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): $N_T = 10^6 \cdot \left| \begin{array}{ll} 14.893 & \text{if } turbine = \text{"ТВД"} \\ 15.181 & \text{if } turbine = \text{"ТНД"} \end{array} \right. = 14.893 \cdot 10^6$

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

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

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

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

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

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):

$$\begin{pmatrix} c_Г \\ c_Т \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} 100 \\ 180 \end{pmatrix} & \text{if turbine = "ТВД"} \\ \begin{pmatrix} 180 \\ 260 \end{pmatrix} & \text{if turbine = "ТНД"} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 100.0 \\ 2 & 180.0 \end{array}$$

[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): $L^*_T = \frac{N_T}{mean(G_г, G_т)} = 440.4 \cdot 10^3$ $\quad L^*_T \le 550 \cdot 10^3 = 1$

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

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

	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): $Cp_г = Cp_{газ}\left(P_г, T_г, \alpha_{ox}, Fuel\right) = 1309$

$$\begin{pmatrix} \text{iteration} \\ k_T \\ P_T \\ T_T \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{iteration} \leftarrow 0 \\ k_T \leftarrow k_Г \\ \text{while } 1 > 0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{iteration} \leftarrow \text{iteration} + 1 \\ k_{cp} \leftarrow \text{mean}(k_Г, k_T) \\ Cp \leftarrow \dfrac{k_{cp}}{k_{cp} - 1} \cdot R_{газ}(\alpha_{ox}, \text{Fuel}) \\ P_T \leftarrow P^*_Г \cdot \left(1 - \dfrac{H_T}{Cp \cdot T^*_Г}\right)^{\frac{k_{cp}}{k_{cp}-1}} \\ T_T \leftarrow T^*_Г - \dfrac{H_T \cdot \eta_Л}{Cp} \\ k'_T \leftarrow k_{ад}(Cp_{газ}(P_T, T_T, \alpha_{ox}, \text{Fuel}), R_{газ}(\alpha_{ox}, \text{Fuel})) \\ \text{if } |\text{eps}(\text{"rel"}, k_T, k'_T)| \le \text{epsilon} \\ \quad \left| \begin{array}{l} k_T \leftarrow k'_T \\ \text{break} \end{array} \right. \\ k_T \leftarrow k'_T \end{array} \right. \\ (\text{iteration} \;\; k_T \;\; P_T \;\; T_T)^T \end{array} \right. = \begin{array}{|c|r|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline 2 & 1.293 \\ \hline 3 & 866477.23 \\ \hline 4 & 1424.088 \\ \hline \end{array}$$

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 (м³/кг):
Удельный объём после Т (м³/кг):

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

	1
1	0.189
2	0.474

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

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

	1
1	60741
2	93341

$\cdot 10^{-6}$

Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

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

Определение количества ступеней Т

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

	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):

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

$material\_blade^T =$

	1
1	"ВКНА-1В"

$\rho\_blade^T =$

	1
1	7938

$\sigma\_blade\_long^T =$

	1
1	205

$\cdot 10^6$

Коэф. формы: $k_n = 6.8$

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

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

Частота вращения Т

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

	1
1	19539

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

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

	1
1	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): $\begin{pmatrix} D_{г.ср} \\ D_{т.ср} \end{pmatrix} = \dfrac{2}{\omega} \cdot \begin{pmatrix} u_г \\ u_т \end{pmatrix} =$

	1
1	662.1
2	662.1

$\cdot 10^{-3}$

Длина Л первой ступени Т (м):
Длина Л последней ступени Т (м): $\begin{pmatrix} l_г \\ l_т \end{pmatrix} = \dfrac{1}{\pi} \cdot \begin{pmatrix} \dfrac{F_г}{D_{г.ср}} \\ \dfrac{F_т}{D_{т.ср}} \end{pmatrix} =$

	1
1	29.20
2	44.88

$\cdot 10^{-3}$

$\dfrac{l_г}{D_{г.ср}} = \dfrac{1}{22}$ $\quad$ $\dfrac{l_т}{D_{т.ср}} = \dfrac{1}{14}$

Диаметр периферии после Т (м):
Диаметр корня после Т (м): $\begin{pmatrix} D_{т.пер} \\ D_{т.кор} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{т.ср} + l_т \\ D_{т.ср} - l_т \end{pmatrix} =$

	1
1	707.0
2	617.2

$\cdot 10^{-3}$

Частота вращения Т

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

$N_{ст}^T =$

	1
1	14.89

$\cdot 10^6$

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

$$ЗППЧ = \begin{pmatrix} \begin{cases} \text{"const"} & \text{if } Z = 1 \\ \text{"кор"} & \text{otherwise} \end{cases} & \text{"1.07"} & \text{"1.065"} & \text{"1.03"} & \text{"пер"} & \text{"пер"} \\ \begin{cases} \text{"пер"} & \text{if } Z = 1 \\ \text{"1.055"} & \text{otherwise} \end{cases} & \text{"1.07"} & \text{"1.05"} & \text{"кор"} & \text{"пер"} & \text{"пер"} \end{pmatrix}^T$$

Определение проточной части ОТ

Линейное распределение кольцевых площадей по сечениям:

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

$F^T =$

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

$\cdot 10^{-6}$

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

$D^T =$

	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						

$\cdot 10^{-3}$

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

$\overline{d}^T =$

	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

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

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

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

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

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

$$D$$

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

$u^T =$

	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						

$\cdot 10^{-6}$

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

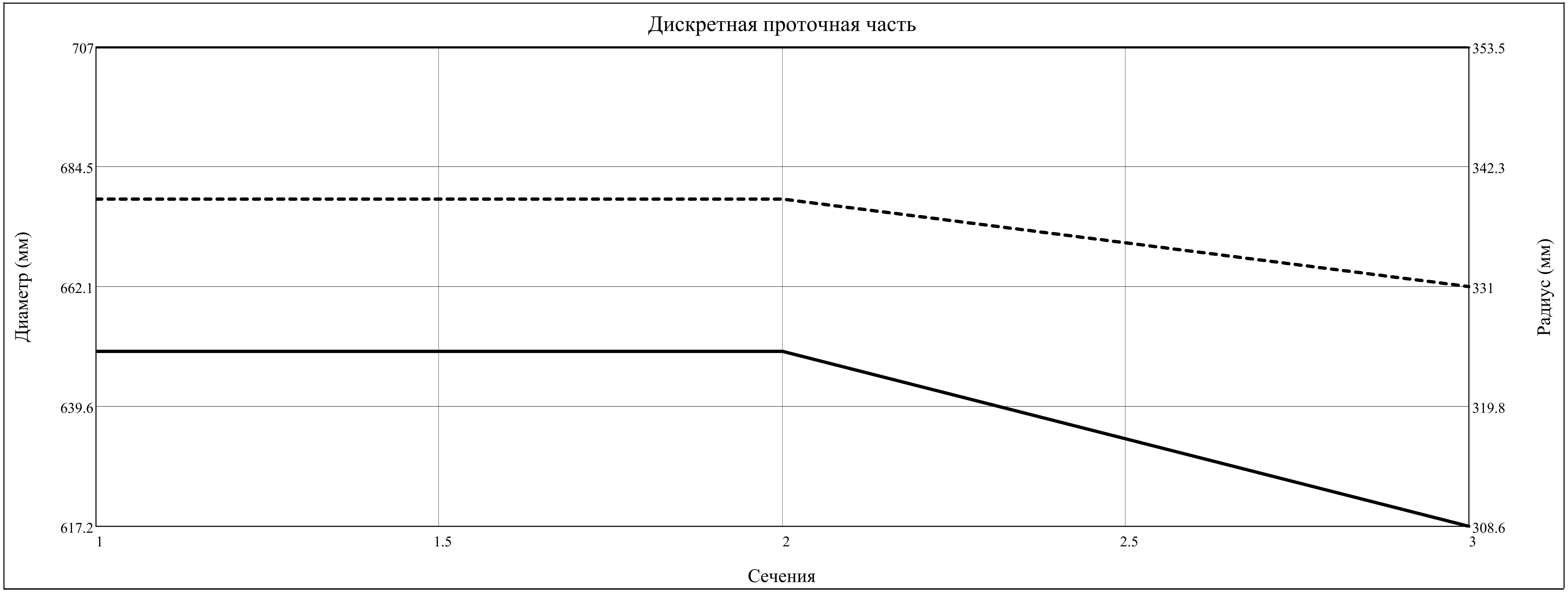
$\bar{d}^T =$

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

$D^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$



$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

Осевая ширина Л СА и РК [1, с.183]:

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

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

	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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

	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

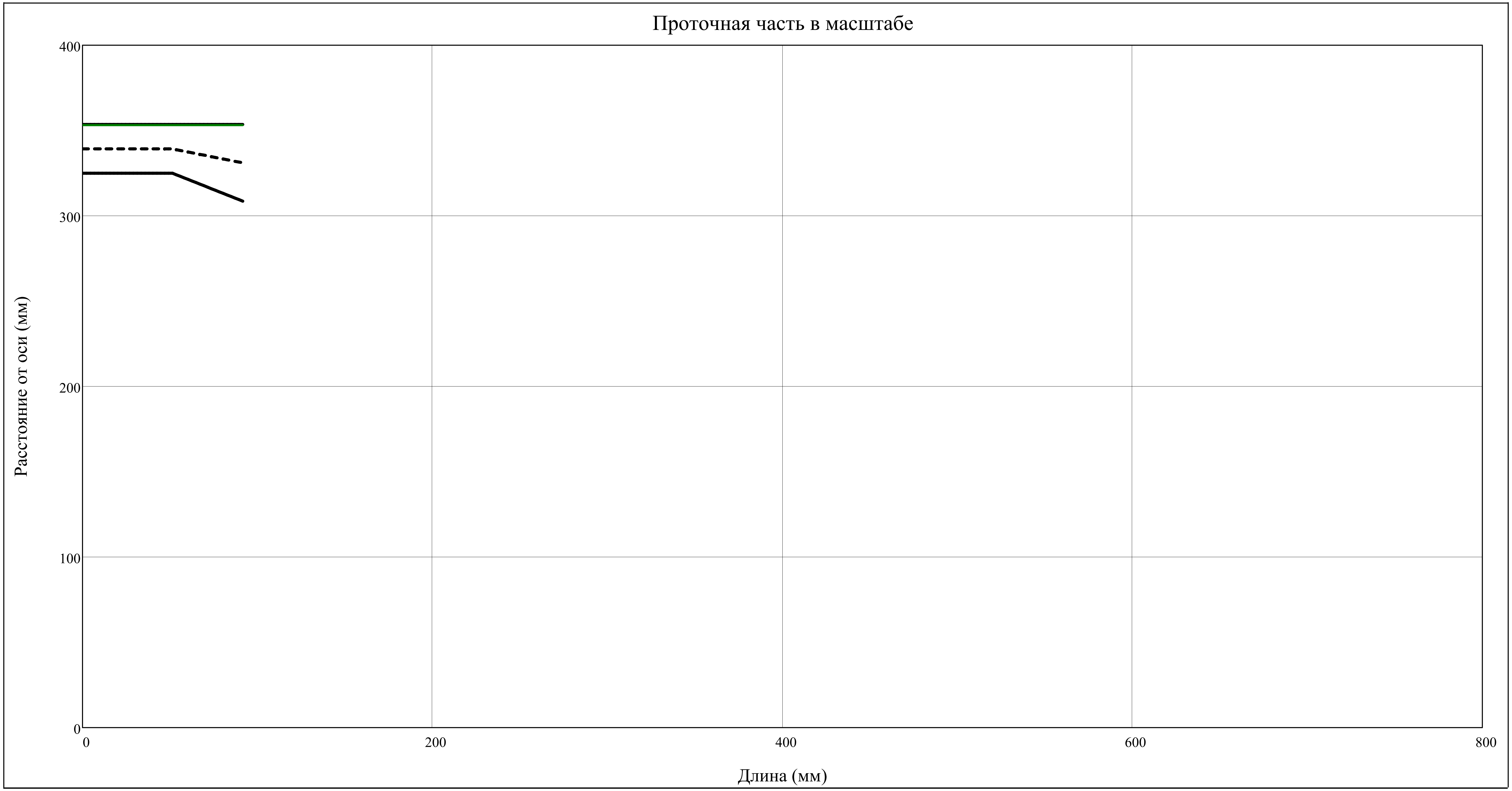
$$\begin{pmatrix} x_{ПЧ} \\ y_{ПЧпер} \\ y_{ПЧср} \\ y_{ПЧкор} \\ y_{Лпер} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} c \leftarrow 1 \\ x_{ПЧ_c} \leftarrow 0 \\ y_{ПЧпер_c} \leftarrow D_{st(c,1),N_r} \\ y_{Лпер_c} \leftarrow y_{ПЧпер_c} - \Delta_{r_c} \\ y_{ПЧср_c} \leftarrow D_{st(c,1),av(N_r)} \\ y_{ПЧкор_c}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

$$Length := \sum_{i=1}^{Z} B_{CA_i} + \sum_{i=1}^{Z} \Delta_{a_i} + \sum_{i=1}^{Z} B_{PK_i} = 81.3\cdot 10^{-3}$$

