	1
1	1.453
2	0.881

$\cdot\%$

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

	1
1	1.856
2	1.200

$\cdot\%$

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

	1
1	0.784
2	0.248

$\cdot\%$

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

	1
1	8.748
2	2.008

$\cdot\%$

$\xi_{вых}{}^{T} =$

	1
1	2.822

$\cdot\%$

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

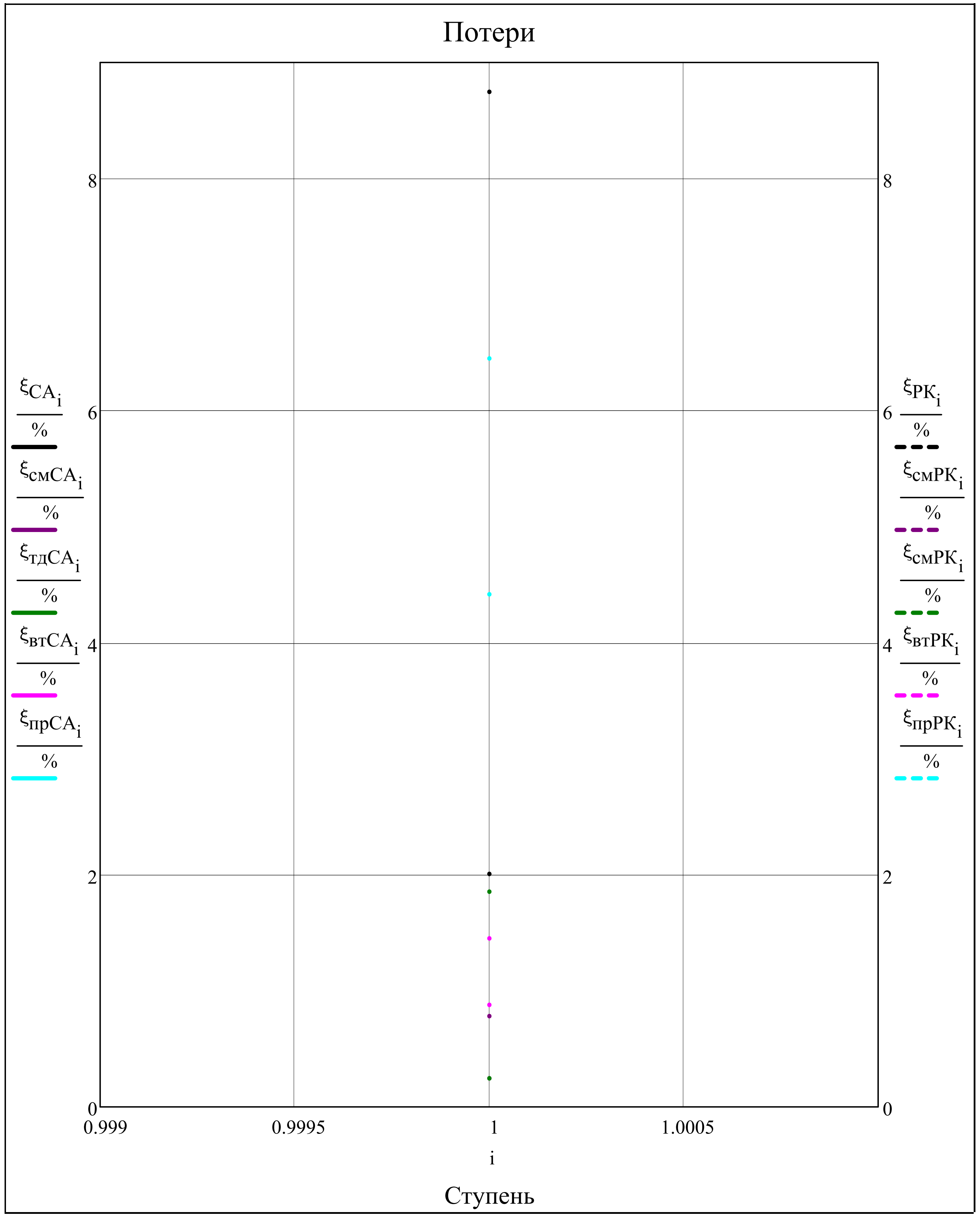
	1
1	2.476

$\cdot\%$

$\xi_{тр.в}{}^{T} =$

	1
1	0.831

$\cdot\%$



Параметры турбины

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

Выбор закона профилирования Л по высоте

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

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

$m^T =$

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

Выбор закона профилирования Л по высоте

Расчет Л по высоте

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

for $i \in 1..Z$

for $a \in 2..3$

for $r \in 1..N_r$

$$A_{st(i,a)} = \left(1 - R_{L_{i,av(N_r)}}\right)\cdot\omega\cdot\left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{m_i+1}$$

$$B_{st(i,a)} = \frac{Lu_{ст_i}}{2\cdot\omega}$$

$$c_{u_{st(i,a),r}} = \begin{cases} \begin{cases} c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot\left(\dfrac{R_{st(i,a),av(N_r)}}{R_{st(i,a),r}}\right)^{m_i} & \text{if } a = 2 \\ \dfrac{u_{st(i,a-1),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}} + u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}} - u_{st(i,a-1),r}\cdot c_{u_{st(i,a-1),r}}}{u_{st(i,a),r}} & \text{otherwise} \end{cases} & \text{if } m_i = \overline{\upsilon}_{stator_i}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^2 \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} \dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)} & \text{if } a = 2 \\ -\dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)} & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases}$$

$$c_{a_{st(i,a),r}} = \begin{cases} \sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] + 4\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)\cdot\begin{cases} -1 & \text{if } a = 2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}} & \text{if } m_i = -1 \\ \sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^2\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right) - 2\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\left(\dfrac{1}{R_{st(i,a),r}} - \dfrac{1}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)\cdot\begin{cases} -1 & \text{if } a = 2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}} & \text{if } m_i = 0 \end{cases}$$

$$\text{if } m_i = \overline{\upsilon} \ldots \cos(\alpha \ldots)^2$$

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

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

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

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

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

for $r \in 1..N_r$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $i \in 1..Z$

for $r \in 1..N_r$

$$\left(\Delta c_a \ \ldots\right) \quad \left(c_a \ldots - c_a \ldots\right)$$

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

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

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

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

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

Расчет Л по высоте

Результаты расчета Л по высоте

$P*^T =$

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

$\cdot 10^3$

$P^T =$

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

$\cdot 10^3$

$T*^T =$

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

$T^T =$

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

$T*_w{}^T =$

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

$\rho*^T =$

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

$\rho^T =$

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

$k^T =$

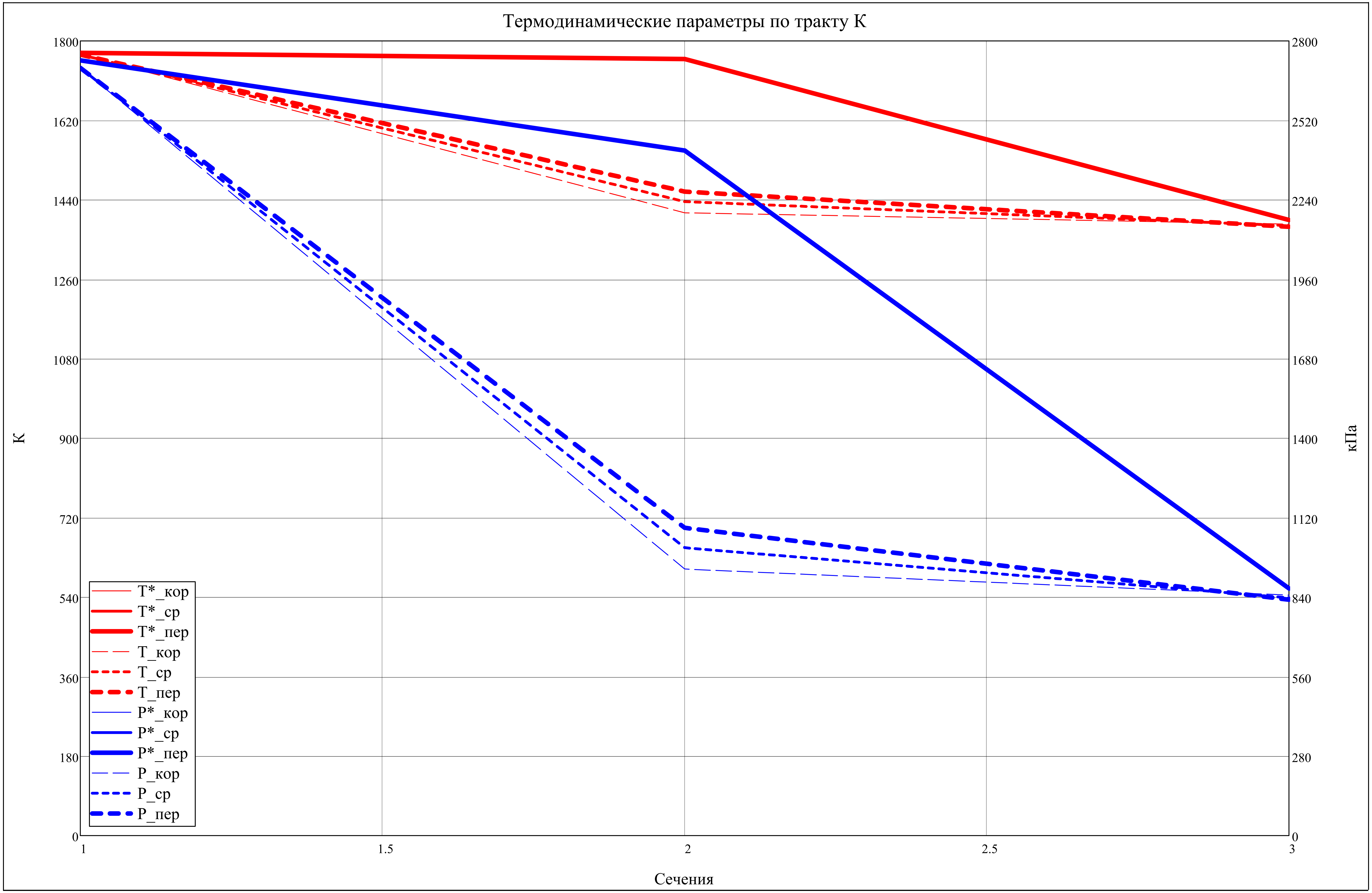
	1	2	3
1	1.305	1.305	1.316
2	1.305	1.305	1.316
3	1.305	1.305	1.316

$R_L{}^T =$

	1
1	0.0998
2	0.1767
3	0.2440

$R_L{}^T \geq 0.05 =$

	1
1	1
2	1
3	1



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

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

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

$u^T =$

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

$c^T =$

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

$c_u{}^T =$

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

$c_a{}^T =$

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

$\Delta c_a{}^T =$

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

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

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

$a_{зв}{}^T =$

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

$w^T =$

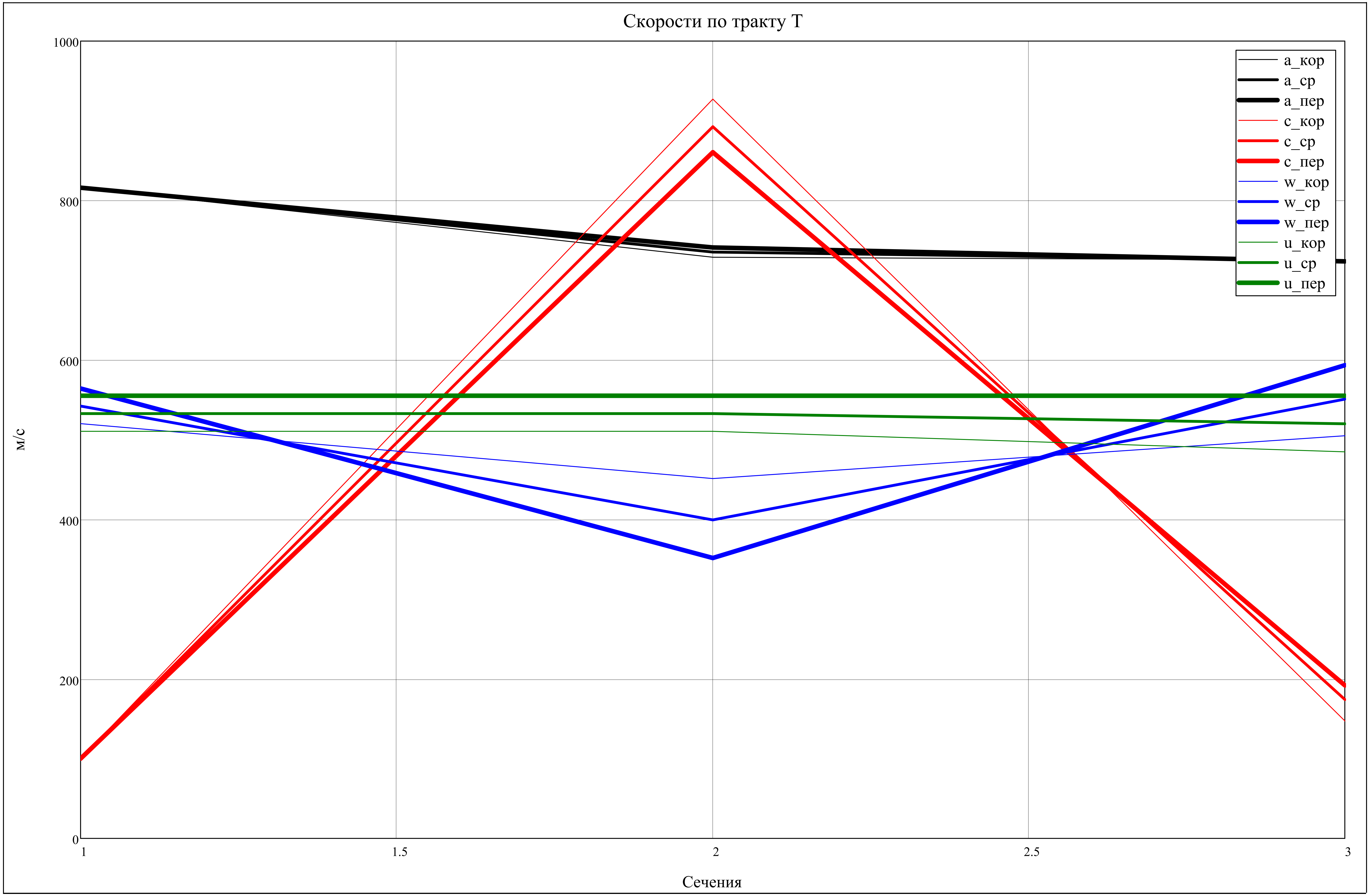
	1	2	3
1	520.2	451.4	504.9
2	542.2	399.5	550.9
3	564.2	351.6	593.4

$w_u{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	510.5	-387.2	483.0						
2	532.9	-331.3	522.7						
3	555.2	-278.0	561.6						

$w_a{}^T =$

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


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

$\alpha^{T} =$

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

$\cdot°$

$\beta^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	11.08	149.08	16.96						
2	10.63	146.02	18.42						
3	10.21	142.24	18.85						

$\cdot°$

$80\cdot° \le \alpha^{T} =$

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

[1, c.78]

Угол поворота потока:

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

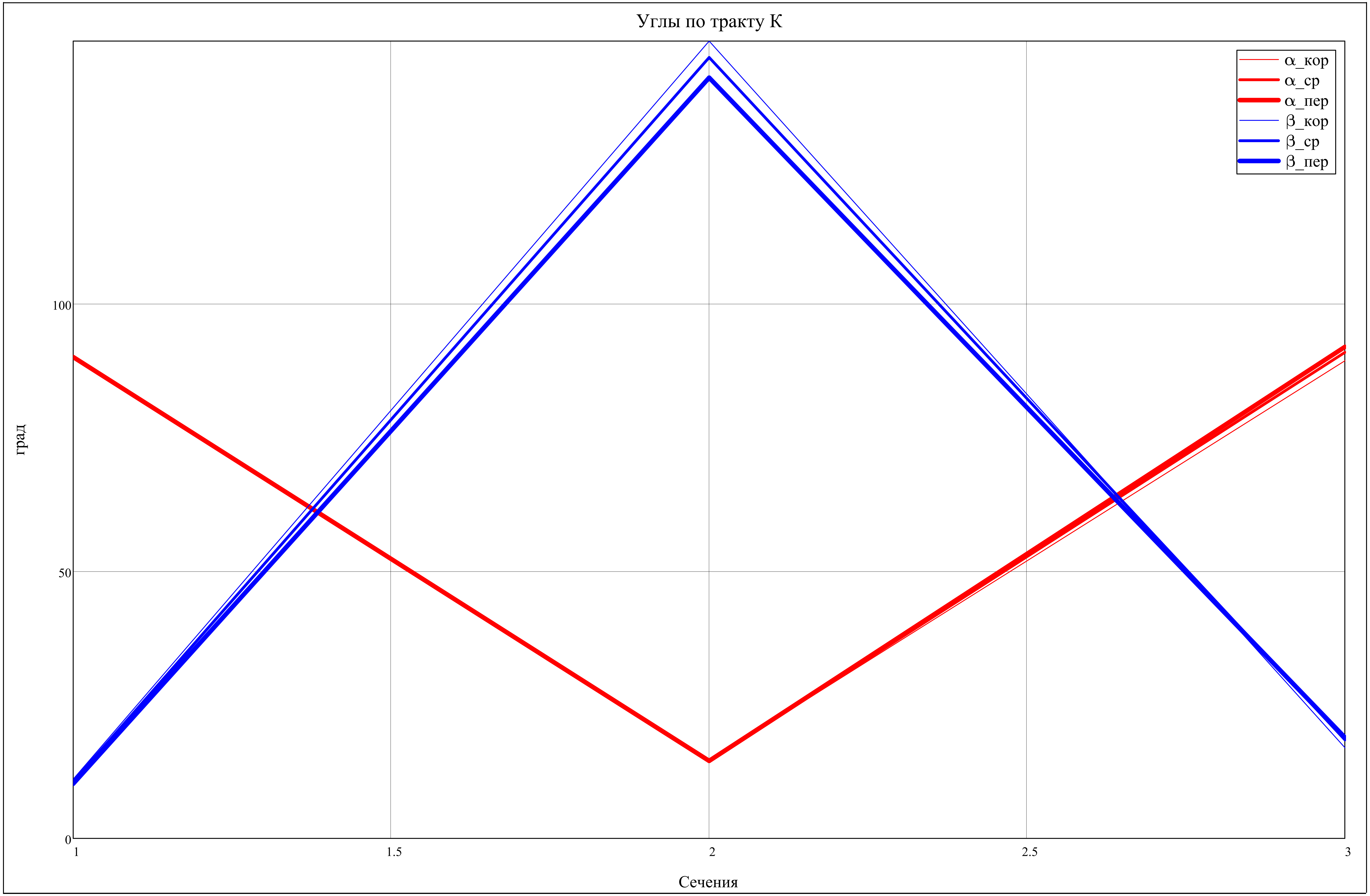
	1
1	75.51
2	75.51
3	75.51

$\cdot°$

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

	1
1	132.12
2	127.61
3	123.40

$\cdot°$


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

$\lambda_c^T =$

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

$\lambda_w^T =$

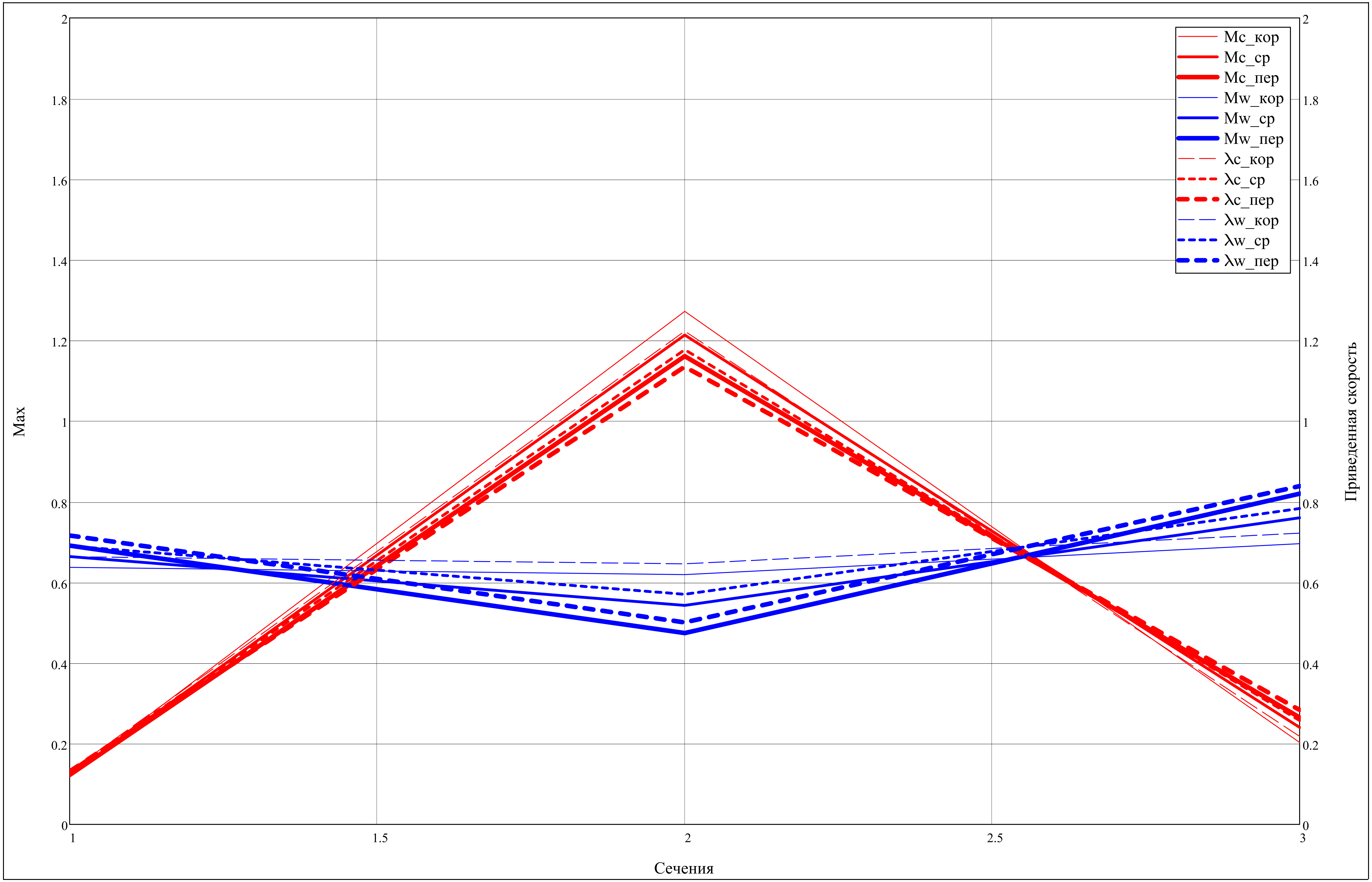
	1	2	3
1	0.664	0.646	0.722
2	0.690	0.571	0.783
3	0.717	0.501	0.839

$M_c^T =$

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

$M_w^T =$

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



Результаты расчета Л по высоте

Вывод результатов расчета параметров потока по высоте Л

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

Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

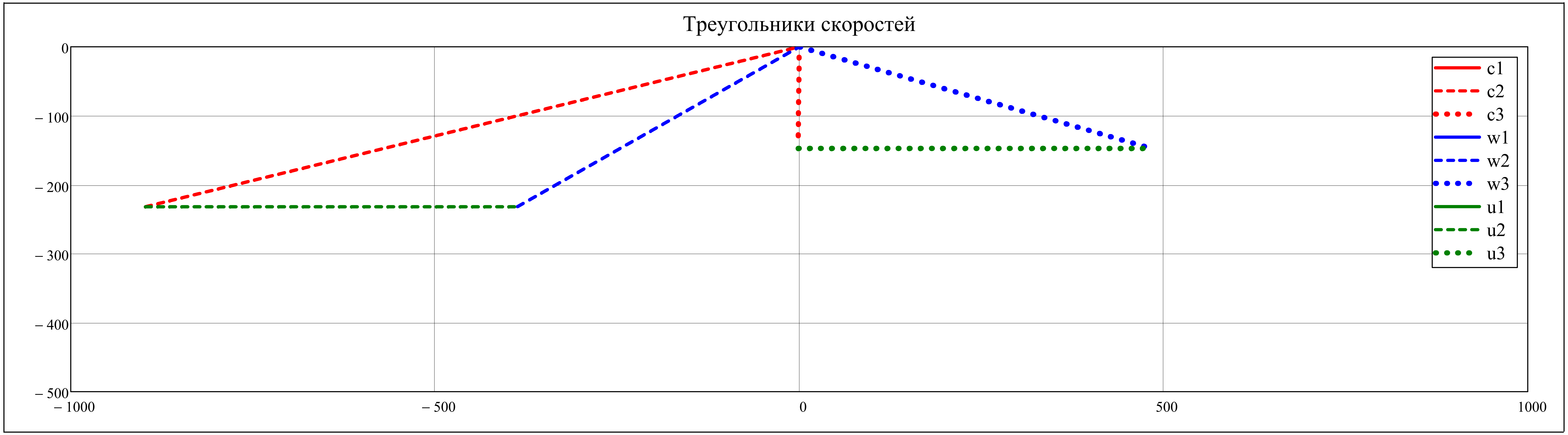
$$\Delta_w(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{l} -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \ \text{ if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) \ge 0\right) \wedge \left(-\left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right| \le v \le 0\right) \wedge (j \ne 1) \\ -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot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

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

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

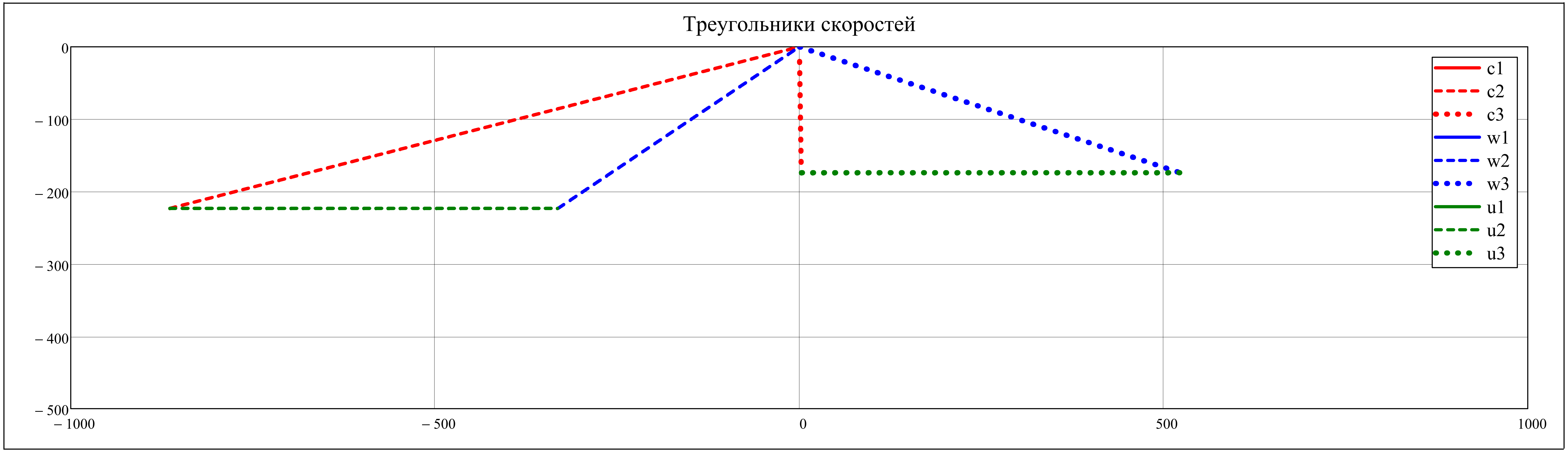
$$v = -\max(c,w,u), -\max(c,w,u) + \frac{\max(c,w,u)}{3000} .. \max(c,w,u)$$

$r = 1$



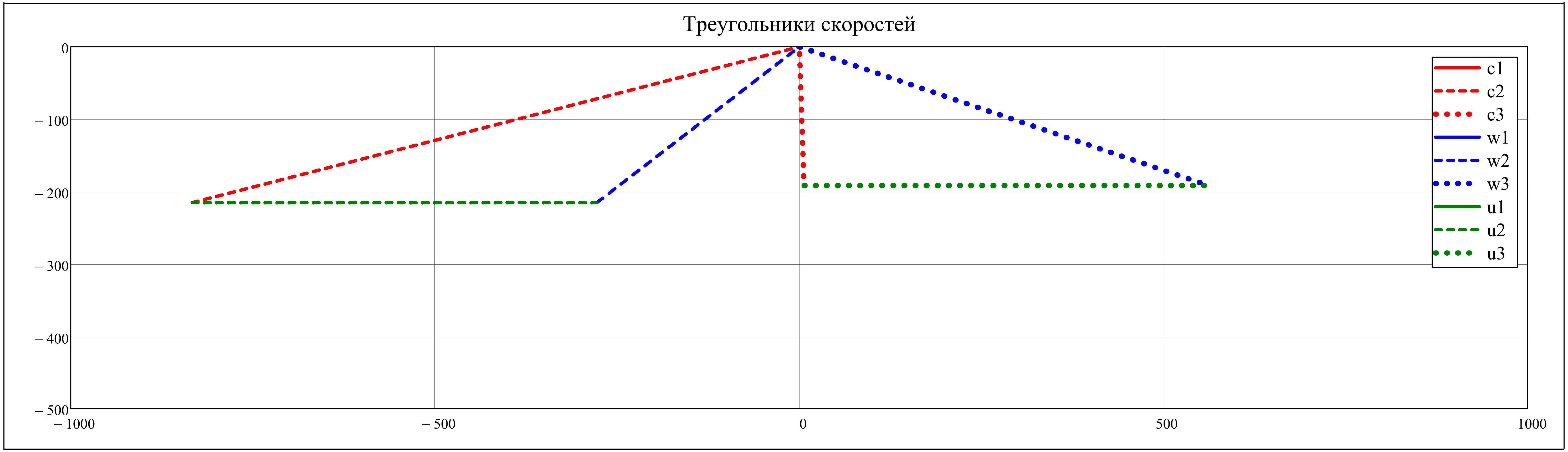
Треугольники скоростей
0
− 100
− 200
− 300
− 400
− 500
− 1000
− 500
0
500
1000
c1
c2
c3
w1
w2
w3
u1
u2
u3

$r = av(N_r)$



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

$r = N_r$



Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

Расчет хорд Л по парусности

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

Длины хорд РК и СА (м):

$chord_{stator}^T =$

	1
1	68.0
2	68.0
3	68.0

$\cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}^T =$

	1
1	38.4
2	34.2
3	31.4

$\cdot 10^{-3}$

Расчет хорд Л по парусности

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

$\bar{x}_f = 0.45$

Расчет параметров решетки

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

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

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

Расчет параметров решетки

Результаты расчета параметров решеток

Относительные радиусы профилей ():

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

	1
1	6.000
2	6.000
3	6.000

$\cdot\%$

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

	1
1	5.950
2	4.550
3	3.850

$\cdot\%$

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

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

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

	1
1	2.550
2	1.950
3	1.650

$\cdot\%$

Относительная толщина профиля ():

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

	1
1	15.00
2	15.00
3	15.00

$\cdot\%$

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

	1
1	17.00
2	13.00
3	11.00

$\cdot\%$

Относительный шаг решетки ():

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

	1
1	0.8345
2	0.8711
3	0.9076

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

	1
1	0.5829
2	0.6918
3	0.7941

Относительная густота решетки ():

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

	1
1	1.198
2	1.148
3	1.102

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

	1
1	1.716
2	1.445
3	1.259

Длина хорды профиля [м]:

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

	1
1	68.0
2	68.0
3	68.0

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	38.4
2	34.2
3	31.4

$\cdot 10^{-3}$

Радиусы профилей:

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

	1
1	4.08
2	4.08
3	4.08

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	2.28
2	1.56
3	1.21

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	2.04
2	2.04
3	2.04

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	0.98
2	0.67
3	0.52

$\cdot 10^{-3}$

Толщина профиля [м]:

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

	1
1	10.20
2	10.20
3	10.20

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	6.52
2	4.45
3	3.46

$\cdot 10^{-3}$

Шаг решетки [м]:

$t_{stator}{}^{T} =$

	1
1	56.7
2	59.2
3	61.7

$\cdot 10^{-3}$

$t_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	22.4
2	23.7
3	25.0

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	75.51
2	75.51
3	75.51

$\cdot°$

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

	1
1	132.12
2	127.61
3	123.40

$\cdot°$

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

	1
1	117.3
2	117.3
3	117.3

$\cdot°$

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

	1
1	112.0
2	114.0
3	115.4

$\cdot°$

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

	1
1	104.5
2	104.5
3	104.5

$\cdot°$

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

	1
1	47.9
2	52.4
3	56.6

$\cdot°$

Результаты расчета параметров решеток

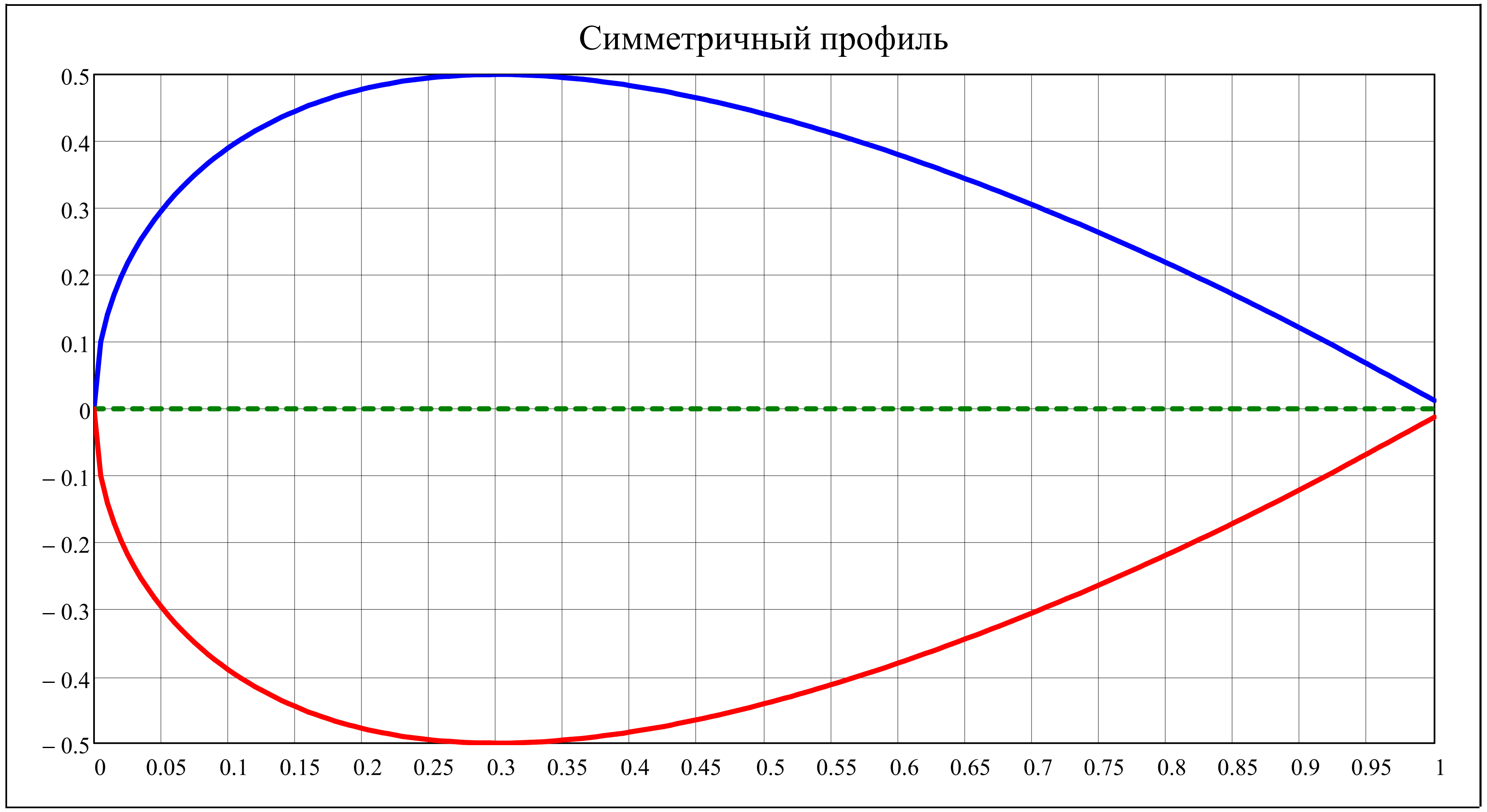
Подключение симметричного профиля

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

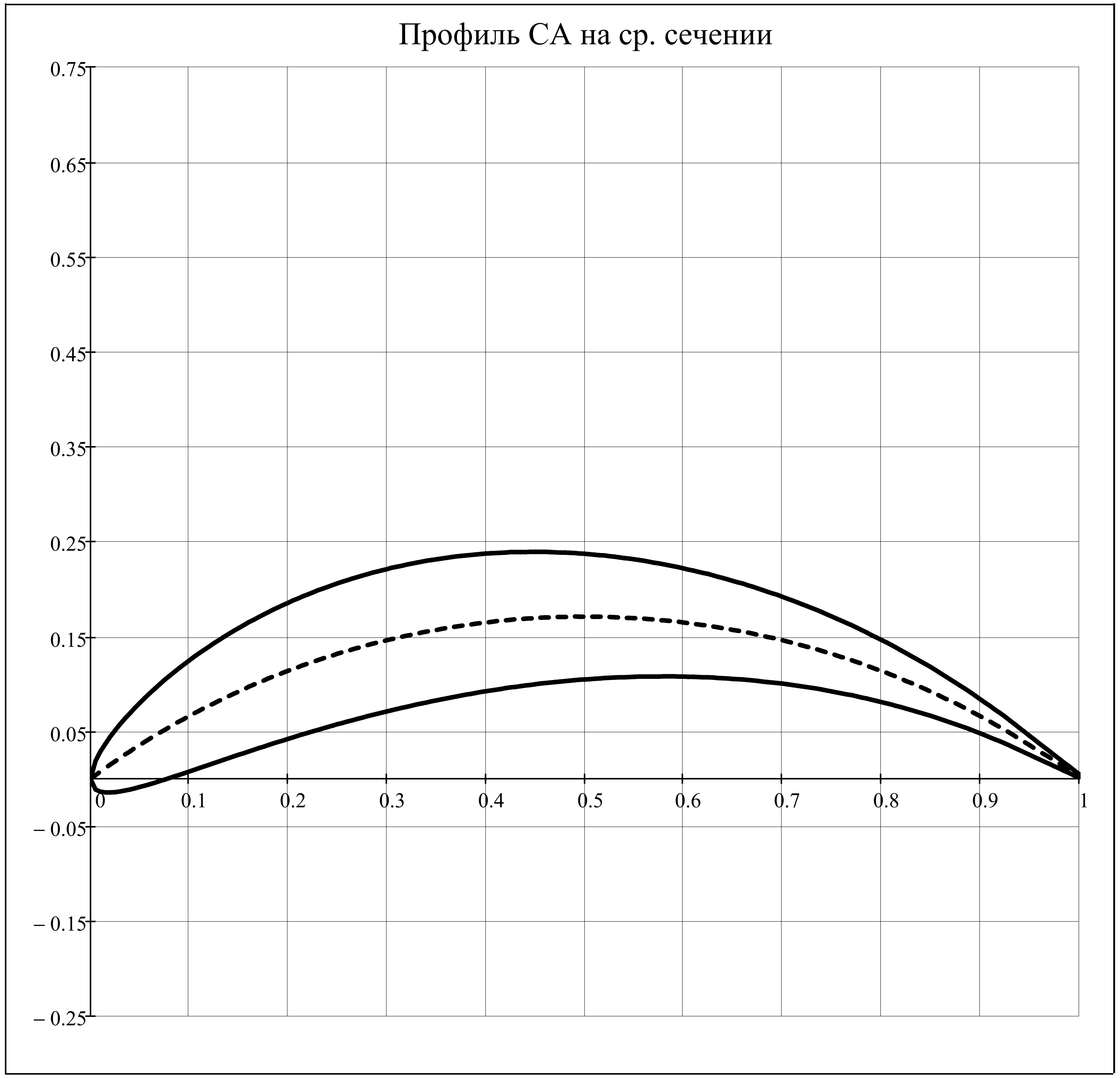
Относ. координаты профиля РК и СА:

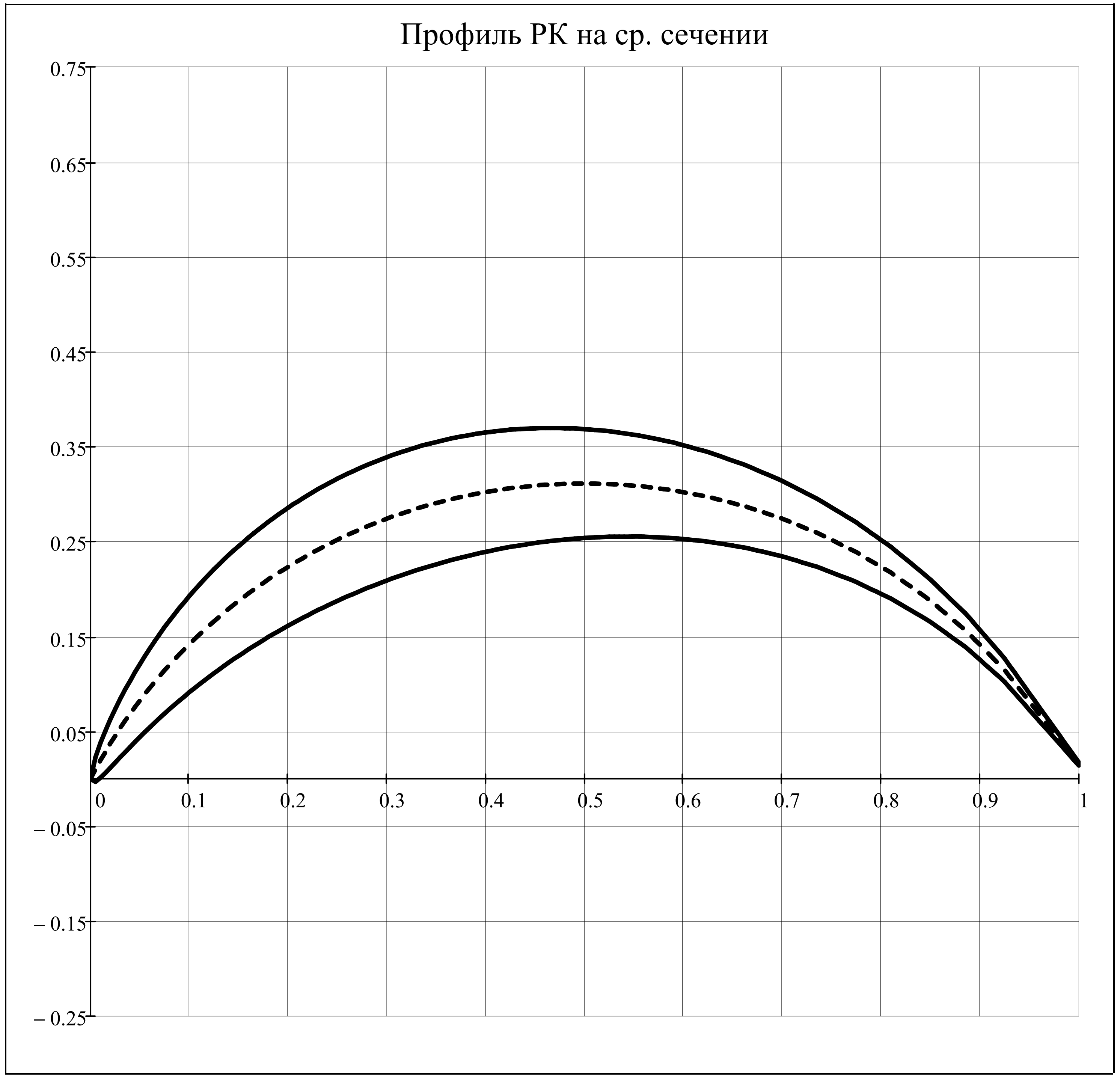
$$AIRFOIL_0\left(x, line, \overline{f}, \overline{x}_f, \overline{c}\right) = \left| \begin{array}{l} \text{if } 0 \le x \le 1 \\ \quad \left| \begin{array}{ll} linterp\left(X_U, Y_U, x\right) & \text{if } line = \text{"+"} \\ \dfrac{linterp\left(X_U, Y_U, x\right) + linterp\left(X_L, Y_L, x\right)}{2}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