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

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

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



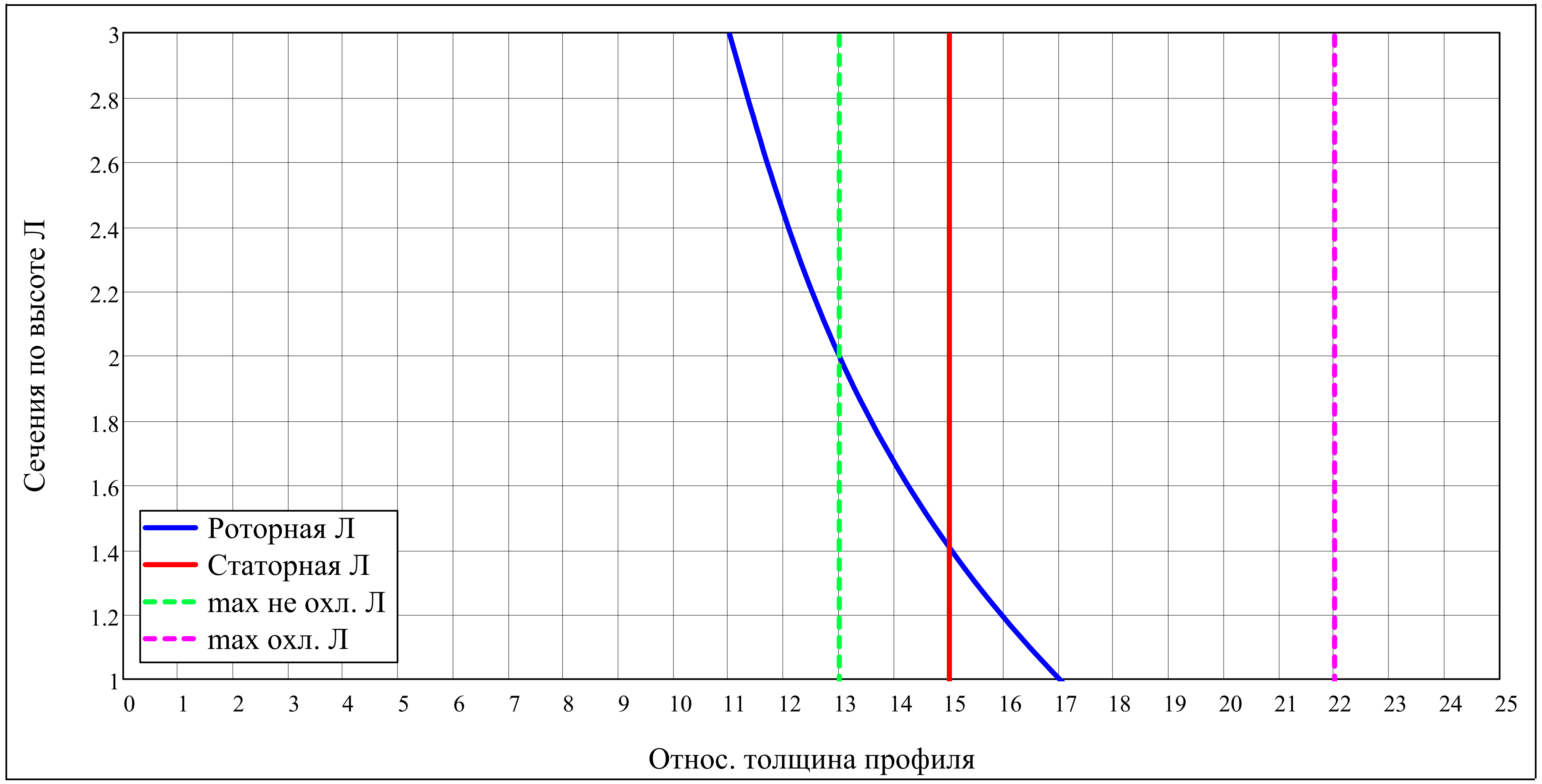
Определение проточной части ОТ

Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

$$\overline{c}_{stator.}(r) = \begin{cases} \mathrm{interp}\left[\mathrm{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ \mathrm{av}(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}15\\15\\15\end{pmatrix}\%\right], \begin{pmatrix}1\\ \mathrm{av}(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}15\\15\\15\end{pmatrix}\%, r\right] & \text{if } T_{Л.доп} < T^*_г \\ \mathrm{interp}\left[\mathrm{cspline}\left[\begin{pmatrix}1\\ \mathrm{av}(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}8\\10\\12\end{pmatrix}\%\right], \begin{pmatrix}1\\ \mathrm{av}(N_r)\\ N_r\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}8\\10\\12\end{pmatrix}\%, r\right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

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



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

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

	1
1	15.00
2	15.00
3	15.00

$\cdot\%$

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

	1
1	17.00
2	13.00
3	11.00

$\cdot\%$

$$\begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{rotor} & \overline{r\_inlet}_{stator} \\ \overline{r\_outlet}_{rotor} & \overline{r\_outlet}_{stator} \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..Z \\ \quad \text{for } r \in 1..N_r \\ \qquad \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{stator_{i,r}} \\ \overline{r\_outlet}_{stator_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix} \cdot \overline{c}_{stator.}(r) \\ \begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{rotor_{i,r}} \\ \overline{r\_outlet}_{rotor_{i,r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.1 \end{pmatrix} \cdot \overline{c}_{rotor.}(r) \end{array} \right. \\ \begin{pmatrix} \overline{r\_inlet}_{rotor} & \overline{r\_inlet}_{stator} \\ \overline{r\_outlet}_{rotor} & \overline{r\_outlet}_{stator} \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

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

	1
1	6.000
2	6.000
3	6.000

$\cdot\%$

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

	1
1	5.100
2	3.900
3	3.300

$\cdot\%$

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

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

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

	1
1	1.700
2	1.300
3	1.100

$\cdot\%$

Относ. толщины и радиусы профилей

Вывод результатов поступенчатого расчета продольной геометрии ОТ в EXCEL:

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

Поступенчатый расчет ОТ

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

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

if $i = 1$

$\alpha_{ox_{st(i,1)}} = \alpha_{ox}$

$k_{st(i,1),r} = k_{Г}$

$P^*_{st(i,1),r} = P^*_{Г}$

$P^*_{w_{st(i,1),r}} = 0$

$P_{st(i,1),r} = P_{Г}$

$T^*_{st(i,1),r} = T^*_{Г}$

$T^*_{w_{st(i,1),r}} = 0$

$T_{st(i,1),r} = T_{Г}$

$$v_{st(i,1),r} = \frac{R_{газ}\left(\alpha_{ox_{st(i,1)}}, Fuel\right) \cdot T_{st(i,1),r}}{P_{st(i,1),r}}$$

$G_{st(i,1)} = G_{Г}$

$c_{st(i,1),r} = c_{Г}$

$\alpha_{st(i,1),r} = \alpha_{Г}$

$$\begin{pmatrix} c_{u_{st(i,1),r}} \\ c_{a_{st(i,1),r}} \end{pmatrix} = c_{st(i,1),r} \cdot \begin{pmatrix} \cos\left(\alpha_{st(i,1),r}\right) \\ \sin\left(\alpha_{st(i,1),r}\right) \end{pmatrix}$$

$w_{st(i,1),r} = 0$

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

$$\begin{pmatrix} \lambda_{c_{st(i,1),r}} \\ \lambda_{w_{st(i,1),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{c_{st(i,1),r}}{a^*_{c_{st(i,1),r}}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

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

$iteration_{ст_i} = 0$

while $1 > 0$

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

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

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

$$R_{L_{i,r}} = R_{L.\mathrm{ср}_i}$$

$$c_{\mathrm{ад}_{st(i,1),r}} = \sqrt{2\cdot H_{\mathrm{ст}_i}}$$

$$H_{\mathrm{stator}_i} = H_{\mathrm{ст}_i}\cdot\left(1 - R_{L_{i,r}}\right)$$

$$c_{\mathrm{ад}_{st(i,2),r}} = \sqrt{2\cdot H_{\mathrm{stator}_i}}$$

$$\overline{\upsilon}_{\mathrm{stator}_i} = 1$$

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

while $1 > 0$

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

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

$$c_{st(i,2),r} = \overline{\upsilon}_{\mathrm{stator}_i}\cdot c_{\mathrm{ад}_{st(i,2),r}}$$

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

$$g_{\mathrm{охл}CA_i} = \begin{cases}\dfrac{0.035\cdot\theta_{CA_i}}{1-\theta_{CA_i}} & \text{if } \dfrac{0.035\cdot\theta_{CA_i}}{1-\theta_{CA_i}} \ge 0\\[2ex] 0 & \text{otherwise}\end{cases}$$

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

$$\alpha_{\mathrm{ох}_{st(i,2)}} = \alpha_{\mathrm{ох}_{st(i,1)}} + g_{\mathrm{охл}CA_i}$$

$$\alpha_{\mathrm{ок}CA_i} = \mathrm{mean}\left(\alpha_{\mathrm{ох}_{st(i,1)}},\alpha_{\mathrm{ох}_{st(i,2)}}\right)$$

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

while $1 > 0$

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

$$T_{\mathrm{ад}_{st(i,2),r}} = T^*_{st(i,1),r} - \frac{H_{\mathrm{stator}_i}}{\dfrac{k_{CA_i}}{k_{CA_i}-1}\cdot R_{\mathrm{газ.ср}}\left(\alpha_{\mathrm{ох}_{st(i,1)}},\alpha_{\mathrm{ох}_{st(i,2)}},\mathrm{Fuel}\right)}$$

k_{CA}

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

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

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

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

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

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

break

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $r \in 1..N_r$

$$t_{\text{stator}_{i,r}} = \frac{\pi\cdot\operatorname{mean}\left(D_{st(i,1),r},D_{st(i,2),r}\right)}{Z_{\text{stator}_i}}$$

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

$$\xi_{\text{крCA}_i} = \xi_{\text{кромка}}\left(\overline{\text{r\_outlet}}_{\text{stator}_{i,r}}\cdot \text{chord}_{\text{stator}_{i,r}},t_{\text{stator}_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r}\right)$$

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

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

$$\xi_{\text{прCA}_i} = \xi_{\text{трCA}_i}+\xi_{\text{крCA}_i}+\xi_{\text{ReCA}_i}+\xi_{\lambda\text{CA}_i}$$

$$\xi_{\text{втCA}_i} = \xi_{\text{вторичные}}\left(\xi_{\text{трCA}_i},t_{\text{stator}_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r},h_{st(i,2)}\right)$$

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

$$\xi_{\text{смCA}_i} = \xi_{\text{смешение}}\left(\text{"CA"},g_{\text{охлCA}_i}\right)$$

if $\left|\operatorname{eps}\left(\text{"rel"},\sqrt{1-\xi_{\text{смCA}_i}-\xi_{\text{тдCA}_i}-\xi_{\text{втCA}_i}-\xi_{\text{прCA}_i}},\overline{\upsilon}_{\text{stator}_i}\right)\right| \le \text{epsilon}$

$$\overline{\upsilon}_{\text{stator}_i} = \sqrt{1-\xi_{\text{смCA}_i}-\xi_{\text{тдCA}_i}-\xi_{\text{втCA}_i}-\xi_{\text{прCA}_i}}$$

break

$$\overline{\upsilon}_{\text{stator}_i} = \sqrt{1-\xi_{\text{смCA}_i}-\xi_{\text{тдCA}_i}-\xi_{\text{втCA}_i}-\xi_{\text{прCA}_i}}$$

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

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

$$\overline{\upsilon}_{\text{rotor}_i} = 1$$

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

while $1 > 0$

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

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

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

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

$$g_{охлРК_i} = \begin{cases} \dfrac{0.035\cdot\theta_{РК_i}}{1-\theta_{РК_i}} & \text{if } \dfrac{0.035\cdot\theta_{РК_i}}{1-\theta_{РК_i}} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

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

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

while $1 > 0$

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

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

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

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

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

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

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

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

break

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{for } r \in 1..N_r$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\eta_{лоп_i} = 1 - \xi_{CAиPK_i} - \xi_{PK_i} - \xi_{\Delta r_i} - \xi_{тр.в_i}$$

$$\eta_{u2_i} = 1 - \xi_{CAиPK_i} - \xi_{PK_i} - \xi_{вых_i}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $i \in 1..Z$

for $j \in 1..3$

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

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

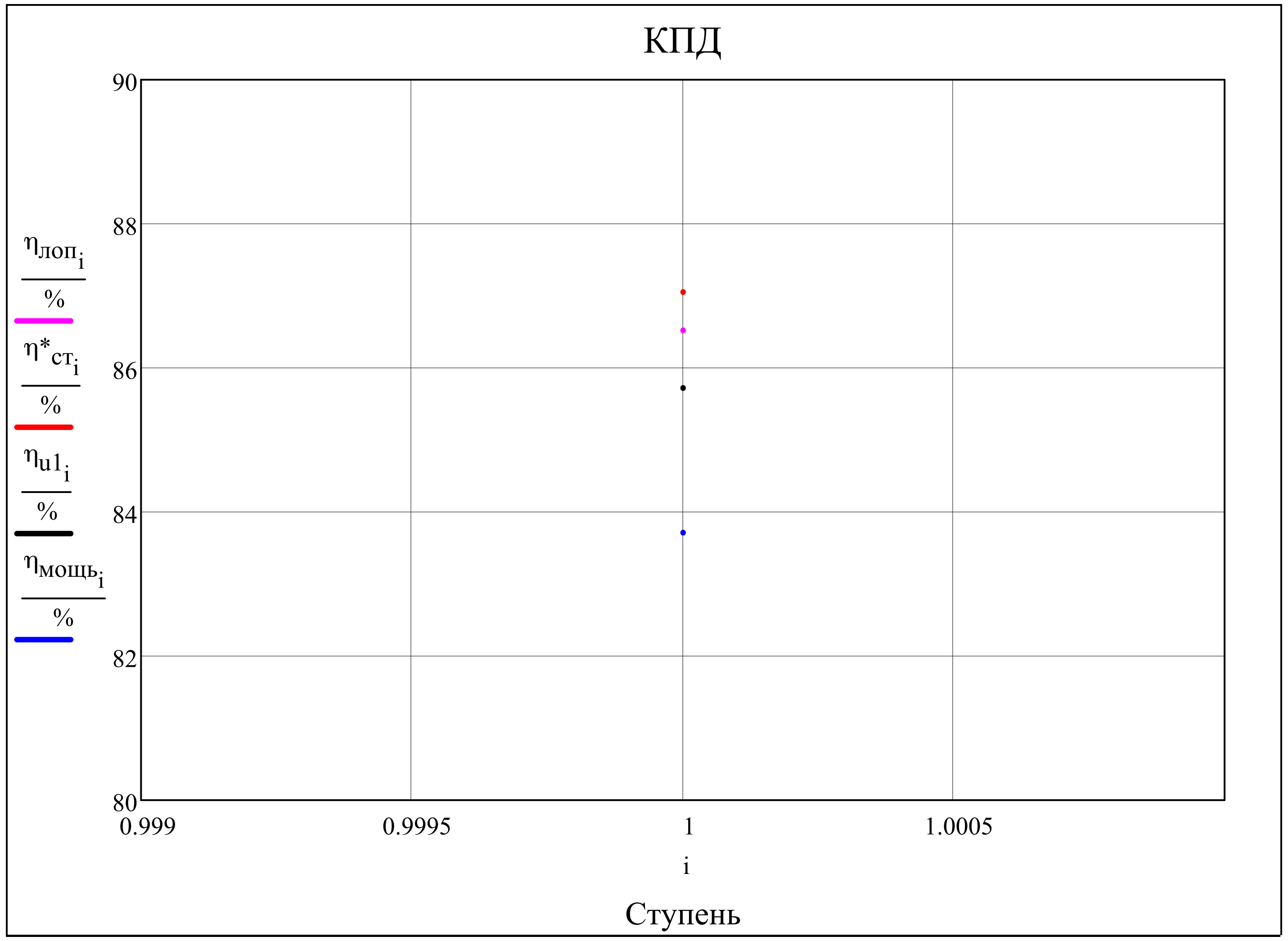
$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{stator_{i,av(N_r)}} \\ \varepsilon_{rotor_{i,av(N_r)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{st(i,2),av(N_r)} - \alpha_{st(i,1),av(N_r)} \\ \beta_{st(i,3),av(N_r)} - \beta_{st(i,2),av(N_r)} \end{pmatrix}$$

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

w	w
w_a	w_u
λ_c	M_c
λ_w	M_w
υ_{stator}	υ_{rotor}
$chord_{stator}$	$chord_{rotor}$
$\bar{t}_{оптСА}$	$\bar{t}_{оптРК}$
t_{stator}	t_{rotor}
Z_{stator}	Z_{rotor}
$\bar{\upsilon}_{stator}$	$\bar{\upsilon}_{rotor}$
$\xi_{трСА}$	$\xi_{трРК}$
$\xi_{крСА}$	$\xi_{крРК}$
$\xi_{ReСА}$	$\xi_{ReРК}$
$\xi_{\lambda СА}$	$\xi_{\lambda РК}$
$\xi_{прСА}$	$\xi_{прРК}$
$\xi_{втСА}$	$\xi_{втРК}$
$\xi_{тдСА}$	$\xi_{тдРК}$
$\xi_{смСА}$	$\xi_{смРК}$
$\xi_{\Delta r}$	$\xi_{вых}$
$\xi_{тр.в}$	$\xi_{тр.в}$
$L_{ст}$	$Lu_{ст}$
$\eta_{мощь}$	$\eta_{лоп}$
$\eta^*_{ст}$	$\eta^*_{ст}$
η_{u1}	η_{u2}
$\xi_{СА}$	$\xi_{РК}$
$Lu_{нагрузка}$	$Lu_{нагрузка}$

Поступенчатый расчет ОТ

Параметры турбины



$\eta_{лоп}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 86.53 \end{array} \cdot\%$

$\eta^*_{ст}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 87.05 \end{array} \cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\eta_{u1}{}^{T}, \eta_{u2}{}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 85.72 \\ 2 & 87.03 \end{array} \cdot\%$