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



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





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
1	78.07
2	78.07
3	78.07

$\cdot 10^{-3}$

$l_upper_{rotor}^{T} = $

	1
1	52.01
2	44.78
3	40.21

$\cdot 10^{-3}$

$l_lower_{stator}^{T} = $

	1
1	70.64
2	70.64
3	70.64

$\cdot 10^{-3}$

$l_lower_{rotor}^{T} = $

	1
1	44.26
2	39.55
3	36.21

$\cdot 10^{-3}$

$area_{stator}^{T} = $

	1
1	473.87
2	473.87
3	473.87

$\cdot 10^{-6}$

$area_{rotor}^{T} = $

	1
1	171.14
2	103.96
3	74.28

$\cdot 10^{-6}$

$Sx_{stator}^{T} = $

	1
1	4232.2
2	4232.2
3	4232.2

$\cdot 10^{-9}$

$Sx_{rotor}^{T} = $

	1
1	1711.6
2	883.3
3	554.2

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{stator}^{T} = $

	1
1	13563.5
2	13563.5
3	13563.5

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{rotor}^{T} = $

	1
1	2765.3
2	1497.1
3	983.0

$\cdot 10^{-9}$

$x0_{stator}^{T} = $

	1
1	28.62
2	28.62
3	28.62

$\cdot 10^{-3}$

$x0_{rotor}^{T} = $

	1
1	16.16
2	14.40
3	13.23

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{stator}^{T} = $

	1
1	8.93
2	8.93
3	8.93

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{rotor}^{T} = $

	1
1	10.00
2	8.50
3	7.46

$\cdot 10^{-3}$

$$Jx_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 44264 \\ 2 & 44264 \\ 3 & 44264 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 508717 \\ 2 & 508717 \\ 3 & 508717 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 128548 \\ 2 & 128548 \\ 3 & 128548 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jx0_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 6465 \\ 2 & 6465 \\ 3 & 6465 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy0_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 120489 \\ 2 & 120489 \\ 3 & 120489 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy0_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 7409 \\ 2 & 7409 \\ 3 & 7409 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\alpha\_major_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 3.70 \\ 2 & 3.70 \\ 3 & 3.70 \end{array} \cdot {}^{\circ}$$

$$Jx_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 18774 \\ 2 & 8184 \\ 3 & 4505 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 58548 \\ 2 & 28251 \\ 3 & 17045 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 29122 \\ 2 & 13406 \\ 3 & 7736 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jx0_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1656 \\ 2 & 679 \\ 3 & 370 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy0_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 13867 \\ 2 & 6691 \\ 3 & 4037 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy0_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1466 \\ 2 & 686 \\ 3 & 402 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\alpha\_major_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 6.75 \\ 2 & 6.43 \\ 3 & 6.18 \end{array} \cdot {}^{\circ}$$

$Ju_{stator}{}^{T} =$

	1
1	5986
2	5986
3	5986

$\cdot 10^{-12}$

$Jv_{stator}{}^{T} =$

	1
1	120968.8
2	120968.8
3	120968.8

$\cdot 10^{-12}$

$Juv_{stator}{}^{T} =$

	1
1	-0
2	-0
3	-0

$\cdot 10^{-12}$

$Jp_{stator}{}^{T} =$

	1
1	126955
2	126955
3	126955

$\cdot 10^{-12}$

$Wp_{stator}{}^{T} =$

	1
1	3146.4
2	3146.4
3	3146.4

$\cdot 10^{-9}$

$stiffness_{stator}{}^{T} =$

	1
1	11340.9
2	11340.9
3	11340.9

$\cdot 10^{-12}$

$Ju_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	1482
2	602
3	326

$\cdot 10^{-12}$

$Jv_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	14041
2	6769
3	4081

$\cdot 10^{-12}$

$Juv_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	0
2	0
3	0

$\cdot 10^{-12}$

$Jp_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	15522
2	7371
3	4407

$\cdot 10^{-12}$

$Wp_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	637.2
2	342.1
3	224.1

$\cdot 10^{-9}$

$stiffness_{rotor}{}^{T} =$

	1
1	1676.5
2	473.1
3	204.3

$\cdot 10^{-12}$

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

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

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

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

Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Вывод результатов расчета геометрических хар-к сечений Л

Профилирование решеток

Абс. координаты профиля:

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

Профилирование решеток

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

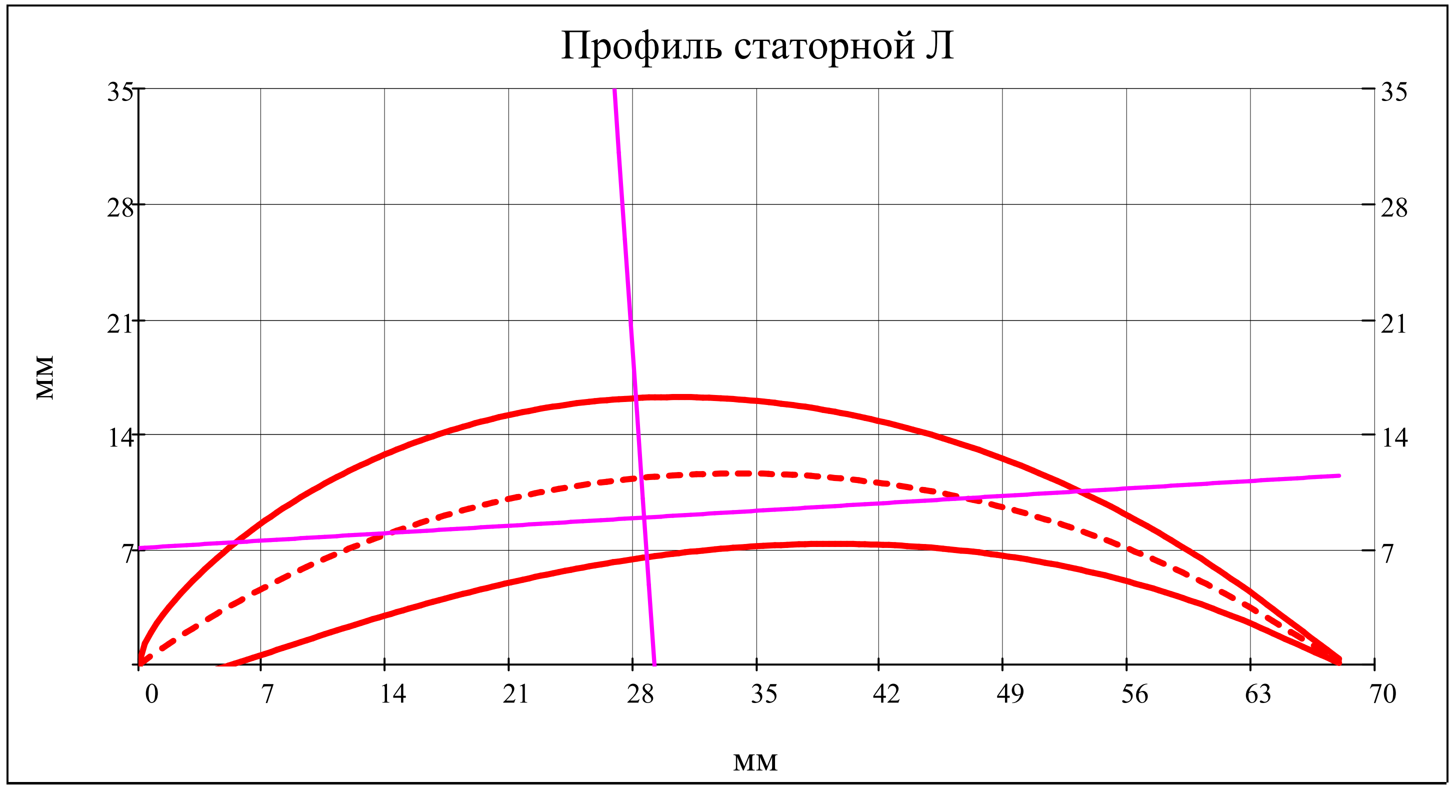
Построение профилей Л РК и НА

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

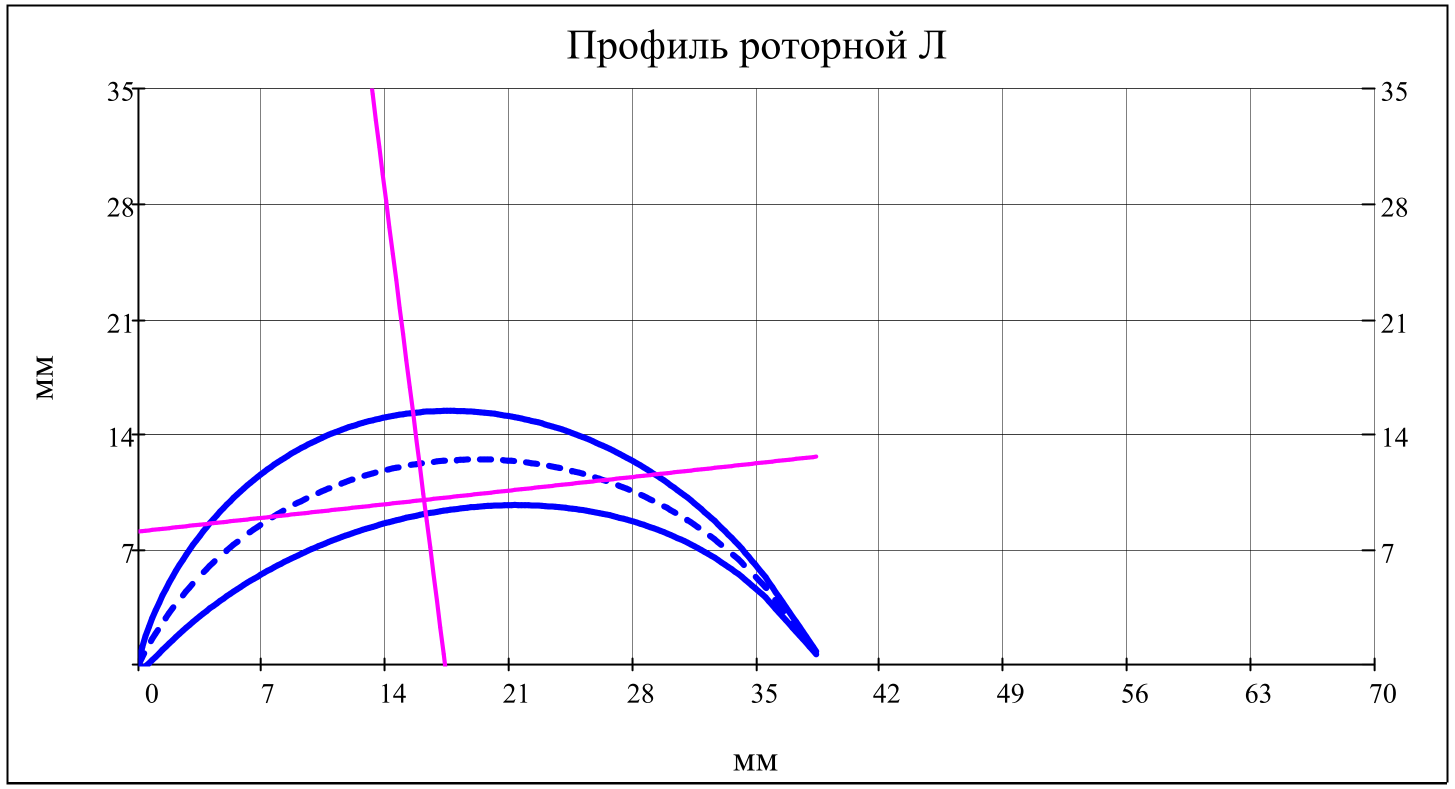
$$b_{lim} = \frac{\mathrm{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