$\eta_{мощь}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 83.71 \end{array} \cdot\%$

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

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	3.13
2	3.25

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	515.0
2	535.6

$\cdot 10^3$

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

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

Лопаточный КПД Т: $$\eta_{Тлоп} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} + \frac{\left(c_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^2}{2}}{H_T} = 86.57 \cdot \%$$

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

Адиабатный КПД Т: $\eta^*{}_T = \frac{L_T}{H^*{}_T} = 87.10 \cdot \%$

Политропический КПД Т: $\eta^*{}_{T.п} = \eta^*{}_n\left(\text{"расширение"}, \eta^*{}_T, \pi^*{}_T, k_{T.cp}\right) = 85.57 \cdot \%$

Мощностной КПД Т: $$\eta_{Тмощь} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)}}{H_T} = 83.76 \cdot \%$$

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

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

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

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

$H_{ст}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 535.6 \end{array} \cdot 10^{3}$

$\mathrm{stack}\left(H_{stator}^{T}, H_{rotor}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 449.9 \\ 2 & 86.8 \end{array} \cdot 10^{3}$

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

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

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

$\mathrm{stack}\left(\theta_{CA}^{T}, \theta_{PK}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0.432 \\ 2 & 0.207 \end{array}$

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

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

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

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

$G_{cooling} = 3.2$

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

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

	1
1	2
2	2

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

	1	2	3
1	1.283	1.293	1.295

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

	1	2	3
1	2731.8	2414.5	872.9

$\cdot 10^{3}$

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

	1	2	3
1	2705.2	1019.7	840.7

$\cdot 10^{3}$

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1769.2	1447.6	1382.3						

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	1510.0	1500.3						

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	1429.3	1379.5						

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

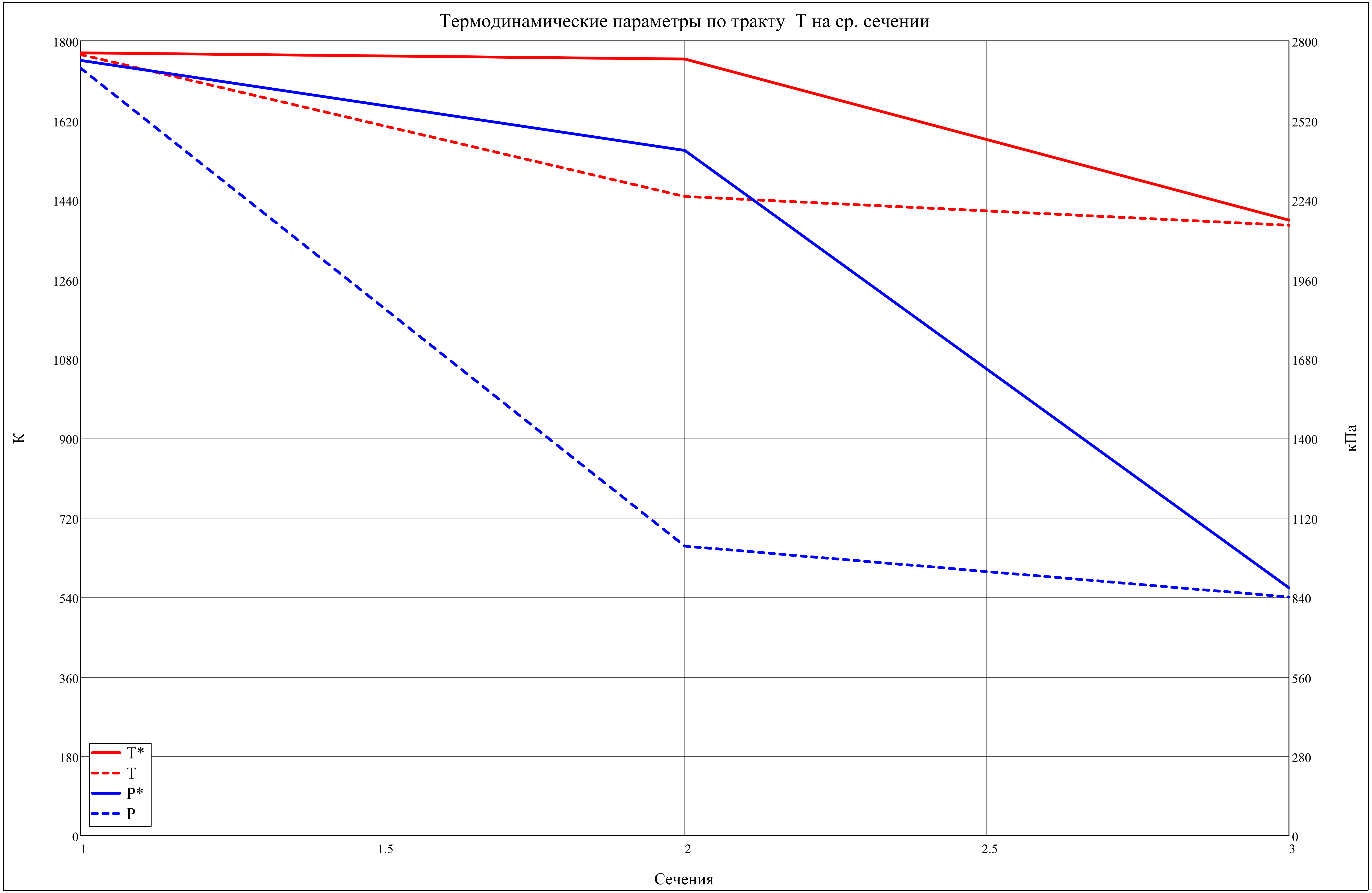
	1	2	3
1	0.189	0.410	0.486

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

	1	2	3
1	5.341	4.758	2.170

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

	1	2	3
1	5.300	2.442	2.059


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

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

	1	2	3
1	809.2	734.8	718.8

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

	1	2	3
1	758.2	756.5	673.8

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

	1	2	3
1	0.0	700.9	699.0

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

	1	2	3
1	100.0	891.5	173.5

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

	1	2	3
1	0.0	863.3	-1.7

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

	1	2	3
1	100.0	222.8	173.5

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

	1	2	3
1	0.0	398.5	546.5

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

	1	2	3
1	0.0	330.4	518.3

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

	1	2	3
1	0.0	222.8	173.5

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

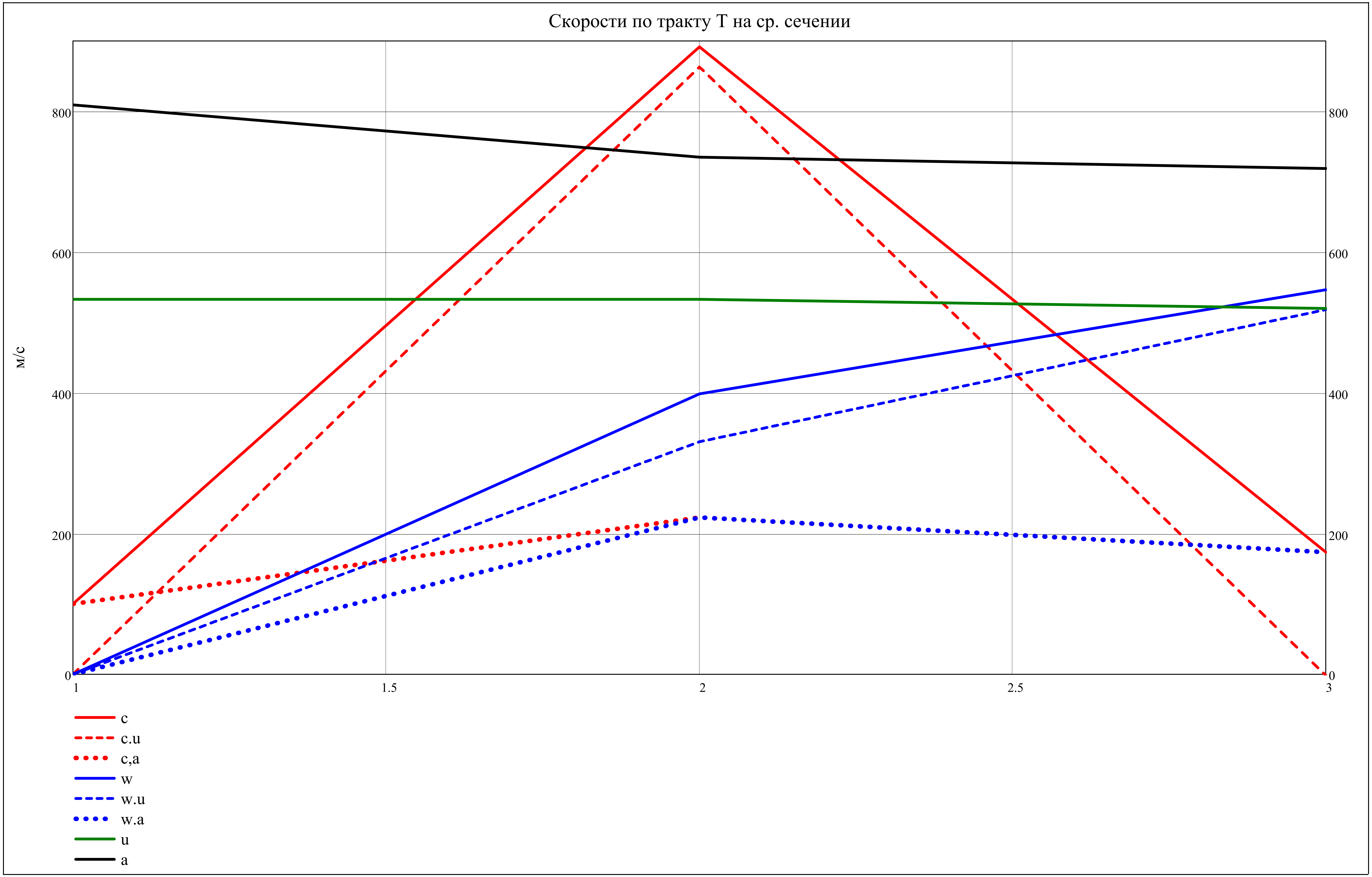
	1	2
1	1034.9	948.5

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

	1	2	3
1	0.0	0.0	564.7

$u^{T} =$

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



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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.00	14.47	90.57						

$\cdot°$

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.00	34.00	18.51									

$\cdot°$

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

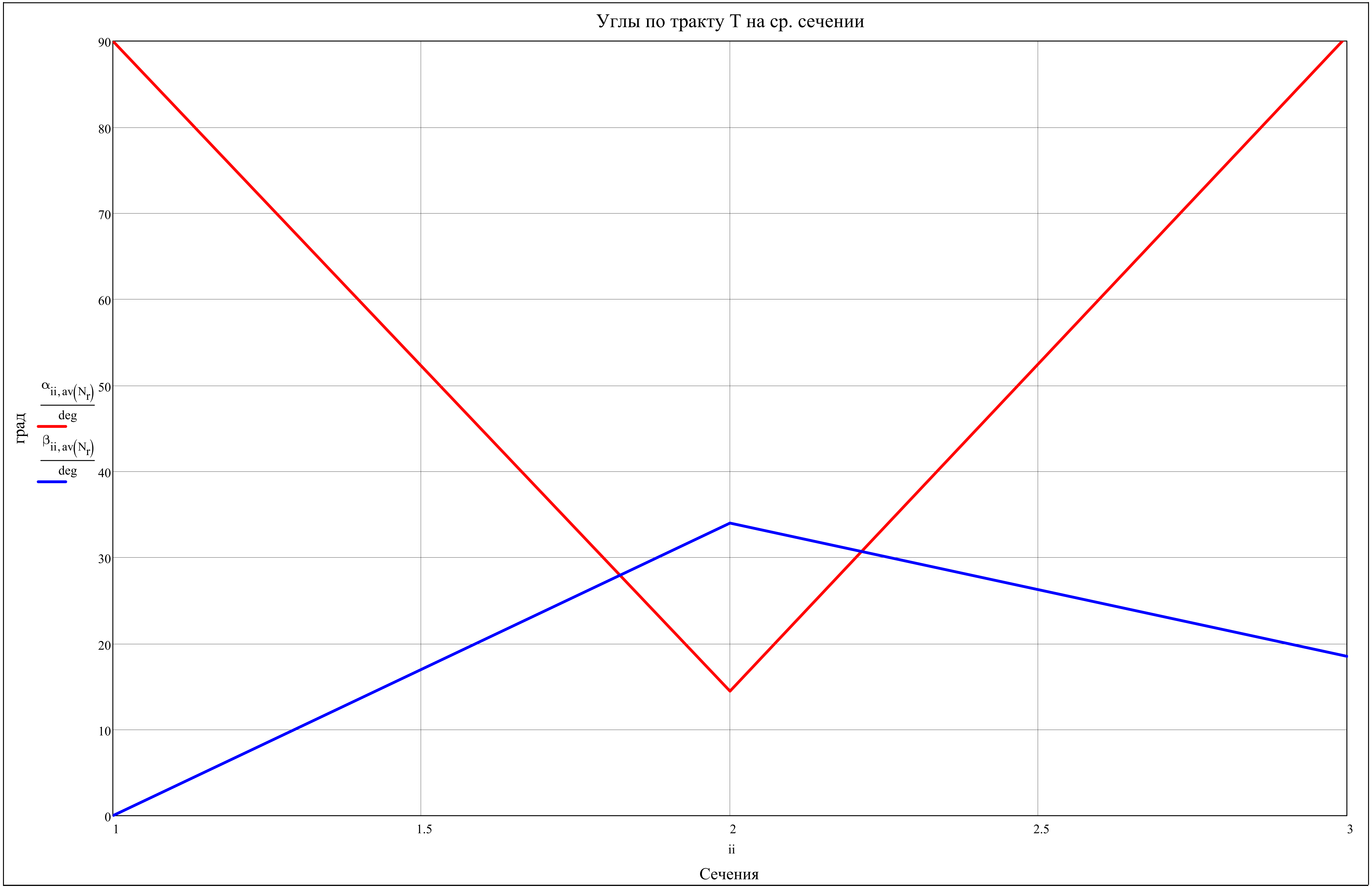
	1	2	3	4	5	6
1	-75.53					

$\cdot°$

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

	1	2	3	4	5	6
1	-15.49					

$\cdot°$


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

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

	1	2	3
1	0.1319	1.1786	0.2575

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

	1	2	3
1	0.0000	0.5686	0.7819

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

	1	2	3
1	0.1236	1.2133	0.2414

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

	1	2	3
1	1	0	1

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

	1	2	3
1	0.0000	0.5424	0.7604

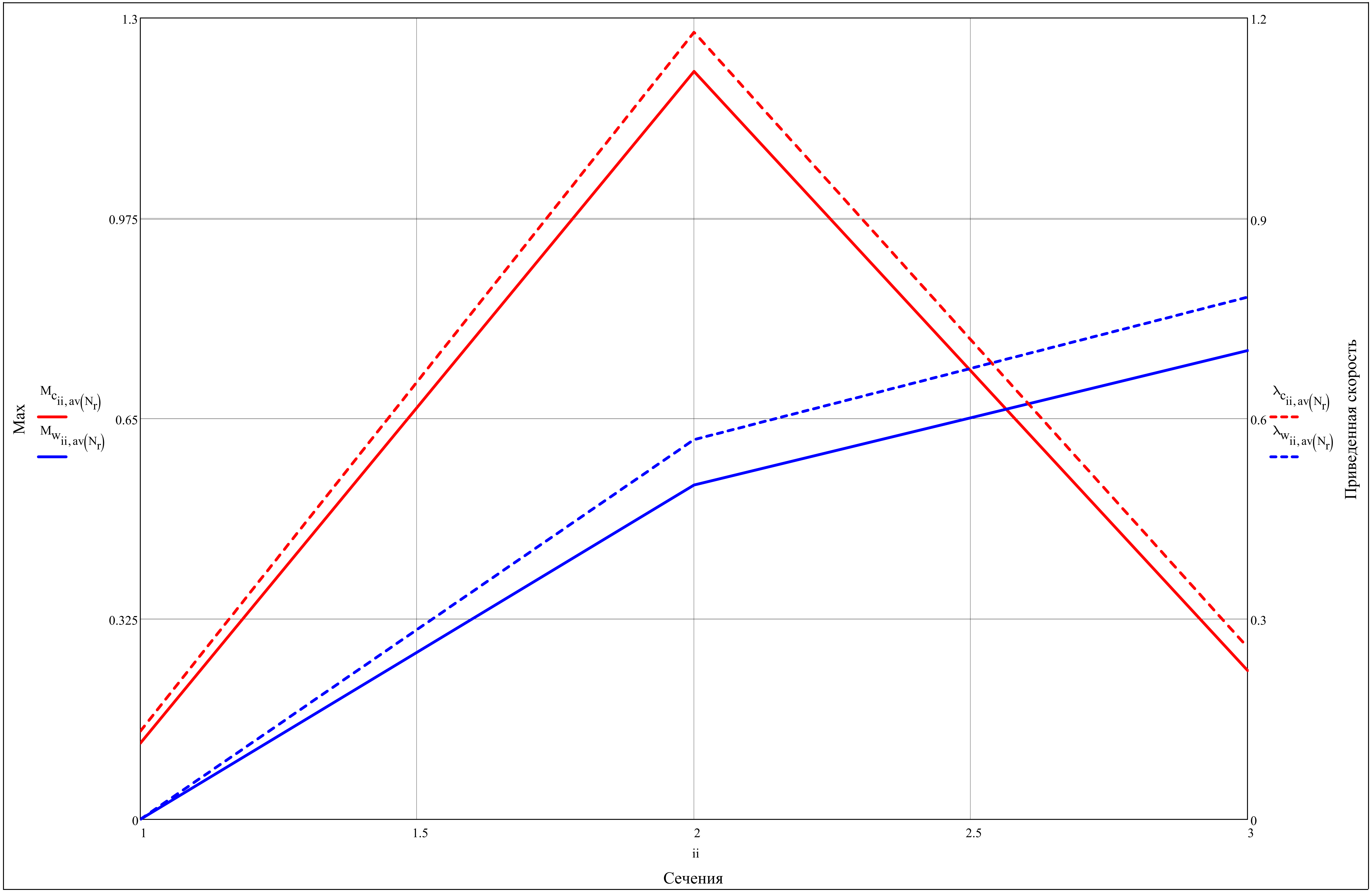
$\mathrm{submatrix}(M_w, 1, 2Z+1, \mathrm{av}(N_r), \mathrm{av}(N_r))^T \le 1 =$

	1	2	3
1	1	1	1

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

	1
1	37.02
2	67.05

$\cdot°$


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
Max
Приведенная скорость
Сечения
$M_{c_{ii,av}(N_r)}$
$M_{w_{ii,av}(N_r)}$
$\lambda_{c_{ii,av}(N_r)}$
$\lambda_{w_{ii,av}(N_r)}$

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

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

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

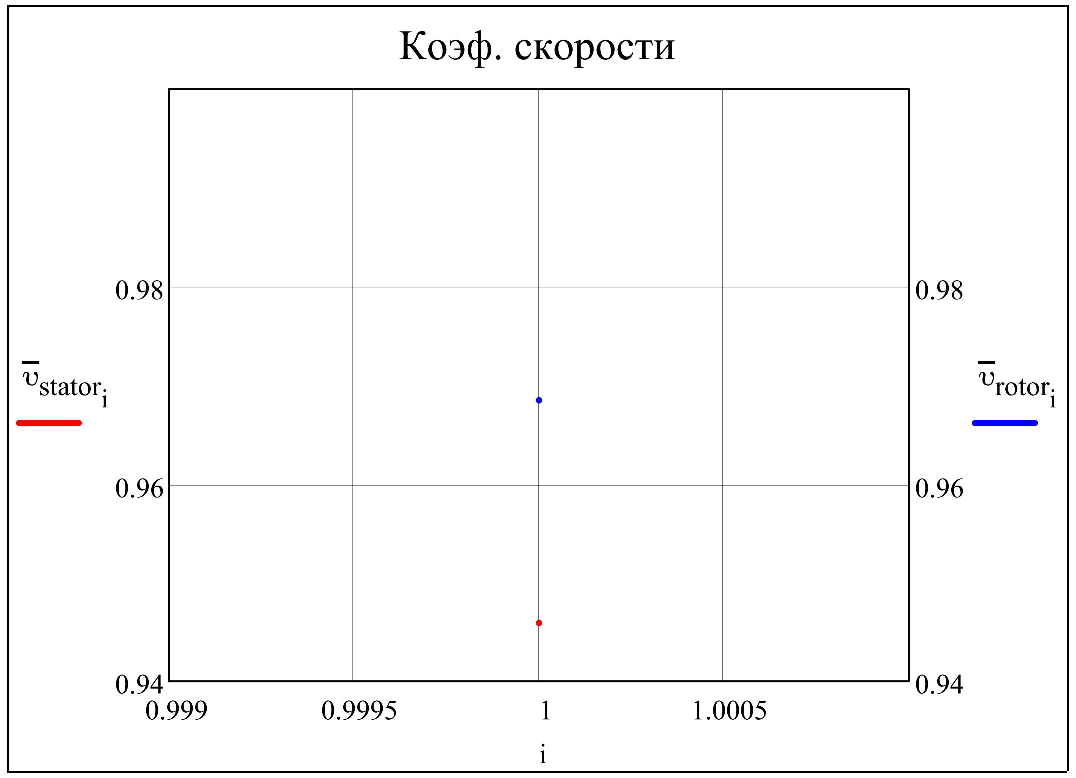
$$\mathrm{stack}\left(Z_{stator}^{T}, Z_{rotor}^{T}\right) = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 36 \\ 2 & 89 \end{array}$$