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

r = 1

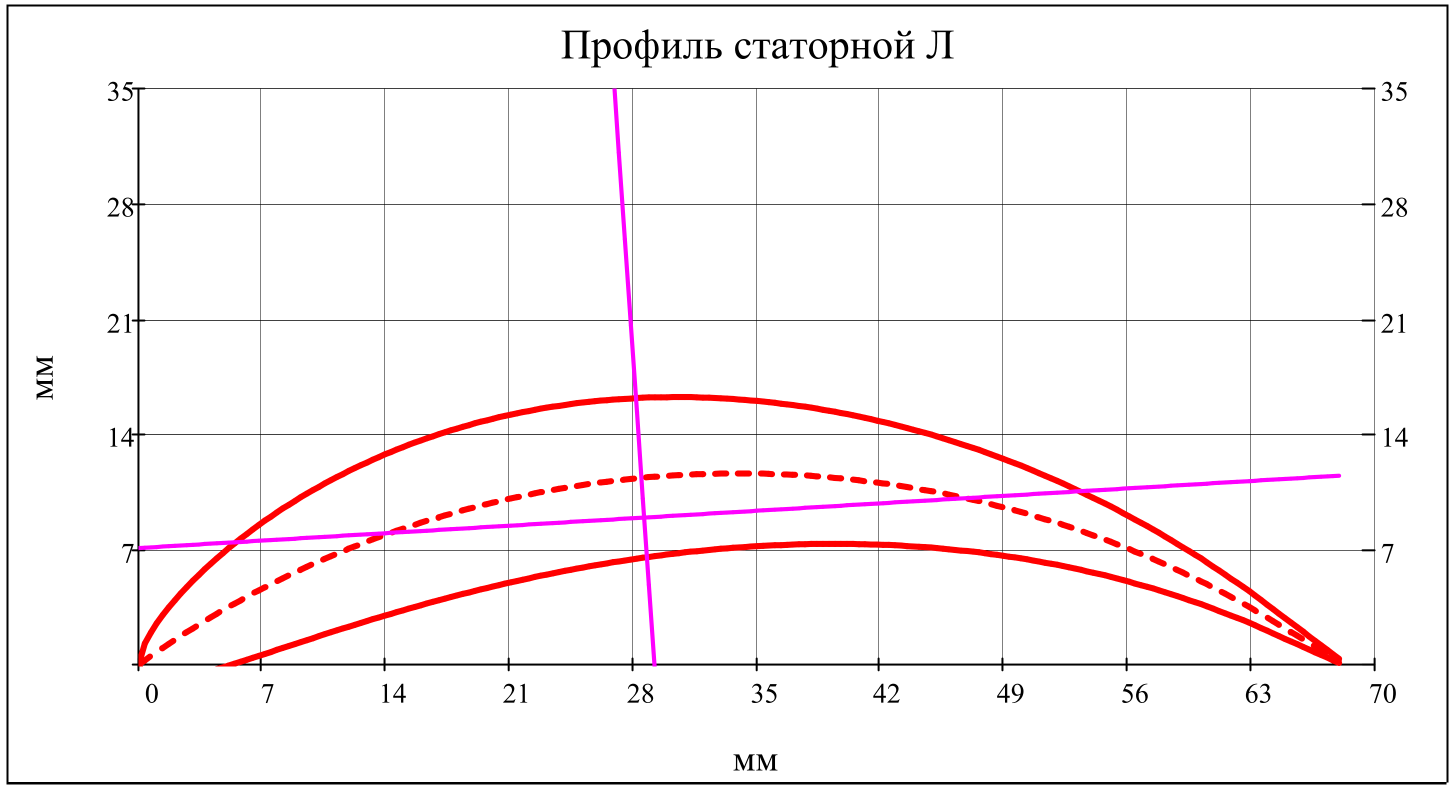


Профиль статорной Л
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм

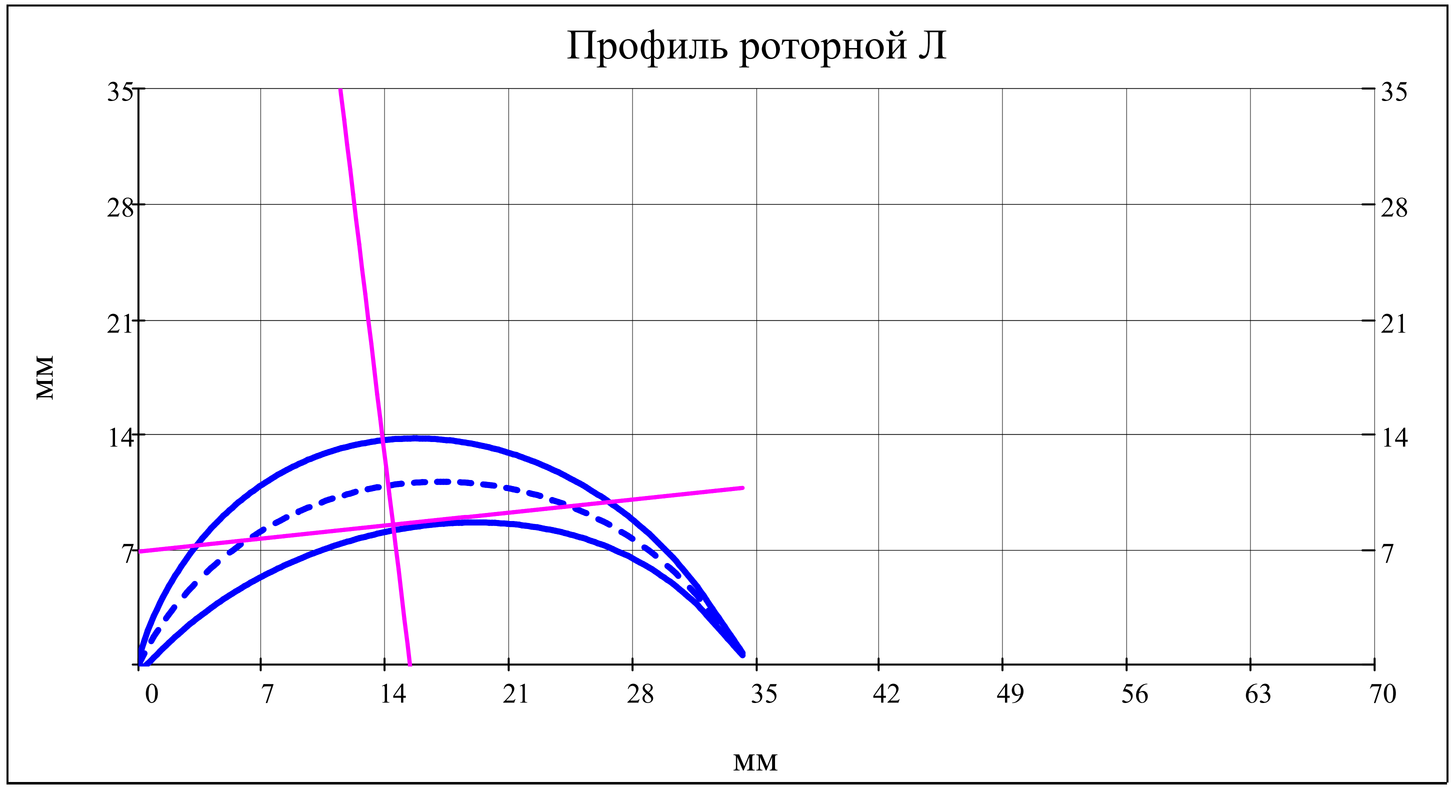


Профиль роторной Л
мм
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм

$r = av(N_r)$

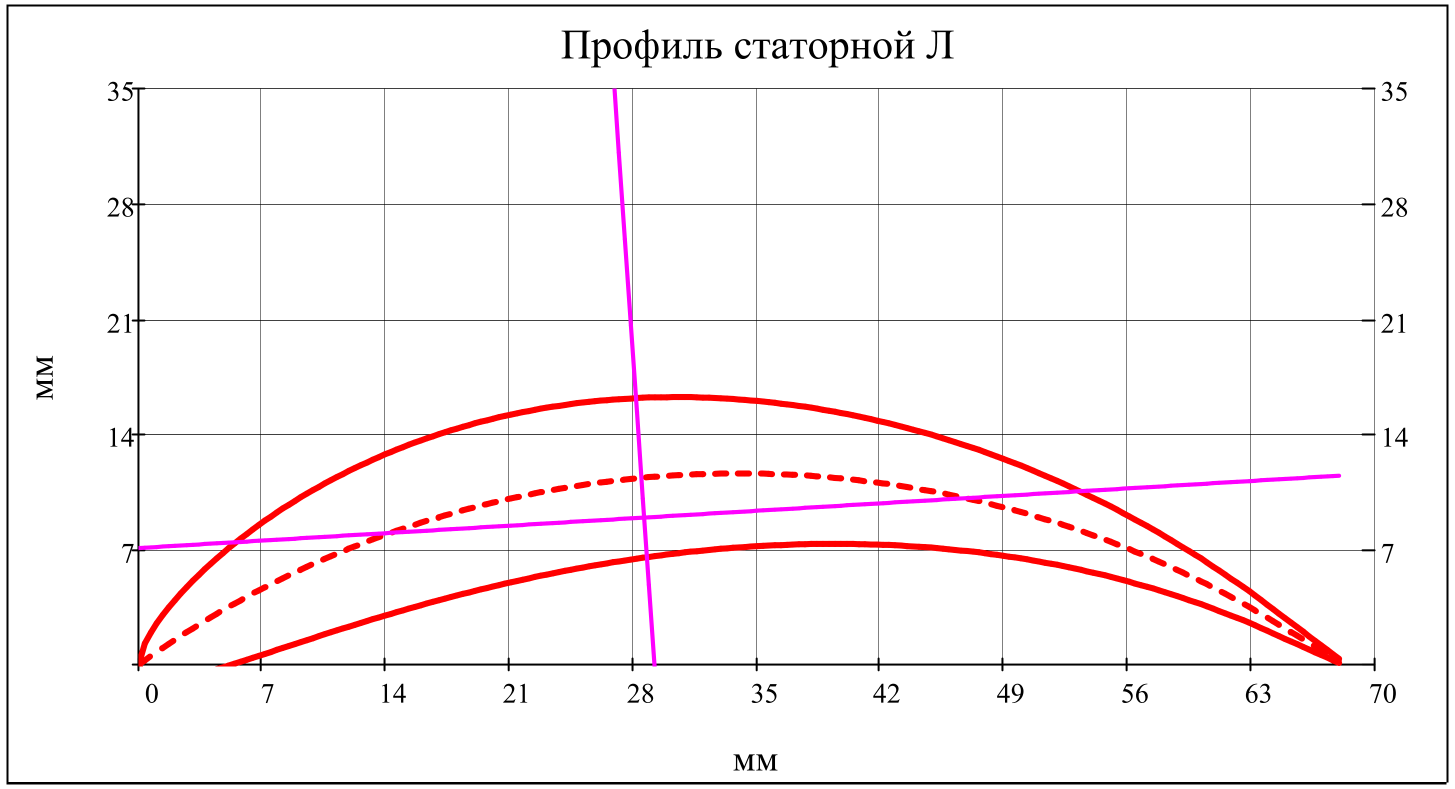


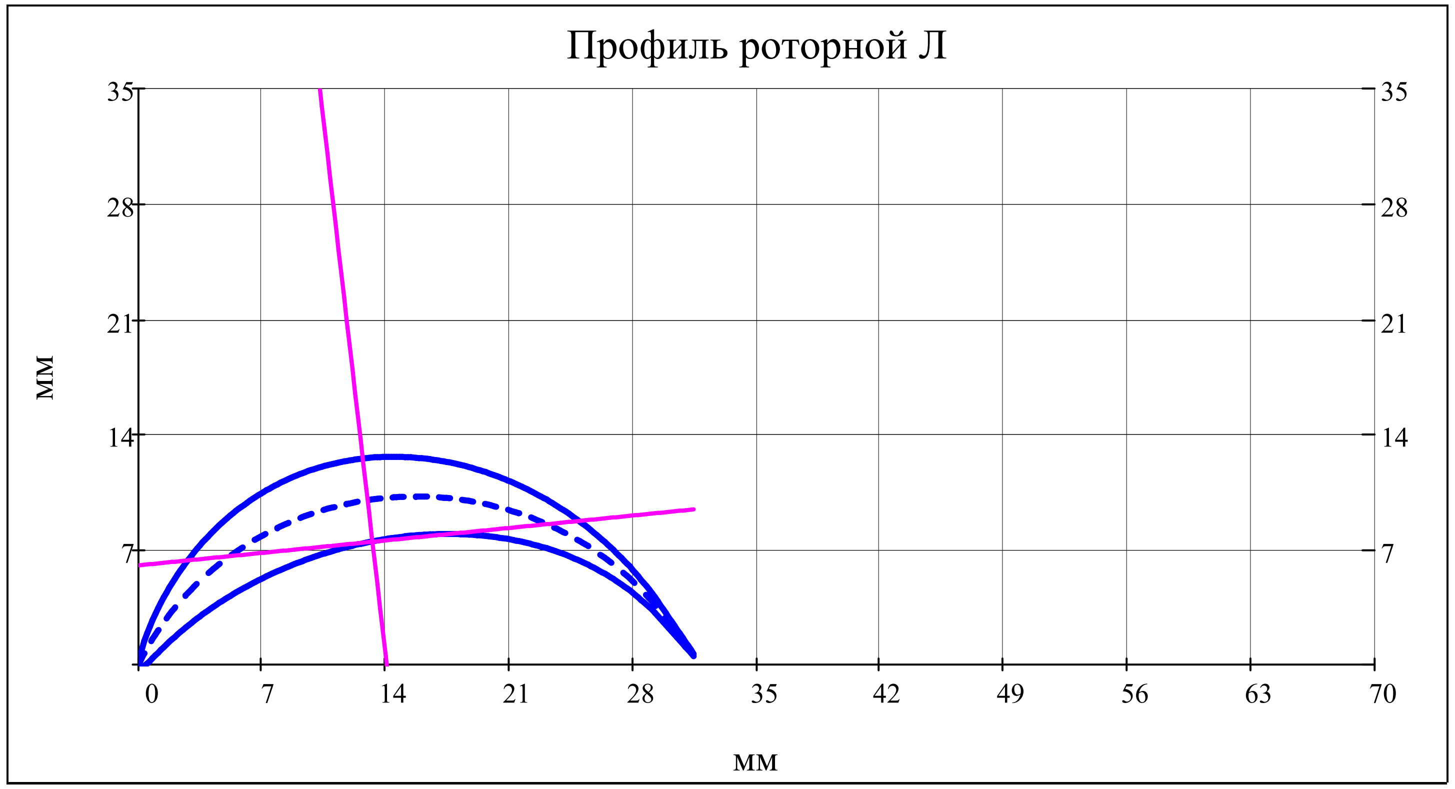
Профиль статорной Л
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм
мм



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

$r = N_r$





Построение профилей Л РК и НА

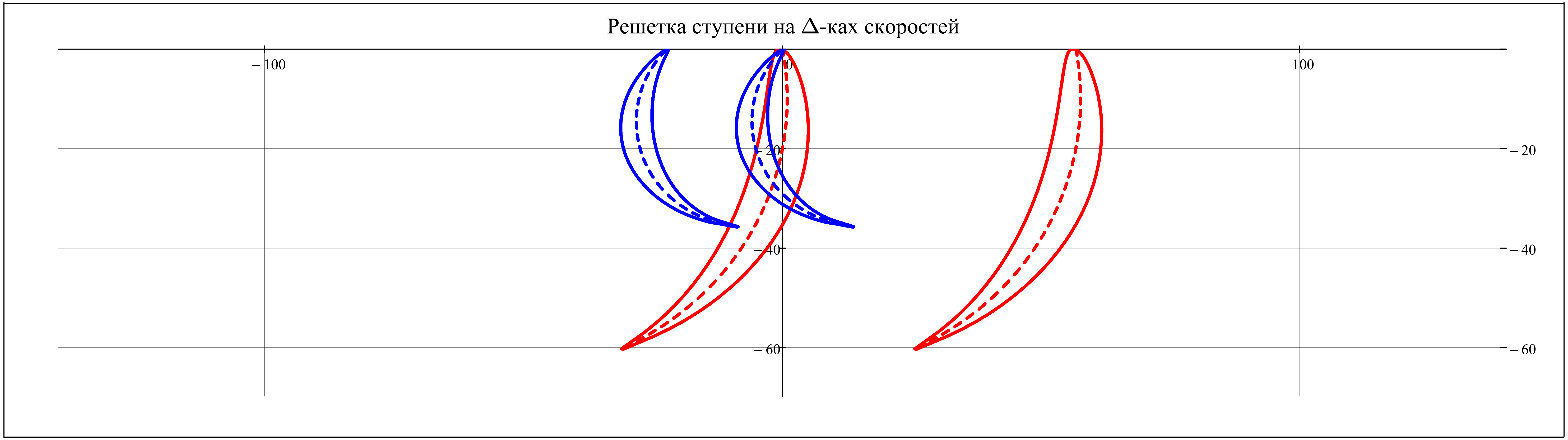
Вывод координат для построения профиля Л

Рассматриваемая ступень: $j := \begin{vmatrix} j \leftarrow Z \\ j \leftarrow \begin{vmatrix} \text{"Такой ступени не существует!"} & \text{if } (j < 1) \vee (j > Z) \\ j & \text{otherwise} \end{vmatrix} \end{vmatrix} = 1$

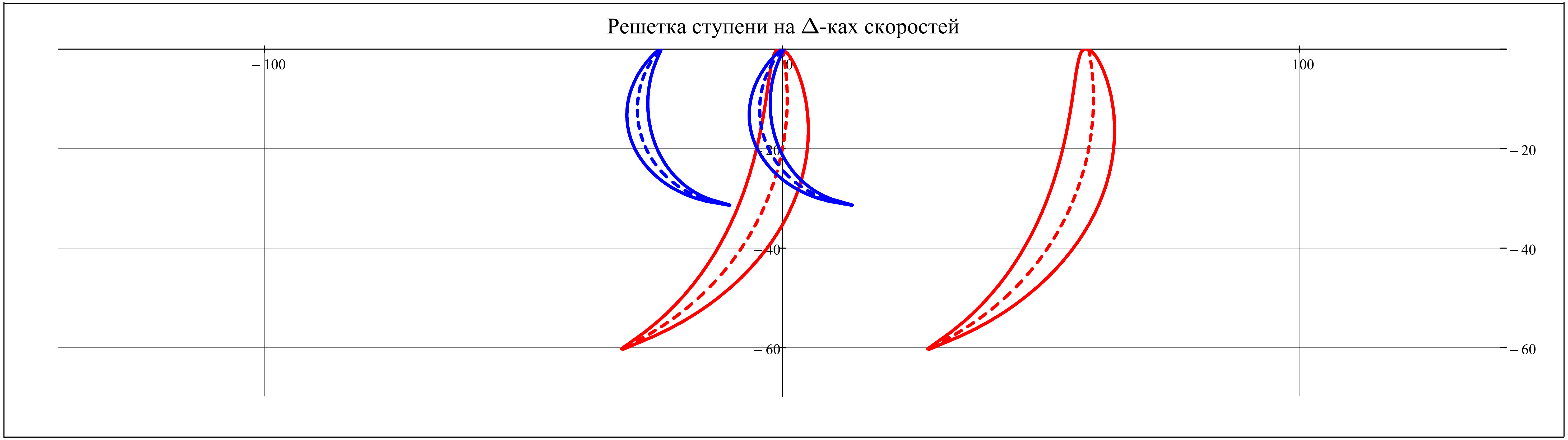
$$b_{lim} := \frac{\text{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j, N_r}}, chord_{stator_{j, N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

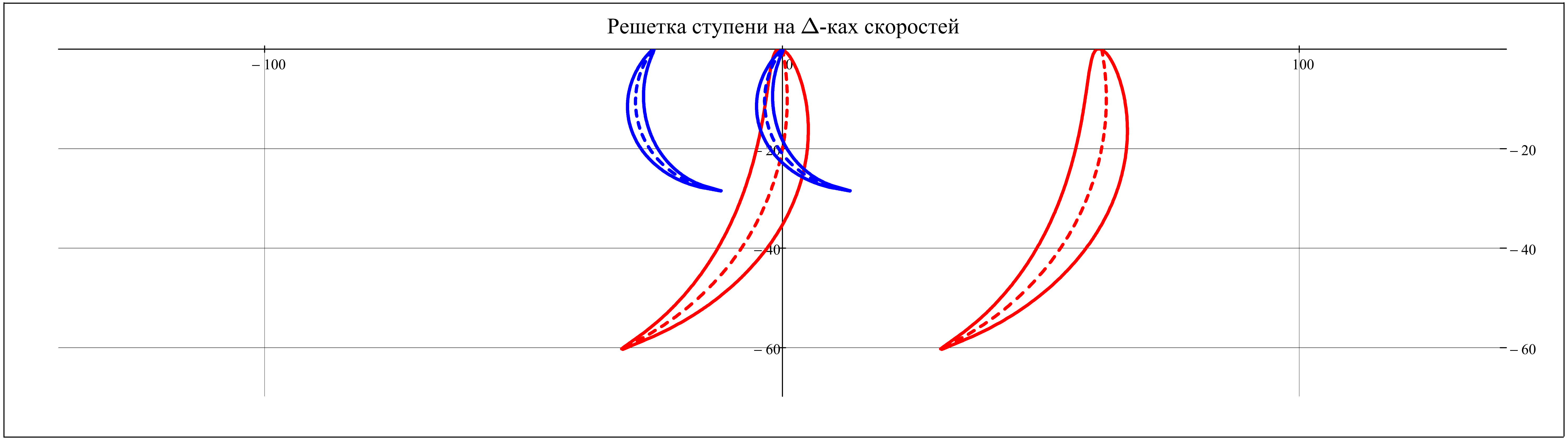
$r := 1$



$r = av(N_r)$



$r = N_r$



Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

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

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

Поперечная часть ступени

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

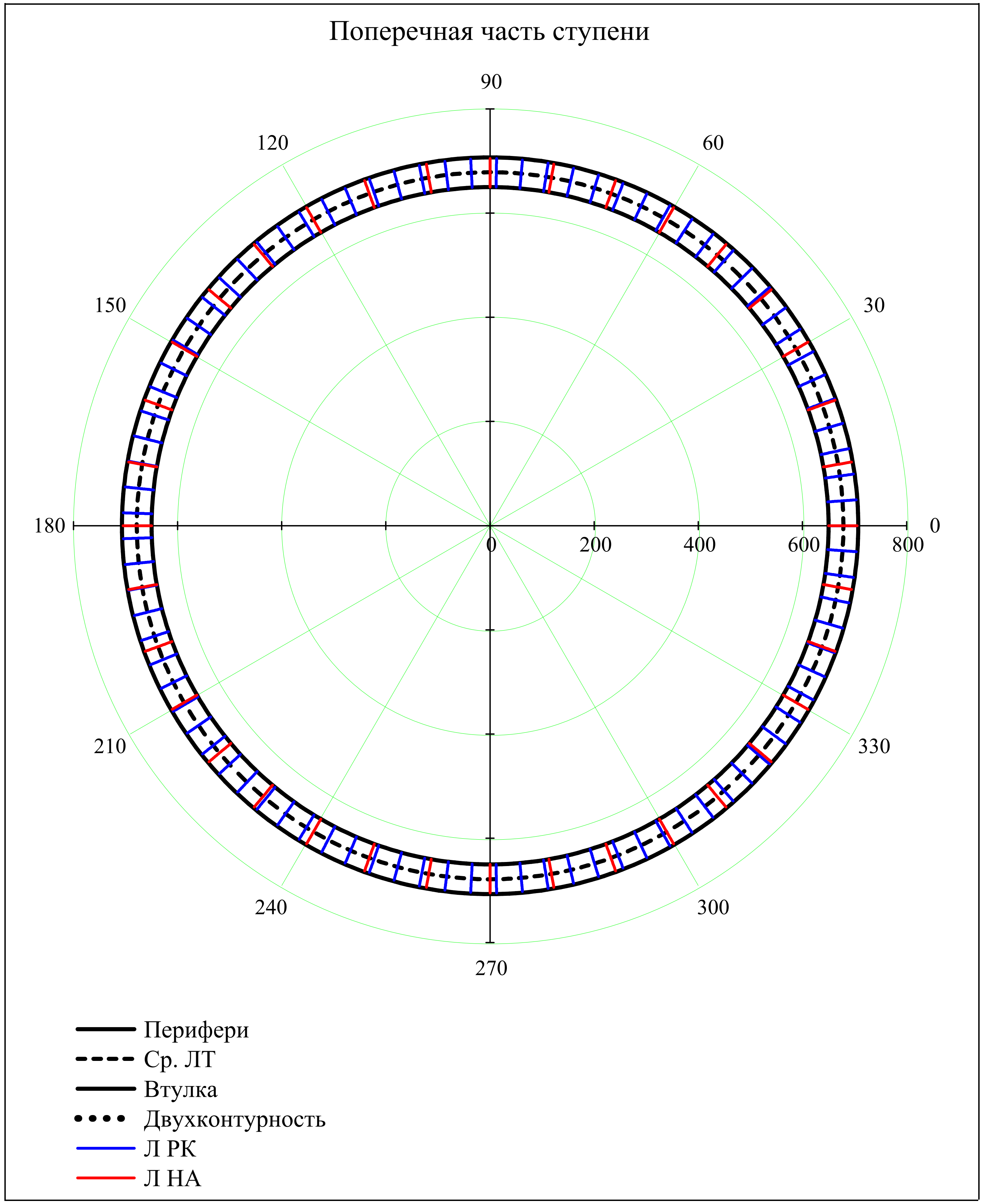
$$i_{rotor} := 1 .. Z_{rotor_j}$$

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

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

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

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



Поперечная часть ступени

Расчет собственных частот колебаний Л

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Расчет собственных частот колебаний Л

Вывод результатов расчета собственных частот колебаний Л

Расчетный узел: type = "turbine"

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

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

Расчет Л на прочность

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

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

Определение координат точек профиля Л, наиболее удаленных от НЛ

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$u\_u_{rotor}^T =$

	1
1	-0.218
2	0.395
3	-5.994

$\cdot 10^{-3}$

$v\_u_{rotor}^T =$

	1
1	5.323
2	4.047
3	13.959

$\cdot 10^{-3}$

$u\_l_{rotor}^T =$

	1
1	21.030
2	18.832
3	-8.994

$\cdot 10^{-3}$

$v\_l_{rotor}^T =$

	1
1	-11.789
2	-10.076
3	-17.325

$\cdot 10^{-3}$

$u\_u_{stator}^T =$

	1
1	-7.064
2	8.165
3	8.161

$\cdot 10^{-3}$

$v\_u_{stator}^T =$

	1
1	29.140
2	8.190
3	8.194

$\cdot 10^{-3}$

$u\_l_{stator}^T =$

	1
1	-11.363
2	-25.857
3	-25.850

$\cdot 10^{-3}$

$v\_l_{stator}^T =$

	1
1	-38.695
2	-14.465
3	-14.477

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

	1
1	-18.45
2	-8.87
3	0.00

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

	1
1	40.41
2	21.85
3	0.00

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

	1
1	0.00
2	3.47
3	13.87

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

	1
1	0.00
2	-7.07
3	-28.26

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

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

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

	1
1	161.59
2	101.72
3	0.00

$\cdot 10^6$

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

	1
1	0.00
2	5.61
3	16.44

$\cdot 10^6$

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

$safety_{rotor}{}^T =$

	1
1	1.27
2	2.02
3	000000000000000000000000000000000

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

	1
1	0
2	1
3	1

$safety_{stator}{}^T =$

	1
1	000000000000000000000000000000000
2	36.53
3	12.47

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

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

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

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

$\cdot 10^{-3}$

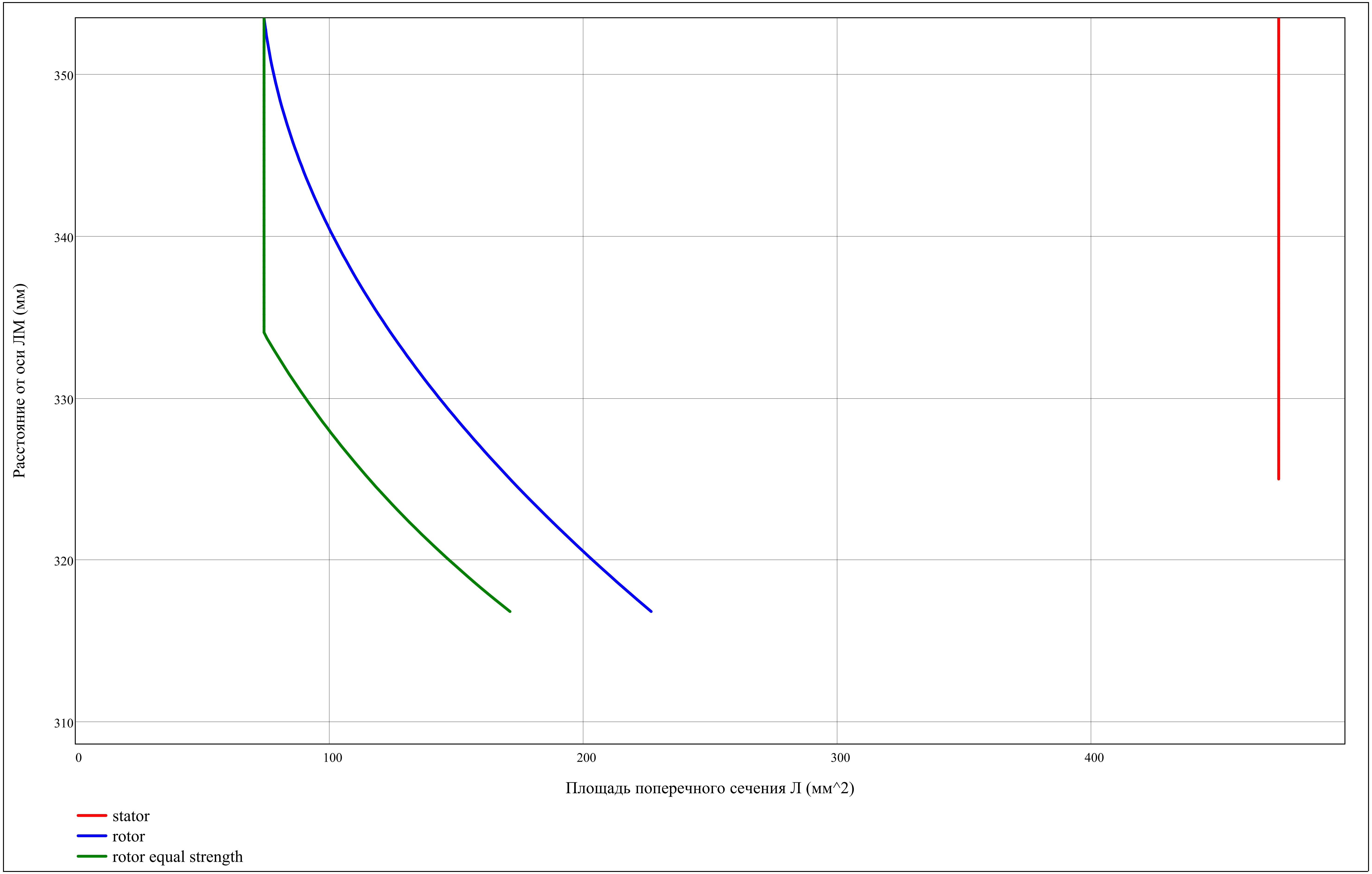
Дискретизация по высоте Л:

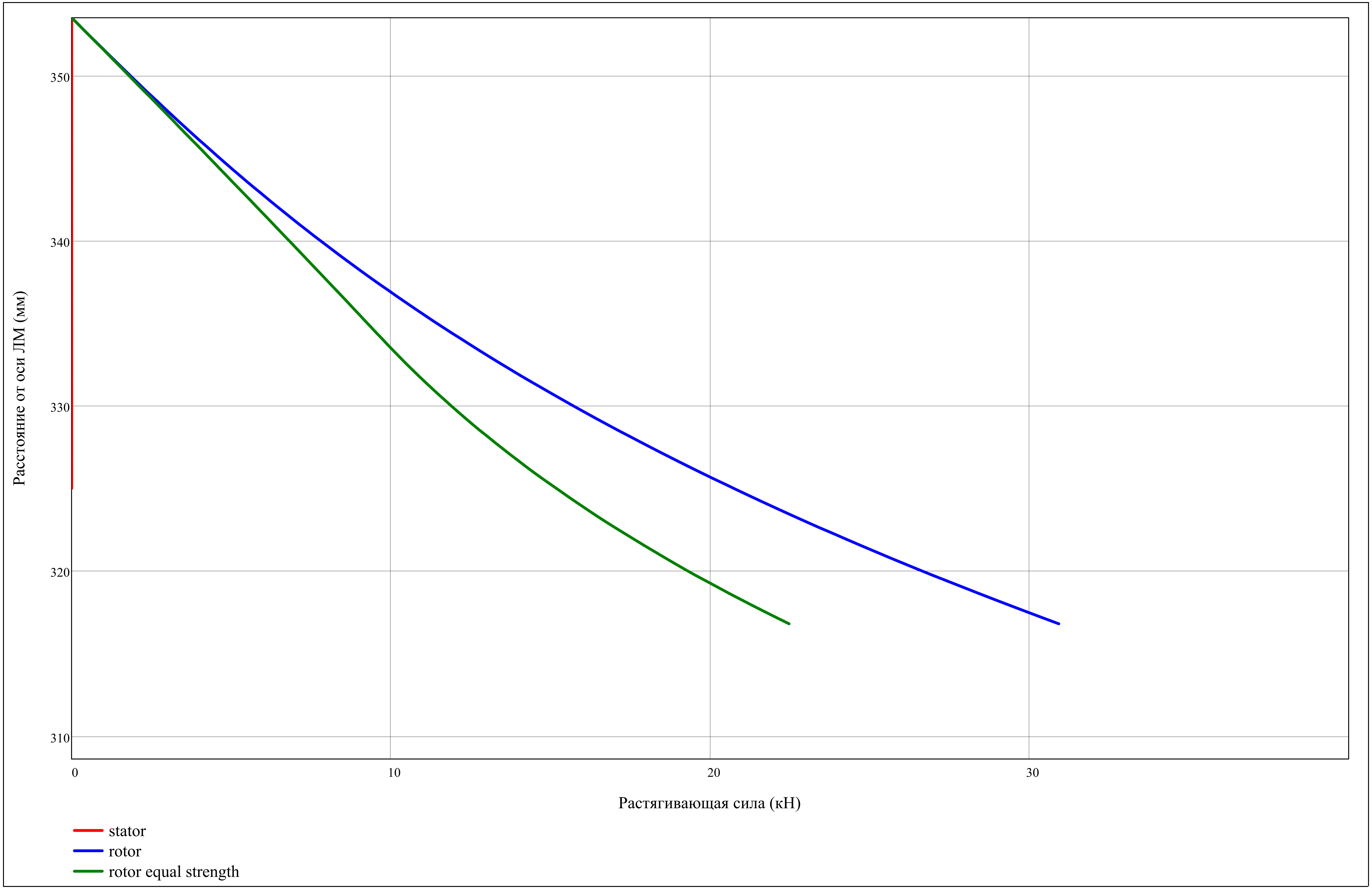
$$z := \min(Rj), \min(Rj) + \frac{\max(Rj) - \min(Rj)}{100} .. \max(Rj)$$

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

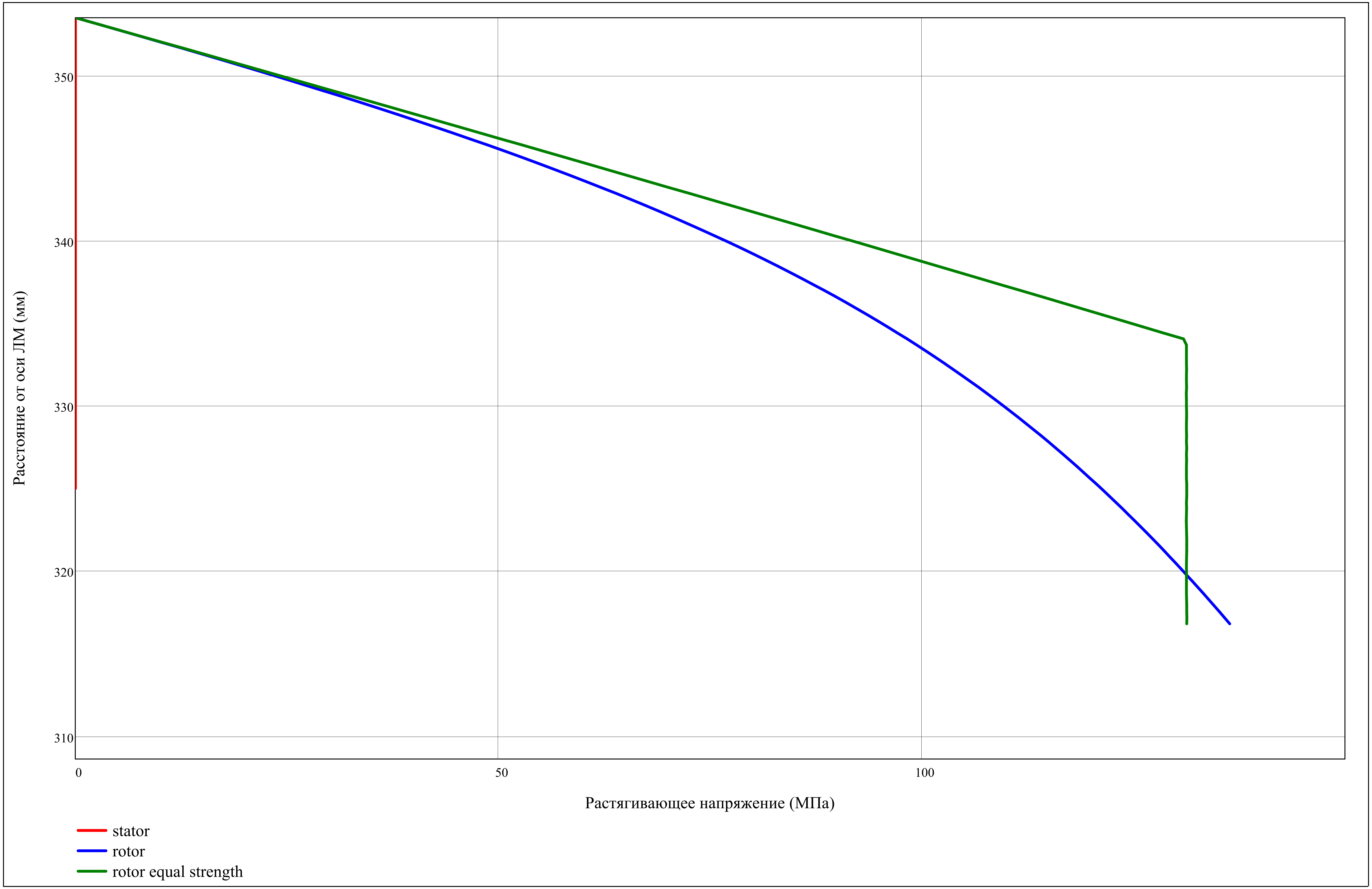
$$z_{stator} := \left| \begin{array}{l} \mathrm{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}), \mathrm{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}) + \dfrac{\mathrm{mean}(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}) - \mathrm{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1})}{100} .. \mathrm{mean}(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}) \text{ if } type = \text{"compressor"} \\ \mathrm{mean}(Rj_{1,1},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

Результаты расчета на прочность Л

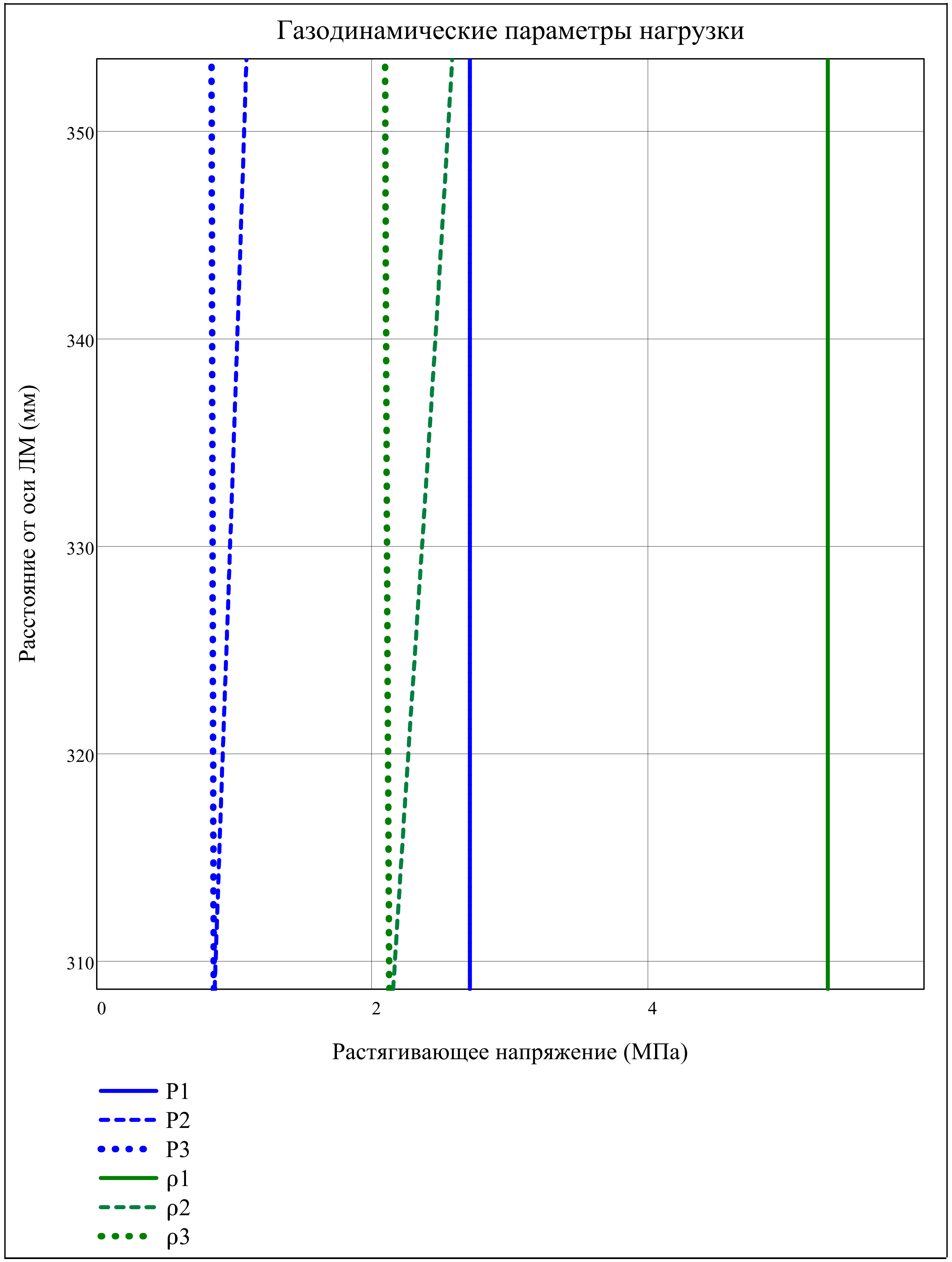

350
340
330
320
310
0
100
200
300
400
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength

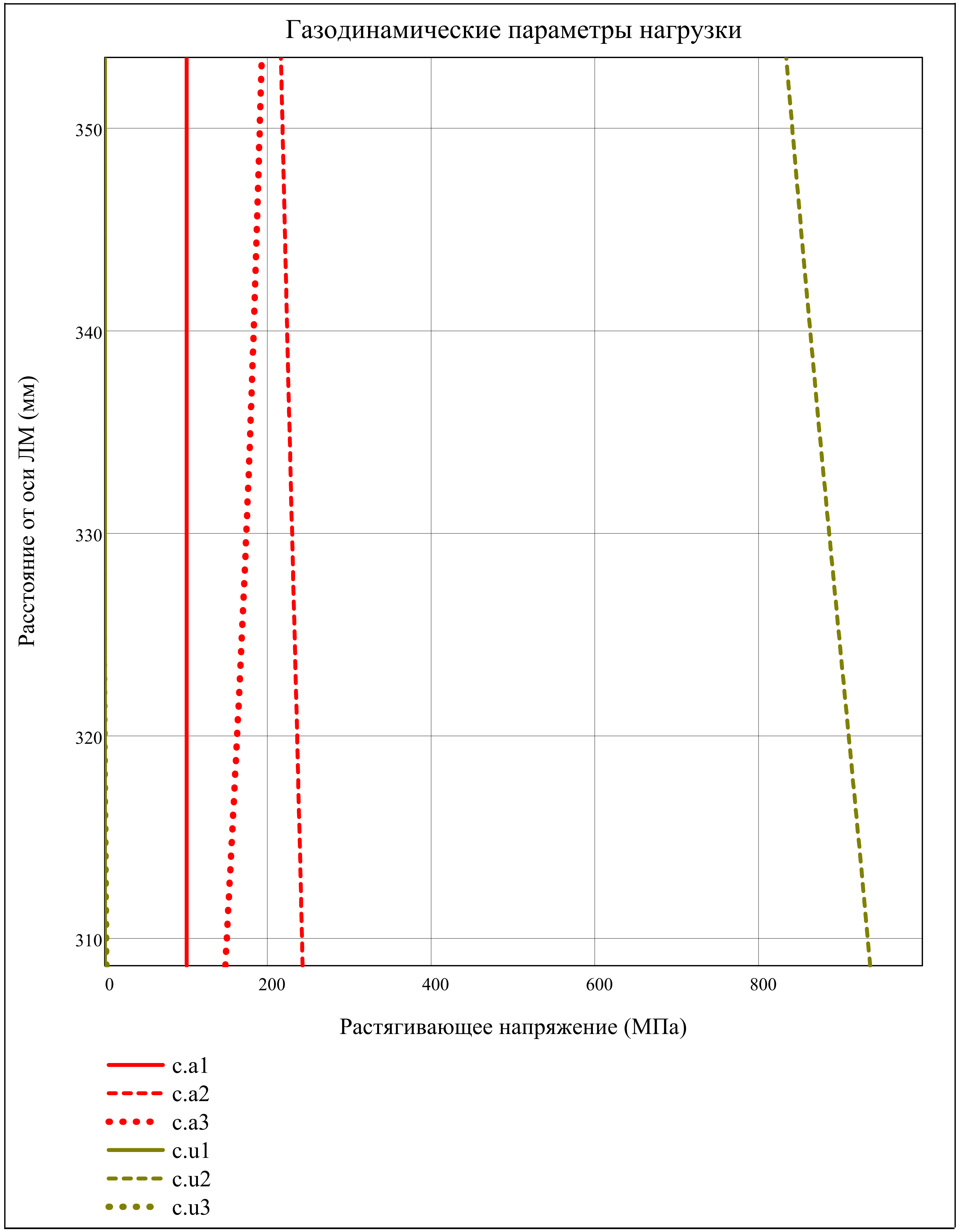


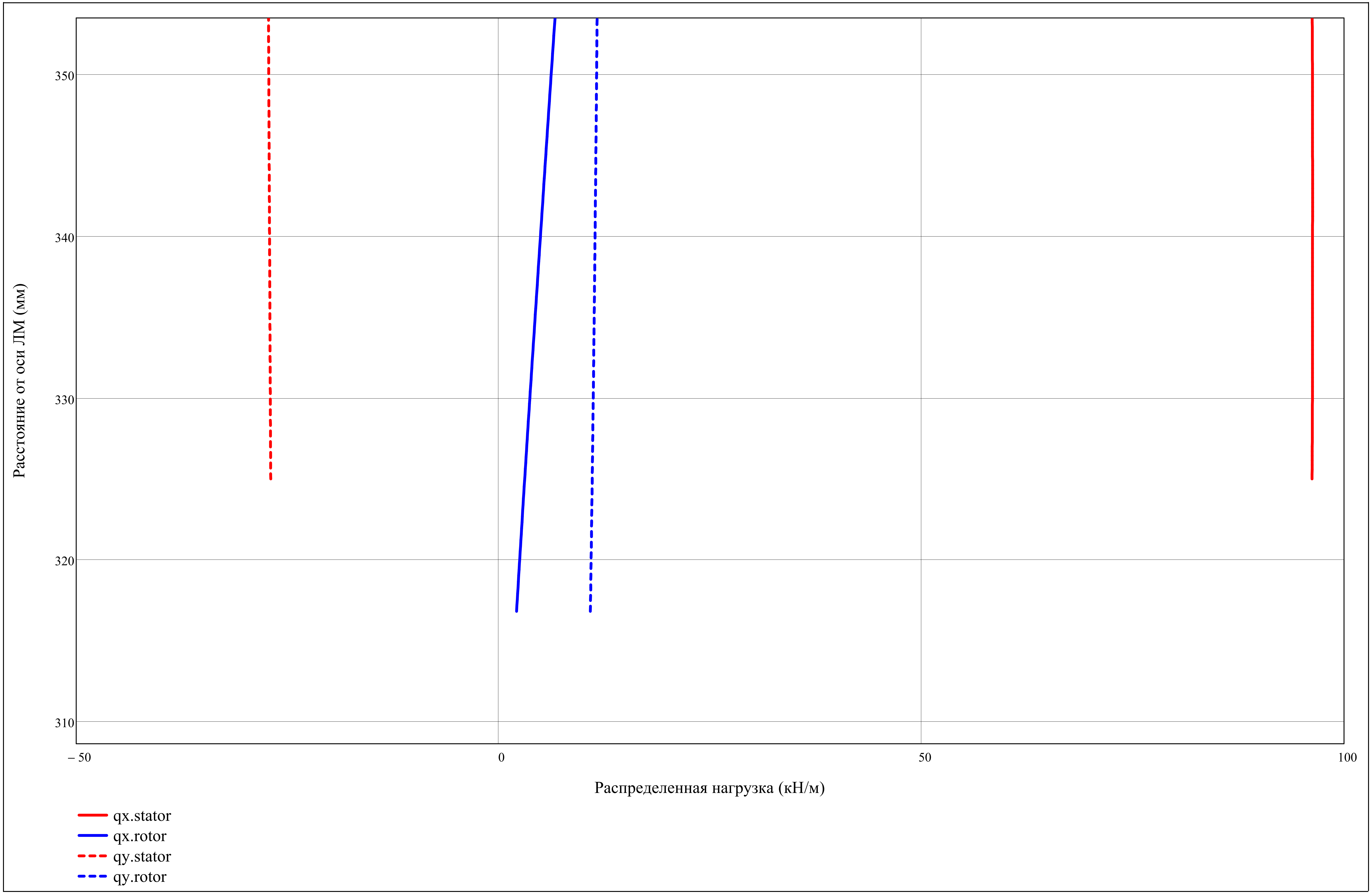
350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
10
20
30
Растягивающая сила (кН)
stator
rotor
rotor equal strength