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

$$\frac{t_{stator_{i,av(N_r)}}}{chord_{stator_{i,av(N_r)}}} = \boxed{0.871} \quad 0.7 \le \frac{t_{stator_{i,av(N_r)}}}{chord_{stator_{i,av(N_r)}}} \le 1 = \boxed{1} \quad \frac{t_{rotor_{i,av(N_r)}}}{chord_{rotor_{i,av(N_r)}}} = \boxed{0.724} \quad 0.7 \le \frac{t_{rotor_{i,av(N_r)}}}{chord_{rotor_{i,av(N_r)}}} \le 1 = \boxed{1}$$

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

	1
1	0.9459
2	0.9685



$$\mathrm{stack}\left(\xi_{трСА}{}^{T}, \xi_{трРК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}1.398\\2.622\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\xi_{крСА}{}^{T}, \xi_{крРК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}2.756\\1.131\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\xi_{ReСА}{}^{T}, \xi_{ReРК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}-0.135\\0.084\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\xi_{\lambda СА}{}^{T}, \xi_{\lambda РК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}2.410\\0.023\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\xi_{втСА}{}^{T}, \xi_{втРК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}1.452\\0.878\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\xi_{тдСА}{}^{T}, \xi_{тдРК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}1.857\\1.209\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\xi_{смСА}{}^{T}, \xi_{смРК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}0.784\\0.249\end{pmatrix}\cdot\%$$