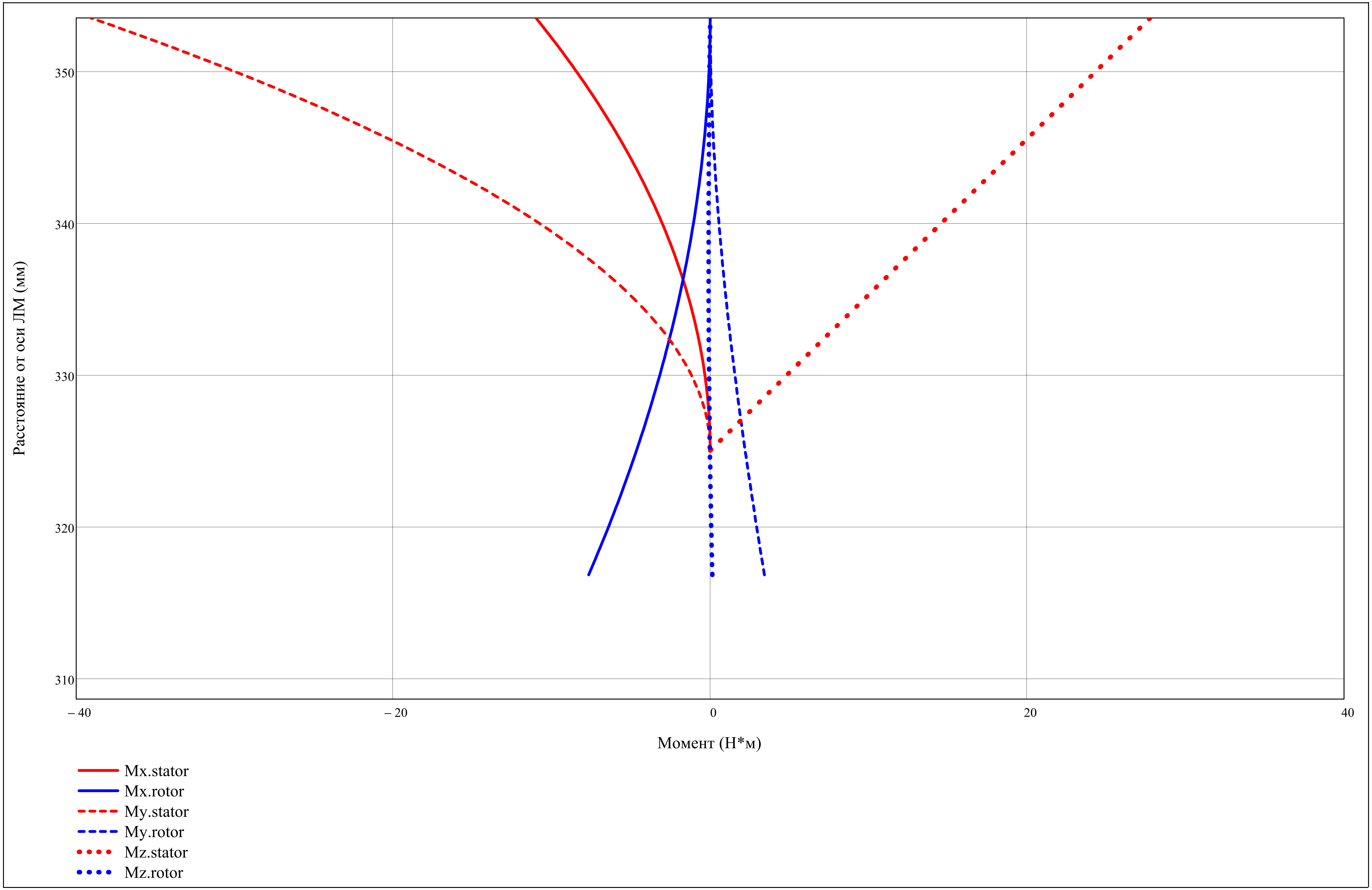
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
50
100
Растягивающее напряжение (МПа)
stator
rotor
rotor equal strength


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

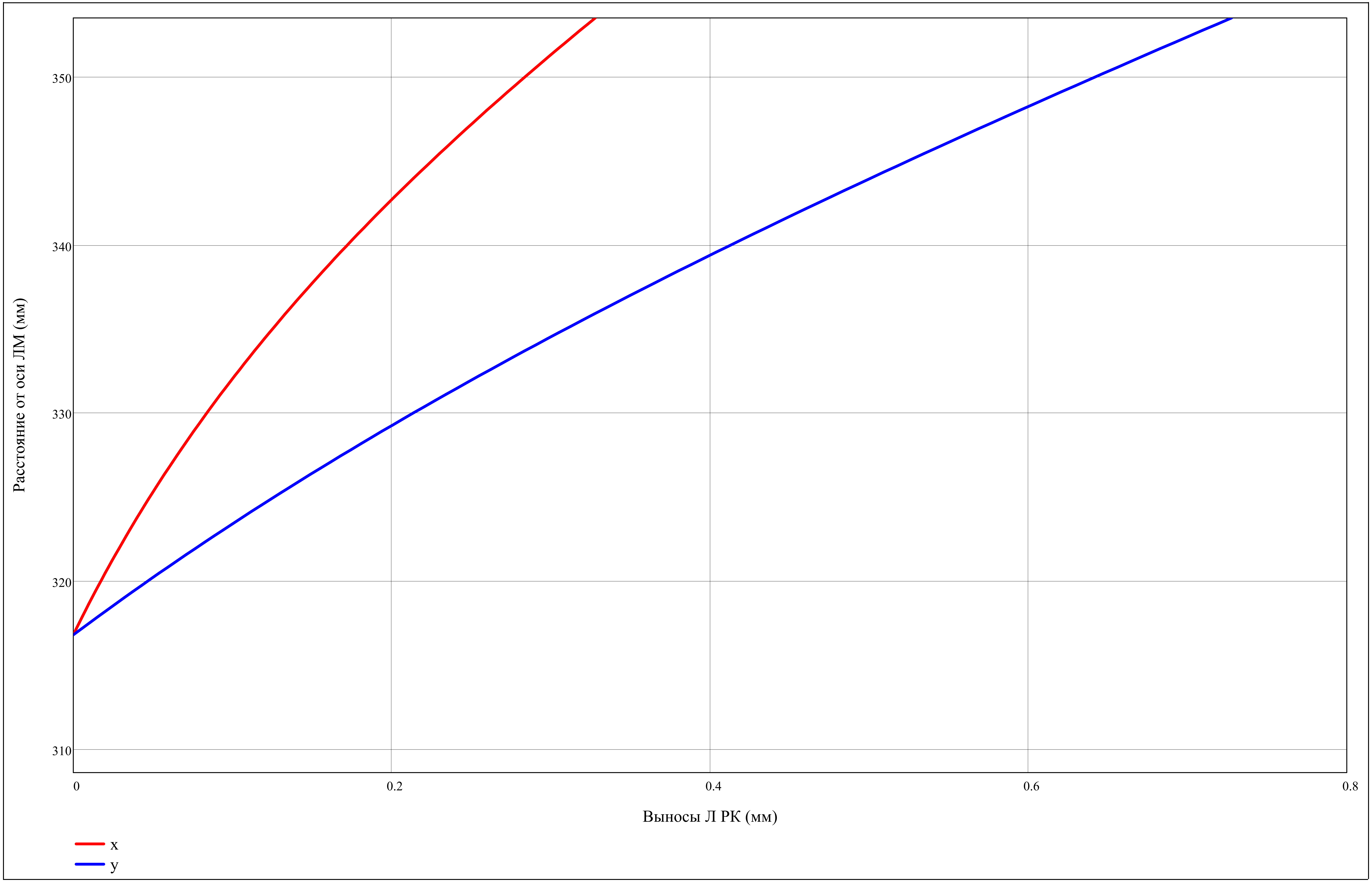

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
310
320
330
340
350
0
200
400
600
800
Растягивающее напряжение (МПа)
c.a1
c.a2
c.a3
c.u1
c.u2
c.u3



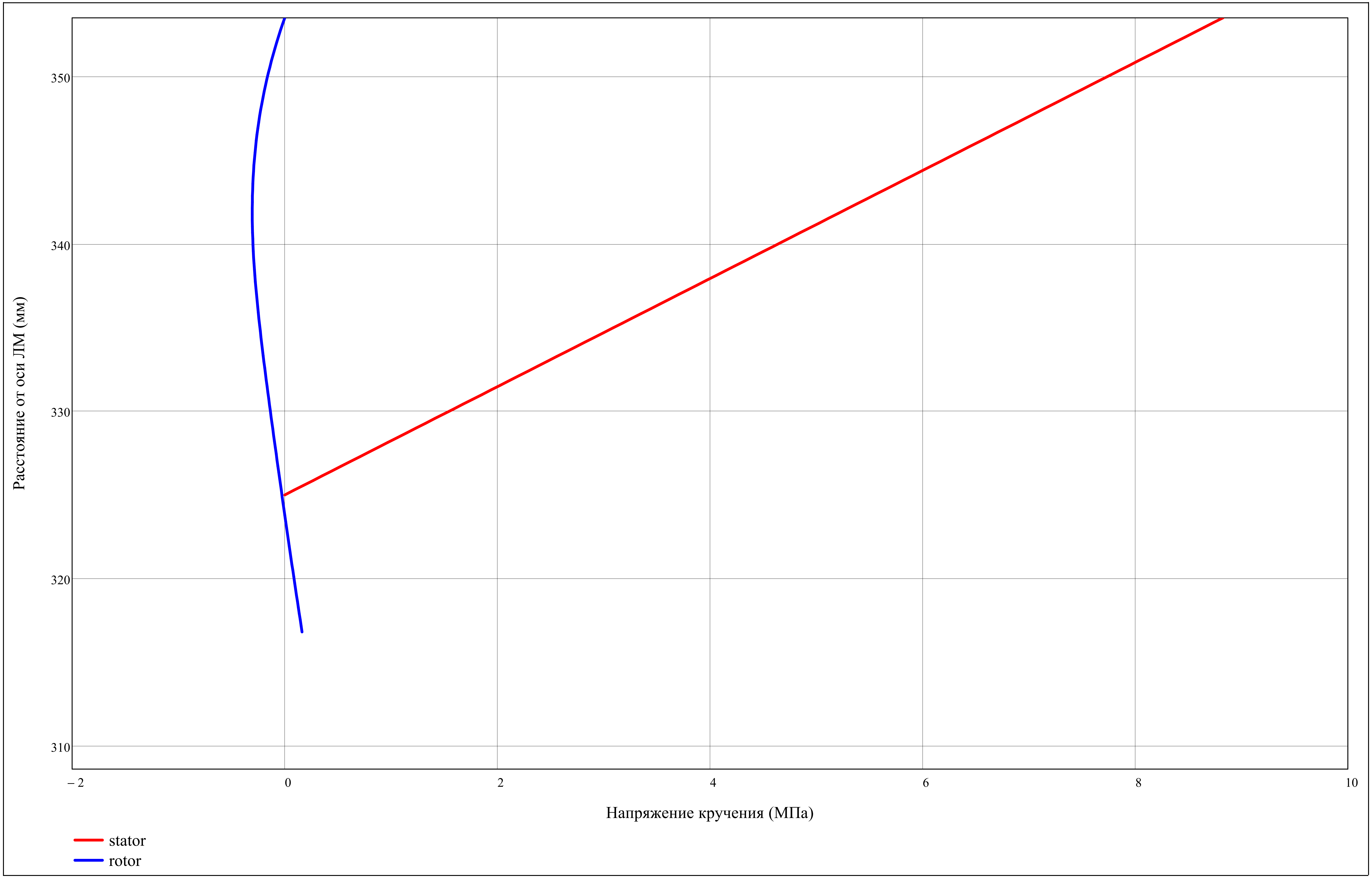
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 50
0
50
100
Распределенная нагрузка (кН/м)
qx.stator
qx.rotor
qy.stator
qy.rotor



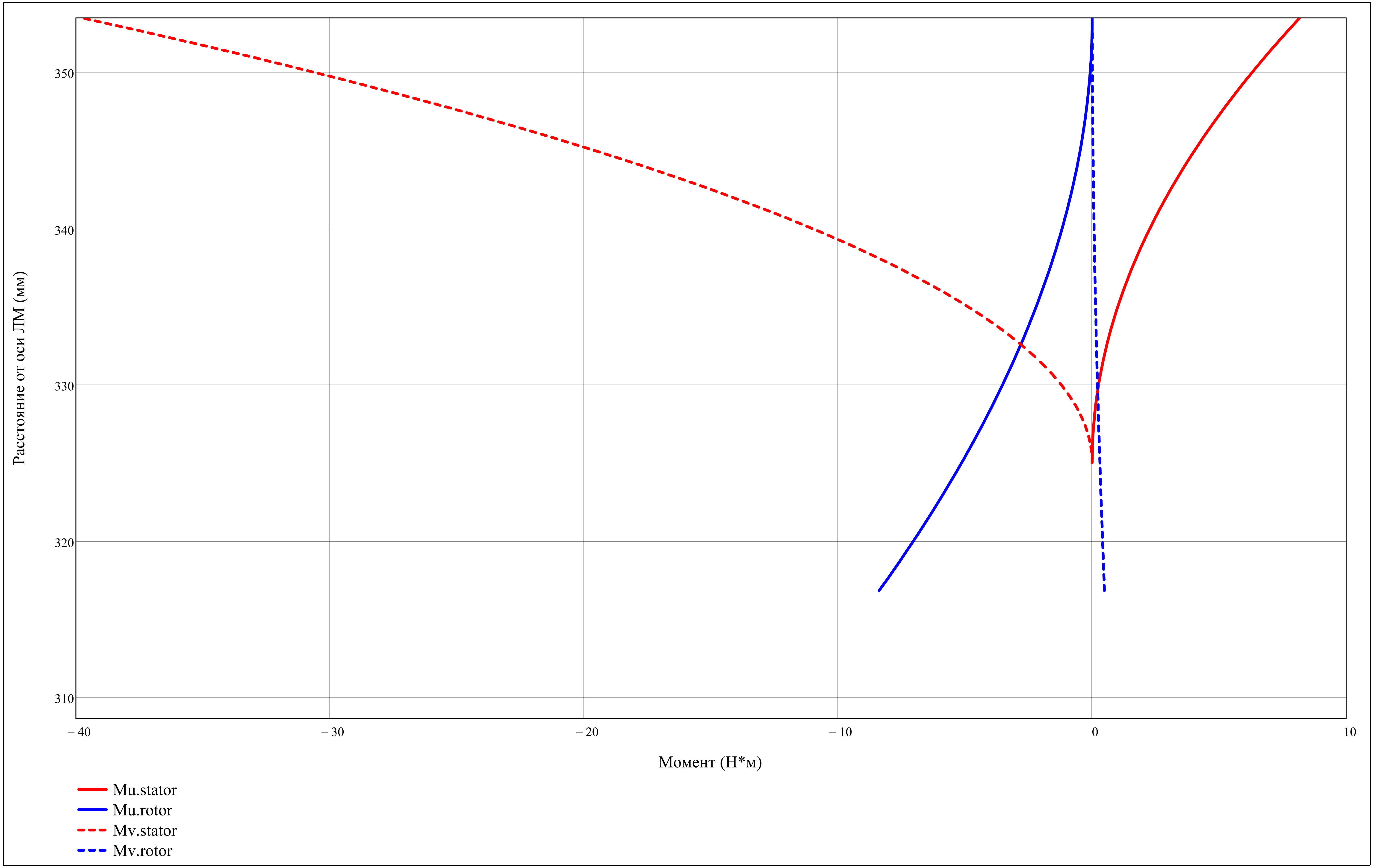
350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 40
– 20
0
20
40
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor



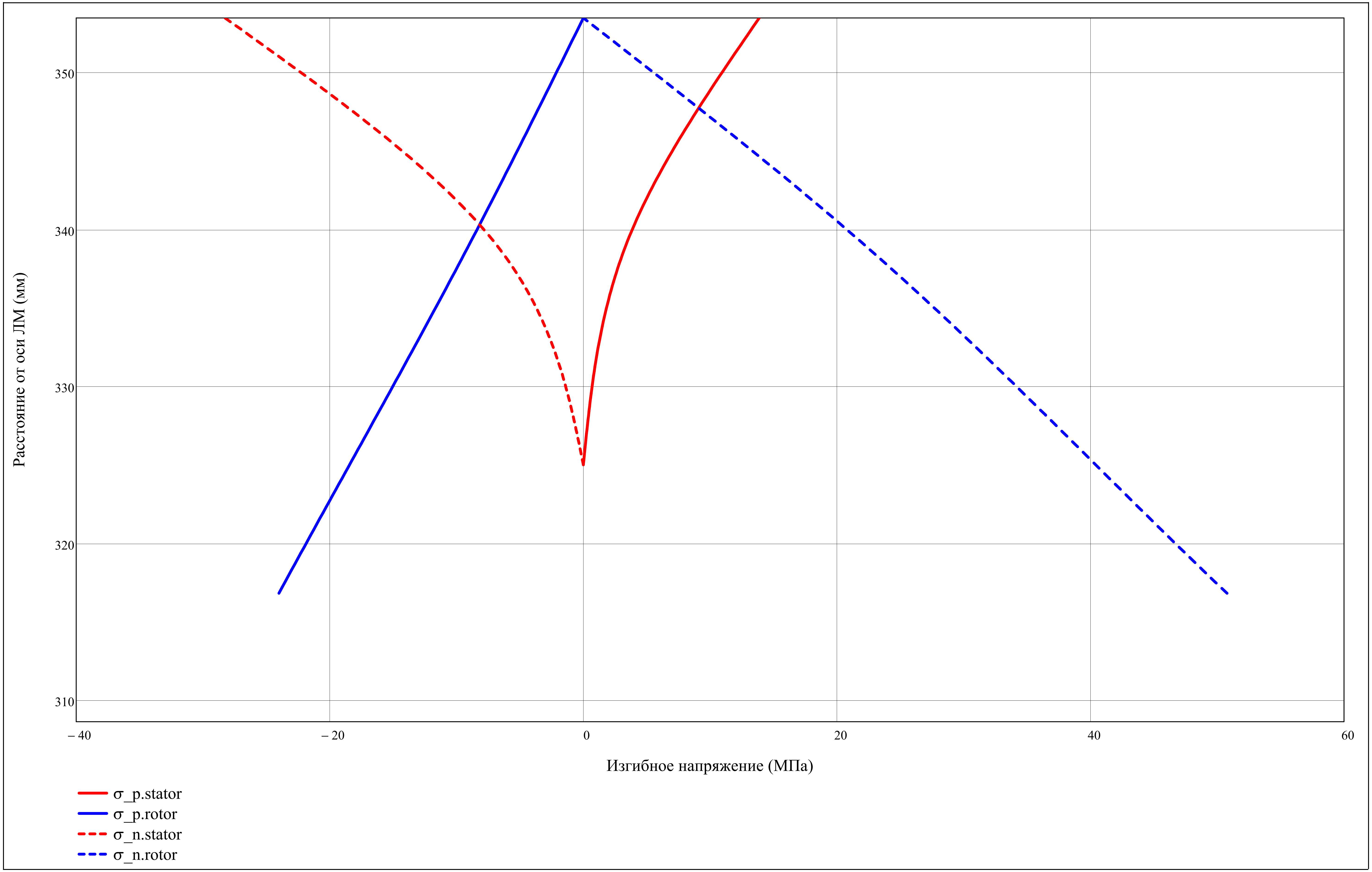
350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
Выносы Л РК (мм)
x
y



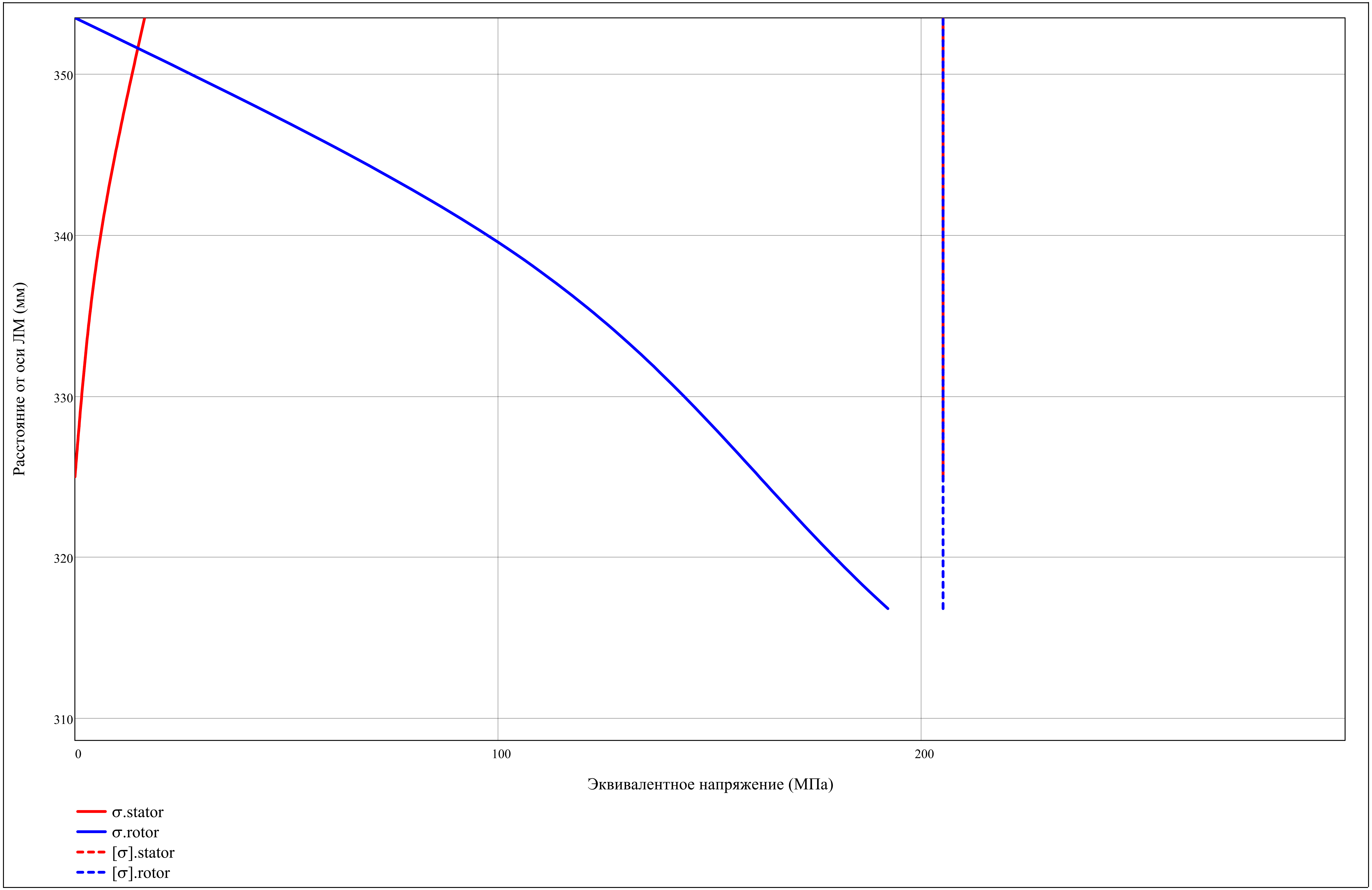
350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 2
0
2
4
6
8
10
Напряжение кручения (МПа)
stator
rotor



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



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



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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

	1	2
1	0.40	4.05
2	18.83	-10.08
3	8.16	8.19
4	-25.86	-14.47

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-8.9	3.5
2	21.9	-7.1

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	5.6
2	101.7

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

	1
1	36.526
2	2.015

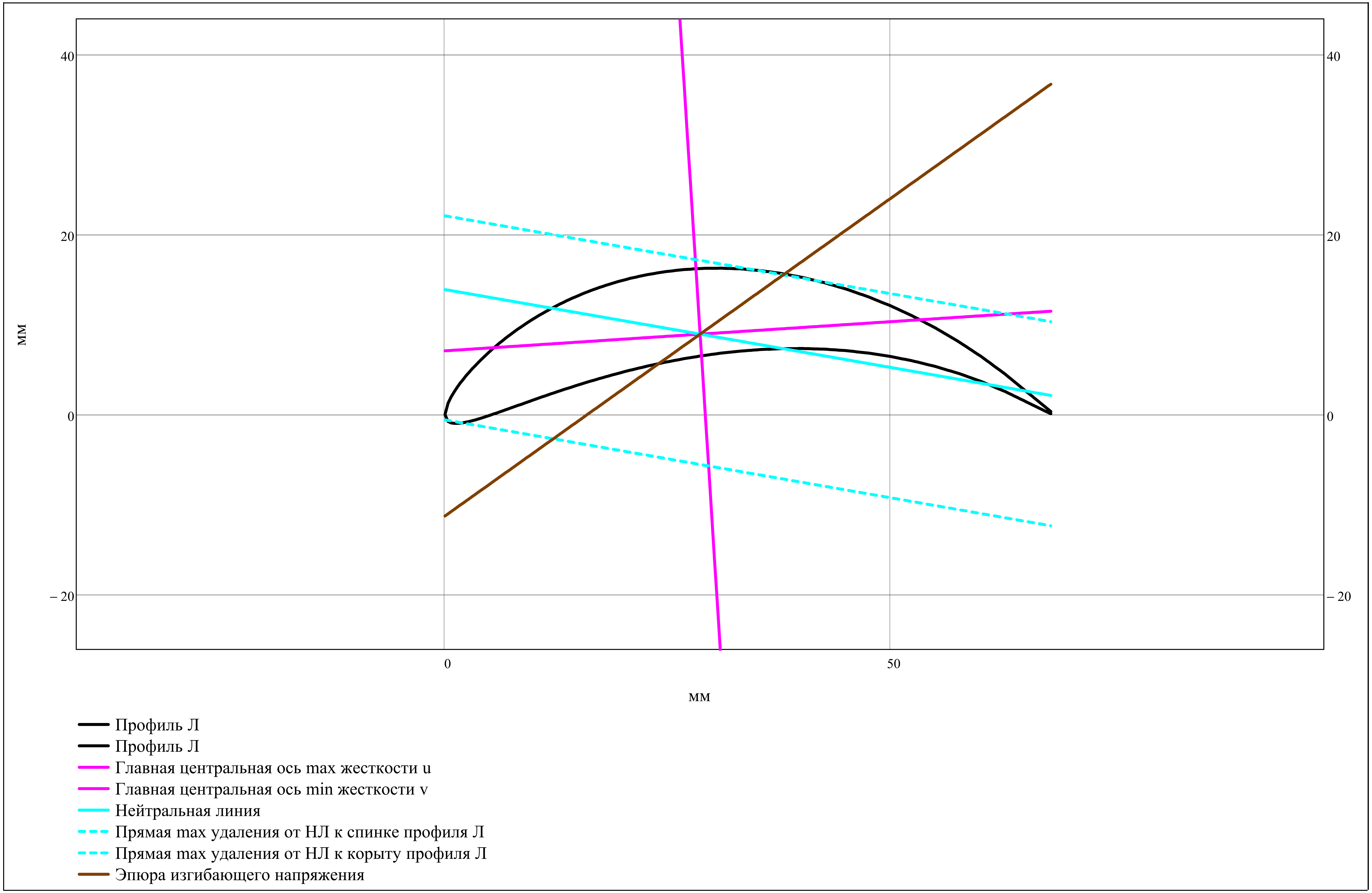
$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \cdot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

	1
1	8.190
2	-14.465

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

	1
1	28.623
2	8.931

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



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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

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

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	0.0	13.9
2	0.0	-28.3

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	16.4
2	0.0

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	12.470
2	)00000000000000000000000000000000.0

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

	1
1	8.194
2	-14.477

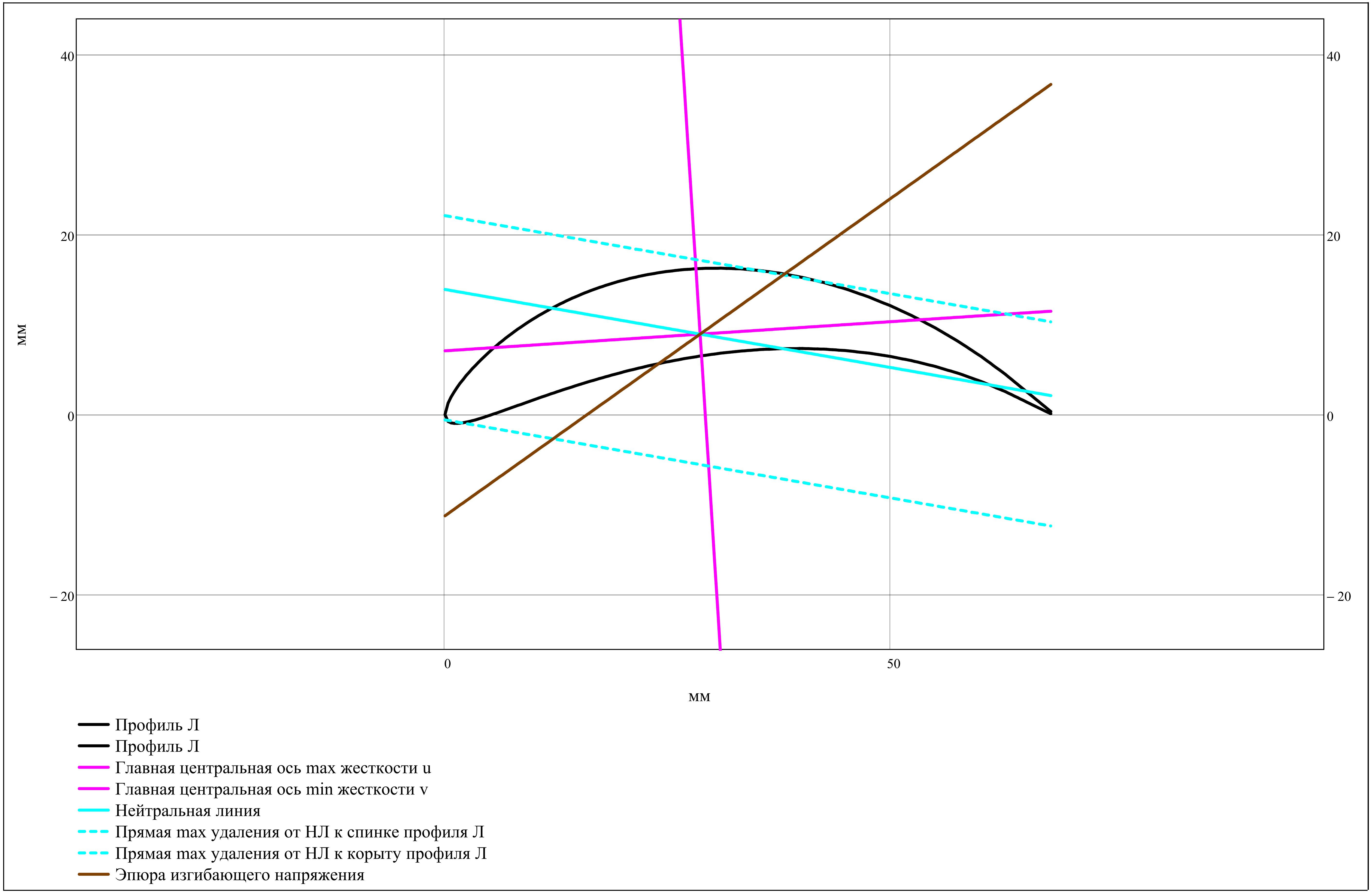
$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	28.623
2	8.931

$\cdot 10^{-3}$

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



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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

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

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-18.4	0.0
2	40.4	0.0

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	0.0
2	161.6

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	)0000000000000000000000000000000.C
2	1.269

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

	1
1	5.323
2	-11.789

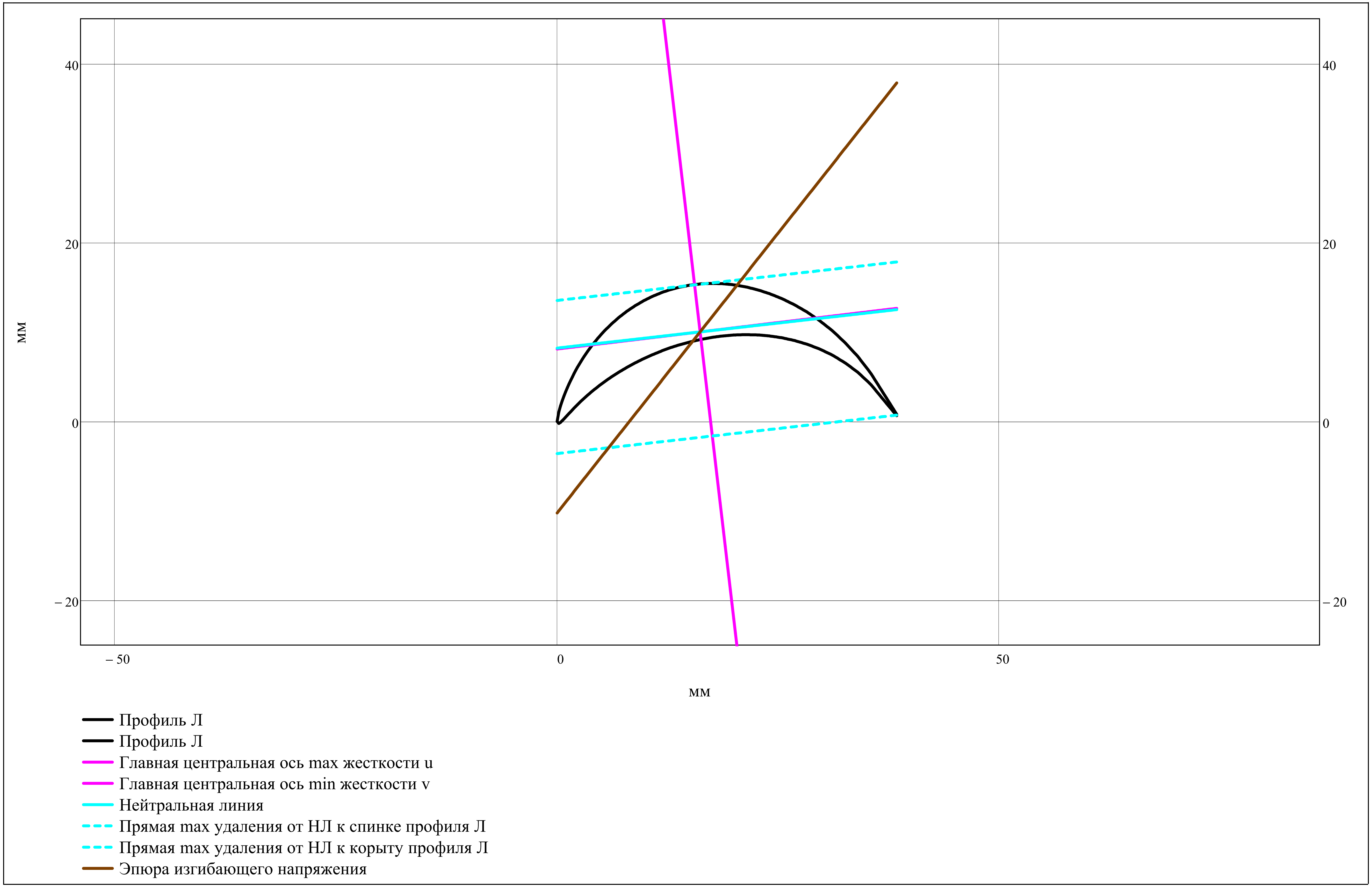
$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	16.158
2	10.001

$\cdot 10^{-3}$

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


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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

	1	2
1	0.40	4.05
2	18.83	-10.08
3	8.16	8.19
4	-25.86	-14.47

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-8.9	3.5
2	21.9	-7.1

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	5.6
2	101.7

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	36.526
2	2.015

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

	1
1	4.047
2	-10.076

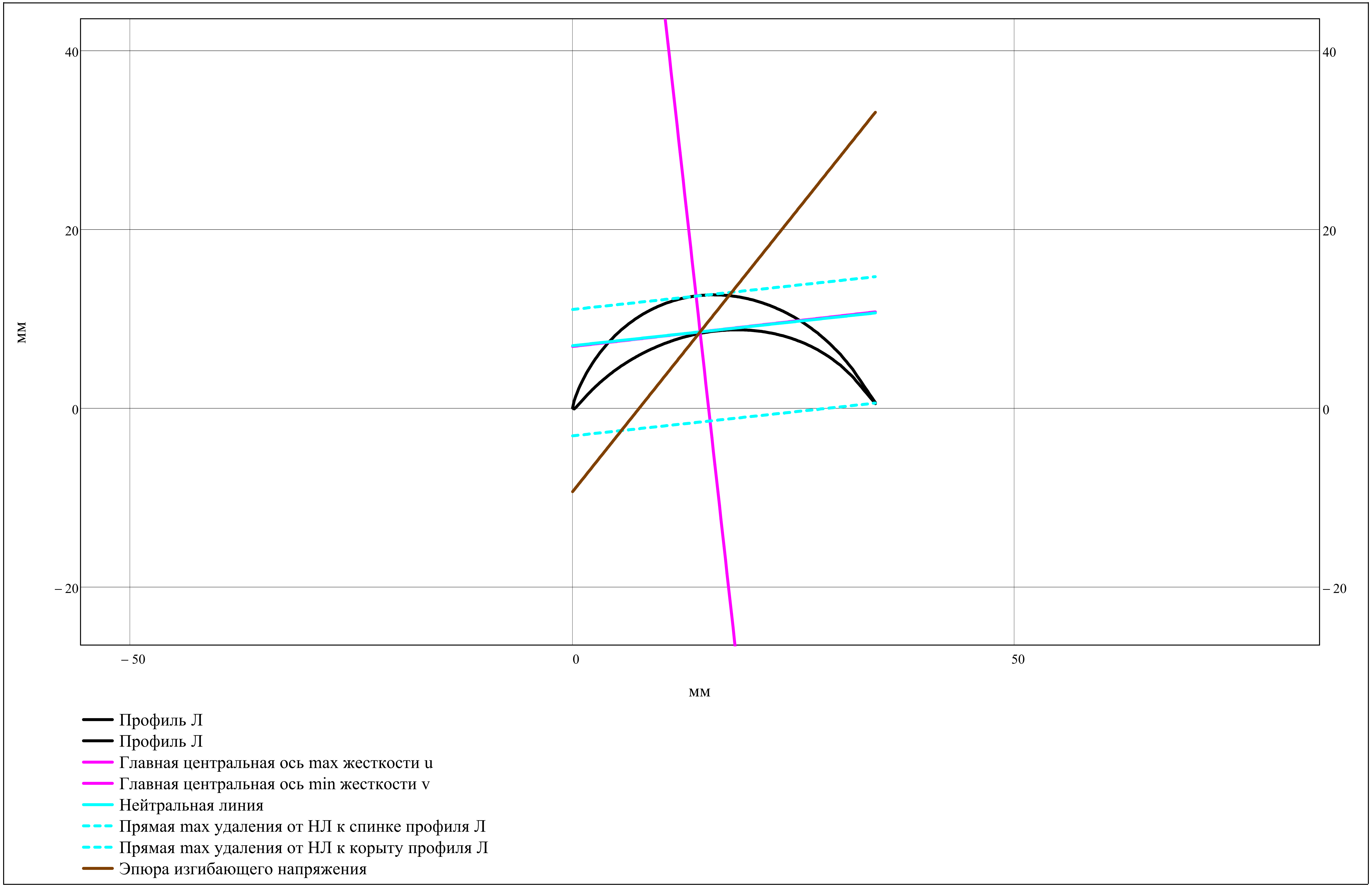
$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	14.401
2	8.496

$\cdot 10^{-3}$

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



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

Плотность материала Д (кг/м^3):

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

Предел длительной прочности Д (Па):

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

$material\_disk^T =$

	1
1	"ВЖ175"

$\rho\_disk^T =$

	1
1	8266

$\sigma\_disk\_long^T =$

	1
1	620

$\cdot 10^6$

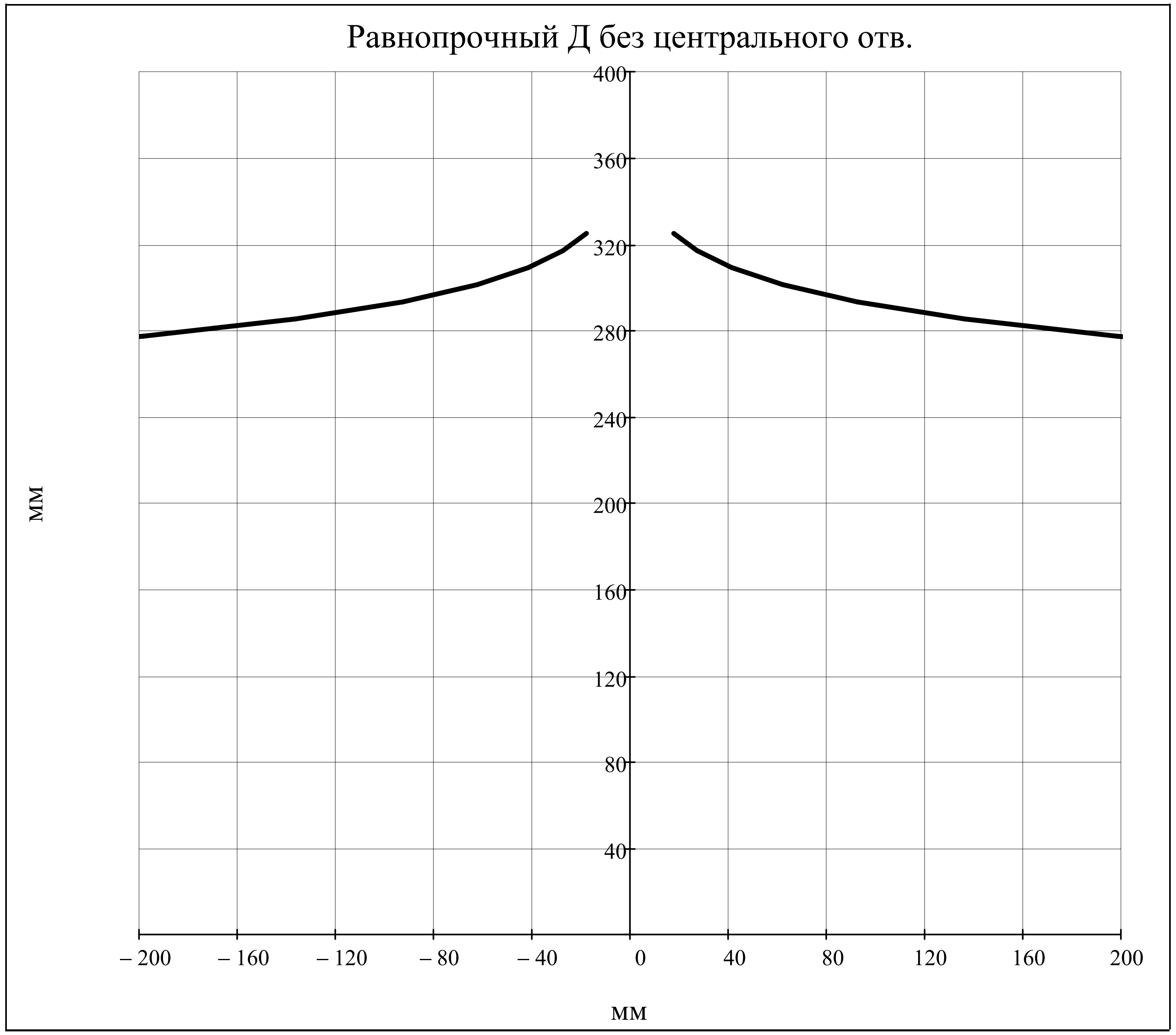
Выбор материала Д

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

Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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



Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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

На тепловую раскрутку: $$\Delta T_{раскрутка} = \left| \begin{array}{ll} 0 & \text{if } type = \text{"stator"} \\ 100 & \text{otherwise} \end{array} \right. = 0.0$$

Степень окружной неравномерности: $\delta_{окр\_неравномерность} = 0.25$

Толщина стенки Л [м]: $\delta_{ст} = 1 \cdot 10^{-3}$

Ширина охл. канала дефлектора Л [м]: $\Delta_{дефлектор} = 0.3 \cdot 10^{-3}$

Ширина канала выходного участка [м]: $\Delta_{охл.вых} = 0.5 \cdot 10^{-3}$

Длина выходного участка [м]: $L_{вых.уч} = 2 \cdot 10^{-3}$

Коэф. теплопроводности стенки Л [Вт/м/К]: $\lambda_{ст} = 20$

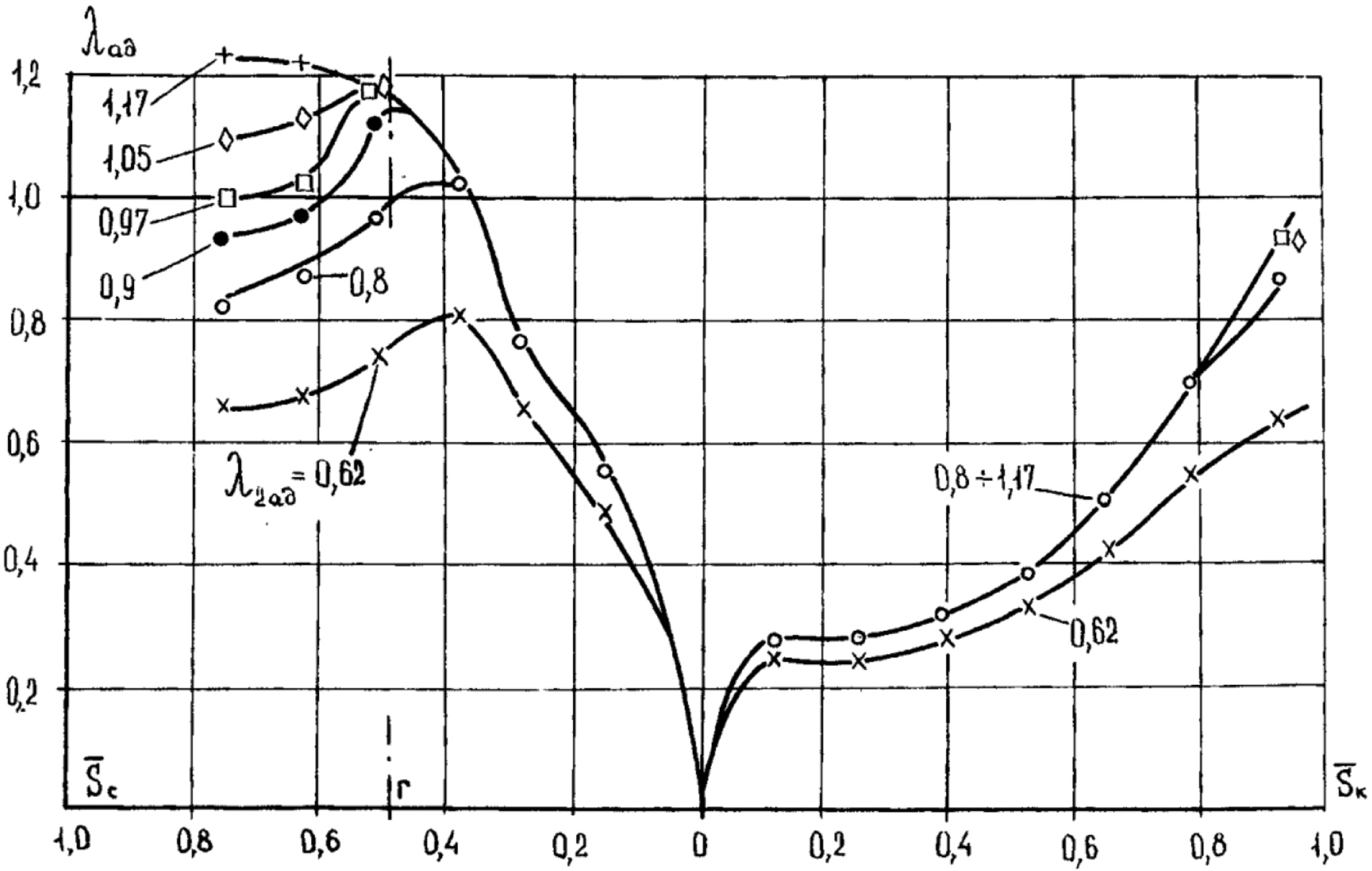
Толщина ТЗП [м]: $\delta_{ТЗП} = 0.15 \cdot 10^{-3}$ $0.1 \cdot 10^{-3} \le \delta_{ТЗП} \le 0.3 \cdot 10^{-3} = 1$

Коэф. теплопроводности ТЗП [Вт/м/К]: $\lambda_{ТЗП} = 3.5$

Коэф., отражающий влияние температурных факторов:
Коэф., учитывающий влияние кривизны канала:
Коэф., учитывающий относительную длинну канала:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_t \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.985 \\ 0.99 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Материал	$\sigma_в$, МПа, при T, К	$T_{плав}$, К	ρ, кг/м^3	$E \cdot 10^{-5}$, МПа при 1260 К	$\alpha \cdot 10^6$, 1/К	λ, Вт/м·К
Si_3N_4, горяче-пресс.	180 (1470 К)	2170	3200	2,9	2,3 (300–1270К)	18
Si_3N_4, спеченный	123... 240 (1293 К)	2520	3120	2,0	4,8 (300-1270 К)	22
SiC	420 (1800 К)	2870	3040	3,94 (300 К)	5,2 (300–1270 К)	16,7 (470–1670 К)
ZrO_2	600 (1070 К)	2640	5700	2,0	9,8	3,5 (1670 К)
Al_2O_3	265 (1500 К) 10 (1870 К)	2320	3990	4,2 (300 К)	7,5 (1270–1870К)	5,2 (1670 К)
$Al_2O_3 + Si_3N_4$	2000 (300 К)	1750	2500	2,5 (300 К)	3,0 (300 К)	20 (300 К)
Ni+37%Cr+1%W+1%Ti (для сравнения)	400 (1070 К)	не более 1700	8800	2,18	16 (1070 К)	25,5 (1070 К)



$\lambda_{aд}$
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
1,17
1,05
0,97
0,9
0,8
$\lambda_{2aд}=0,62$
0,8÷1,17
0,62
$\bar{S}_c$
$\bar{S}_к$
г
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0

с. 49

Распределение относ. скорости по Л:

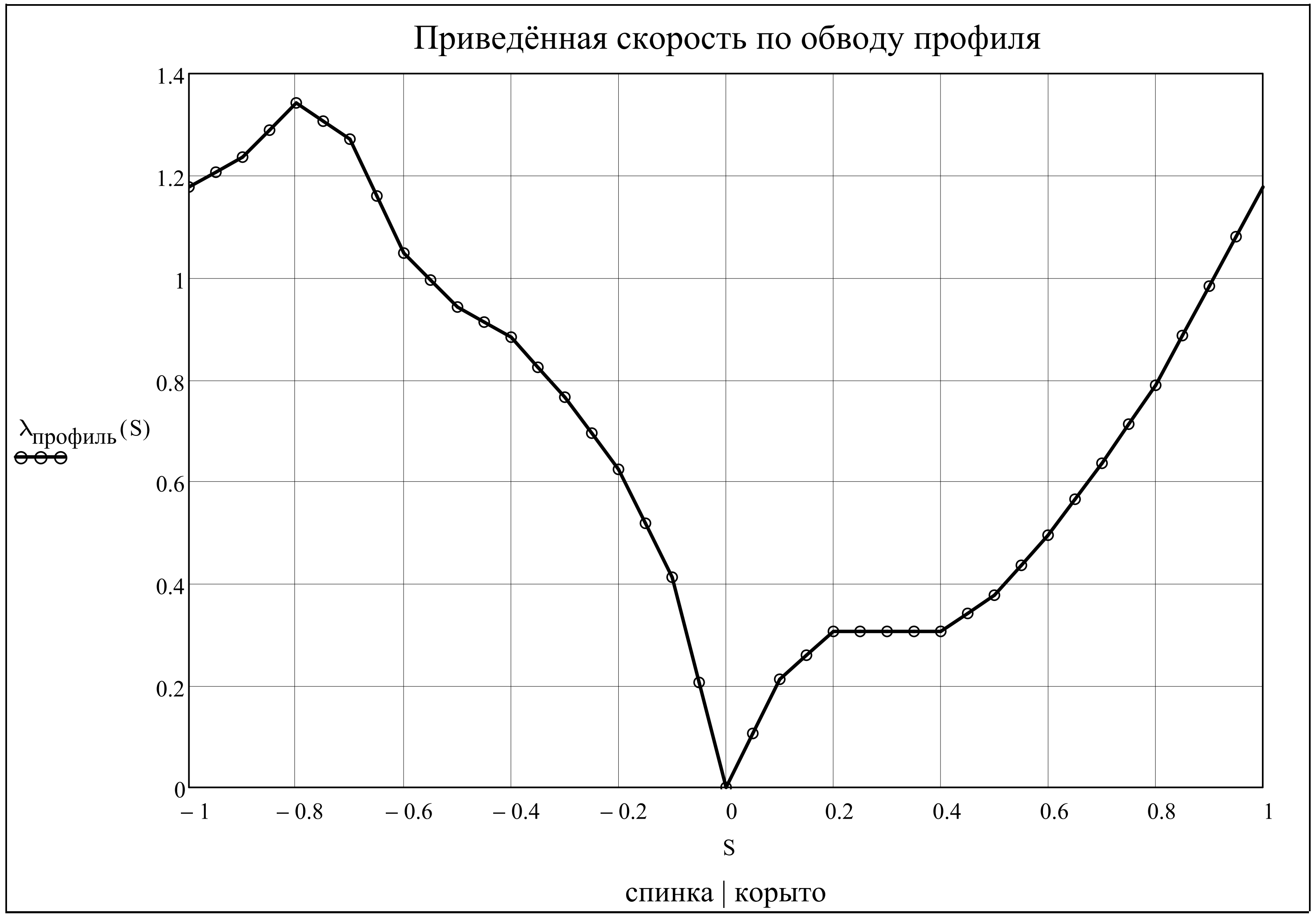
$$S_{отн} = (-1.0\ \ -0.9\ \ -0.8\ \ -0.7\ \ -0.6\ \ -0.5\ \ -0.4\ \ -0.3\ \ -0.2\ \ -0.1\ \ 0\ \ 0.10\ \ 0.20\ \ 0.30\ \ 0.40\ \ 0.50\ \ 0.60\ \ 0.70\ \ 0.80\ \ 1.0)^T$$

$$\lambda_{профиль} = (1\ \ 1.05\ \ 1.14\ \ 1.08\ \ 0.89\ \ 0.80\ \ 0.75\ \ 0.65\ \ 0.53\ \ 0.35\ \ 0\ \ 0.18\ \ 0.26\ \ 0.26\ \ 0.26\ \ 0.32\ \ 0.42\ \ 0.54\ \ 0.67\ \ 1)^T$$

$$\lambda_{профиль} = \lambda_{профиль} \cdot \begin{cases} \dfrac{c_{st(j,2),r}}{a^{*}c_{st(j,2),r}} & \text{if type = "stator"} \\ \dfrac{w_{st(j,3),r}}{a^{*}w_{st(j,3),r}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\lambda_{профиль}(S) = \text{linterp}\left(S_{отн}, \lambda_{профиль}, S\right)$$

$$S = -1, -0.95 .. 1.01$$



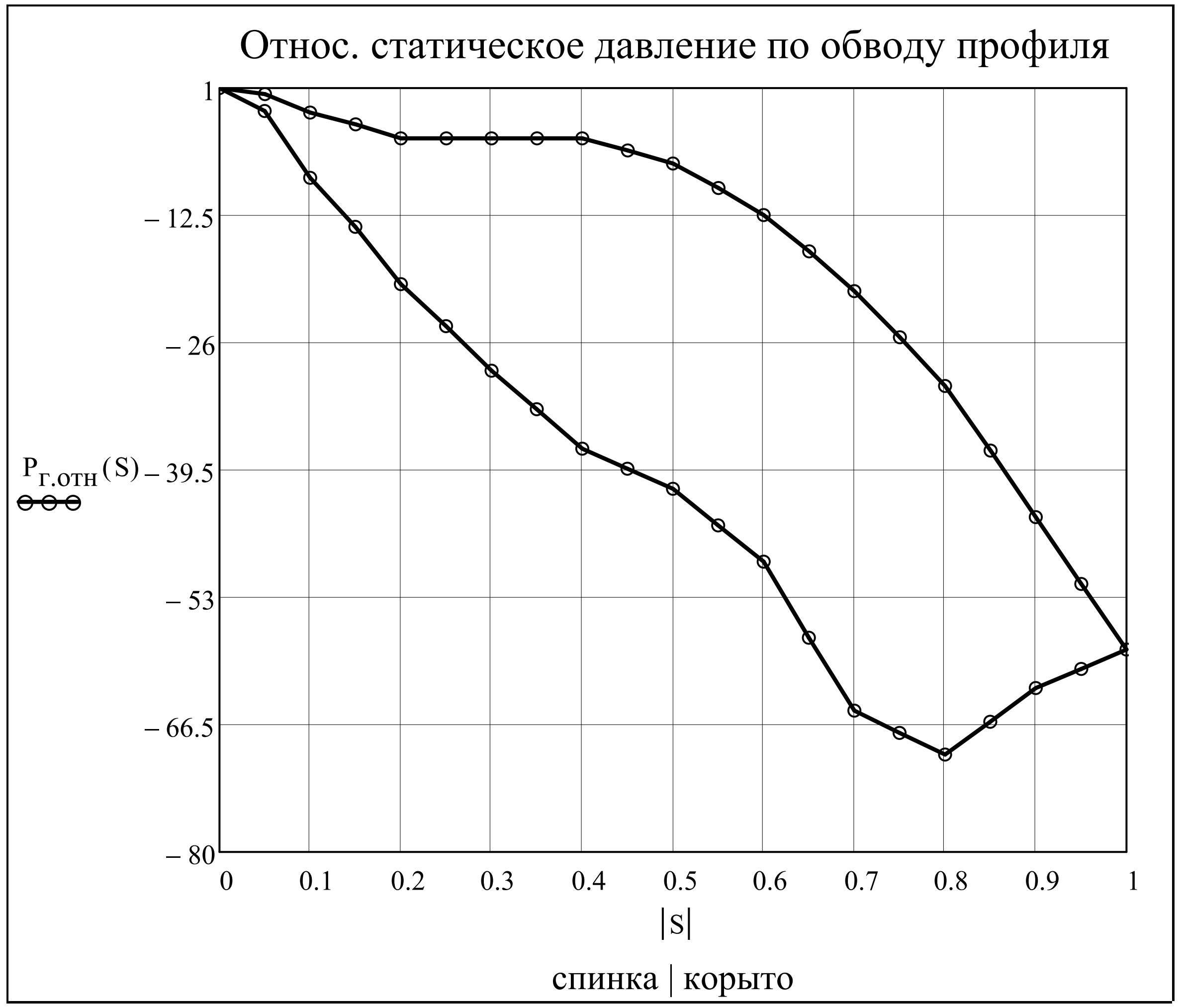
$$\text{augment}\left(S_{отн}, \lambda_{профиль}\right) =$$

	1	2
1	-1.00	1.18
2	-0.90	1.24
3	-0.80	1.34
4	-0.70	1.27
5	-0.60	1.05
6	-0.50	0.94
7	-0.40	0.88
8	-0.30	0.77
9	-0.20	0.62
10	-0.10	0.41
11	0.00	0.00
12	0.10	0.21
13	0.20	0.31
14	0.30	0.31
15	0.40	0.31
16	0.50	0.38
17	0.60	0.49
18	0.70	0.64
19	0.80	0.79
20	1.00	1.18

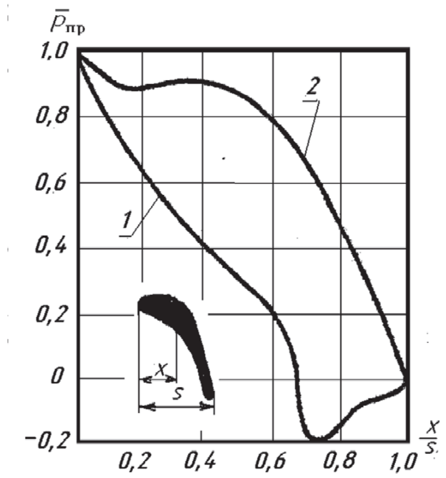
$$P_{г.отн}(S) = \begin{cases} \dfrac{P^*_{st(j,1),r}\cdot\left(1-\dfrac{k_{st(j,1),r}-1}{k_{st(j,1),r}+1}\lambda_{профиль}(S)^2\right)^{\frac{k_{st(j,1),r}}{k_{st(j,1),r}-1}} - P_{st(j,1),r}}{P^*_{st(j,1),r}-P_{st(j,1),r}} & \text{if type = "stator"} \\[2ex] \dfrac{P^*_{st(j,2),r}\cdot\left(1-\dfrac{k_{st(j,2),r}-1}{k_{st(j,2),r}+1}\lambda_{профиль}(S)^2\right)^{\frac{k_{st(j,2),r}}{k_{st(j,2),r}-1}} - P_{st(j,2),r}}{P^*_{st(j,2),r}-P_{st(j,2),r}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mathbf{\bar{P}} = \frac{\mathbf{P} - \mathbf{P_1}}{\mathbf{P_1^*} - \mathbf{P_1}}$$

Проверить индексы по литературе



Иванов:



Приведенная скорость по профилю Л

Общие параметры охлаждения

Конвективное охлаждение

Результаты конвективного охлаждения

Количество рядов на спинке

Количество рядов на корыте

$$\begin{pmatrix} n_{сп} \\ n_{кор} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} s \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,2..n_{сп} \\ 1,2..n_{кор} \end{pmatrix}$$

Количество рядов отв: $n_{отв} = n_{сп} + n_{кор} + 1 = 13$

$S = -0.6$

$$S_{сверхзвук} = root\left(\lambda_{профиль}(S) - 1, S\right) = -0.6$$

Относ. координаты отверстий ():

$$s_{отнСП_s} = 0.06 + (s-1)\cdot\frac{0.82 - 0.06}{n_{сп} - 1}$$

$s_{отнСП}{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8						

$$s_{отнКОР_k} = 0.06 + (k-1)\cdot\frac{0.9 - 0.06}{n_{кор} - 1}$$

$s_{отнКОР}{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9						

Количество отв.: $N_{СП_s} = 15$

$N_{КОР_k} = 15$

$$\begin{pmatrix} N_{СП_1} \\ N_{КОР_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ 15 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} N_{СП_{n_{сп}}} \\ N_{КОР_{n_{кор}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ 15 \end{pmatrix}$$

$$d_{сп.max} = \frac{}{2 \cdot \max(N_{СП})} = \blacksquare \cdot 10^{-3}$$

$$d_{кор.max} = \frac{}{2 \cdot \max(N_{КОР})} = \blacksquare \cdot 10^{-3}$$

$N_{СП}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	15	15	15	15	15	15						

$N_{КОР}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	15	15	15	15	15	15						

Диаметры отв. [м]: $d_{СП_s} = 0.48 \cdot 10^{-3}$

$d_{КОР_k} = 0.48 \cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} d_{СП_1} \\ d_{КОР_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.48 \\ 0.48 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \qquad \begin{pmatrix} d_{СП_{n_{сп}}} \\ d_{КОР_{n_{кор}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.58 \\ 0.48 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}$$

$d_{СП}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.580						

$\cdot 10^{-3}$

$d_{КОР}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5						

$\cdot 10^{-3}$

Зазоры в дефлекторе:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{c_s} \\ \Delta_{кор_k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3 \cdot 10^{-3} \\ 0.3 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Конвективно-пленочное охлаждение

Результат конвективно-пленочного охлаждения

Вывод результатов охлаждения

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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