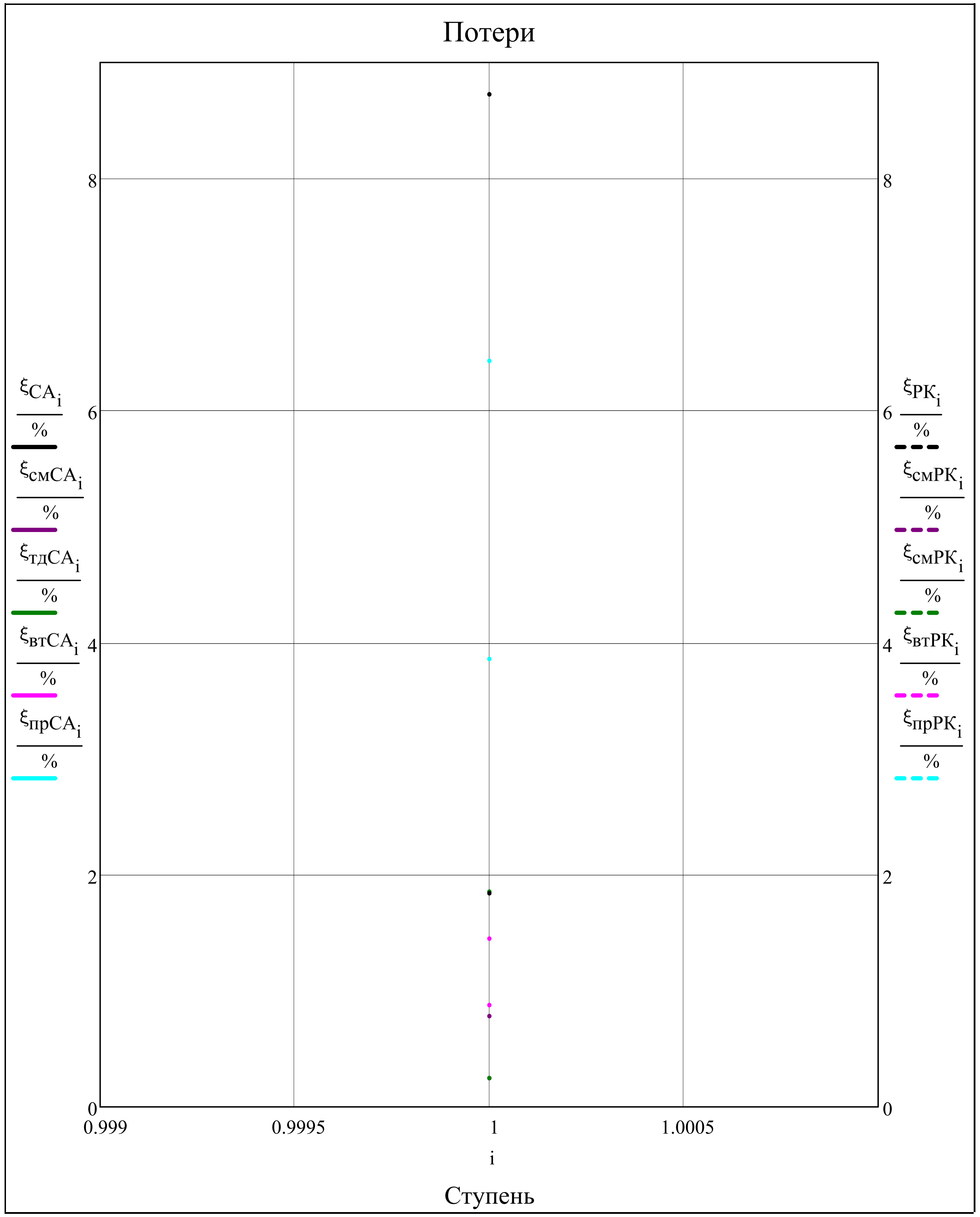
$$\mathrm{stack}\left(\xi_{СА}{}^{T}, \xi_{РК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}8.727\\1.842\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\xi_{вых}{}^{T} = \begin{pmatrix}2.811\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\xi_{\Delta r}{}^{T} = \begin{pmatrix}2.481\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\xi_{тр.в}{}^{T} = \begin{pmatrix}0.835\end{pmatrix}\cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\xi_{прСА}{}^{T}, \xi_{прРК}{}^{T}\right) = \begin{pmatrix}6.429\\3.861\end{pmatrix}\cdot\%$$



Параметры турбины

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

Выбор закона профилирования Л по высоте

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

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

$m^T =$

	1	2	3	4	5	6
1	0.8868	-0.2500	0.0000	0.2500	1.0000	1.0000

Выбор закона профилирования Л по высоте

Расчет Л по высоте

$$
\begin{pmatrix}
P^{*} & P \\
T^{*} & T^{*}_{w} \\
T & T \\
\rho^{*} & \rho \\
k & R_{L} \\
a^{*}_{c} & a^{*}_{w} \\
a_{зв} & a_{зв} \\
c & w \\
c_{u} & w_{u} \\
c_{a} & w_{a} \\
\Delta c_{a} & \Delta c_{a} \\
\alpha & \beta \\
\lambda_{c} & M_{c} \\
\lambda_{w} & M_{w} \\
\varepsilon_{stator} & \varepsilon_{rotor}
\end{pmatrix}
=
\left|
\begin{array}{l}
\text{for } i \in 1..Z \\
\quad \text{for } a \in 2..3 \\
\quad\quad \text{for } r \in 1..N_{r}
\end{array}
\right.
$$

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

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

$$
c_{u_{st(i,a),r}} \leftarrow
\left|
\begin{array}{l}
\text{if } m_i = \overline{\upsilon}_{stator_i}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^{2} \\
\quad \left|
\begin{array}{ll}
c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot\left(\dfrac{R_{st(i,a),av(N_r)}}{R_{st(i,a),r}}\right)^{m_i} & \text{if } a = 2 \\[2ex]
\dfrac{u_{st(i,a-1),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}} + u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}} - u_{st(i,a-1),r}\cdot c_{u_{st(i,a-1),r}}}{u_{st(i,a),r}} & \text{otherwise}
\end{array}
\right. \\
\text{otherwise} \\
\quad \left|
\begin{array}{ll}
\dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)} & \text{if } a = 2 \\[2ex]
-\dfrac{A_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a)}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)} & \text{otherwise}
\end{array}
\right.
\end{array}
\right.
$$

$$
c_{a_{st(i,a),r}} \leftarrow
\left|
\begin{array}{ll}
\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{2} - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^{2}\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^{2} - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{2}\right] + 4\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)\cdot\left|\begin{array}{l}-1 \text{ if } a = 2\\ 1 \text{ otherwise}\end{array}\right.} & \text{if } m_i = -1 \\[3ex]
\sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^{2} - 2\cdot\left(A_{st(i,a)}\right)^{2}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right) - 2\cdot A_{st(i,a)}\cdot B_{st(i,a)}\cdot\left(\dfrac{1}{R_{st(i,a),r}} - \dfrac{1}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)\cdot\left|\begin{array}{l}-1 \text{ if } a = 2\\ 1 \text{ otherwise}\end{array}\right.} & \text{if } m_i = 0
\end{array}
\right.
$$

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

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

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

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

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

for $r \in 1 .. N_r$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_{c_{i,r}} = \frac{c_{i,r}}{a_{зв_{i,r}}}$$

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

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

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

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

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

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

$$M_{w_{i,r}} = \frac{w_{i,r}}{a_{зв_{i,r}}}$$

for $i \in 1..Z$

for $r \in 1..N_r$

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

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

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

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

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

Расчет Л по высоте

Результаты расчета Л по высоте

$P^{*T} = \cdot 10^3$

	1	2	3
1	2731.8	2414.5	872.9
2	2731.8	2414.5	872.9
3	2731.8	2414.5	872.9

$P^T = \cdot 10^3$

	1	2	3
1	2705.2	941.6	850.0
2	2705.2	1016.5	840.7
3	2705.2	1086.9	833.6

$T^{*T} =$

	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	1411.2	1385.3						
2	1768.9	1436.7	1381.6						
3	1768.9	1459.4	1378.8						

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

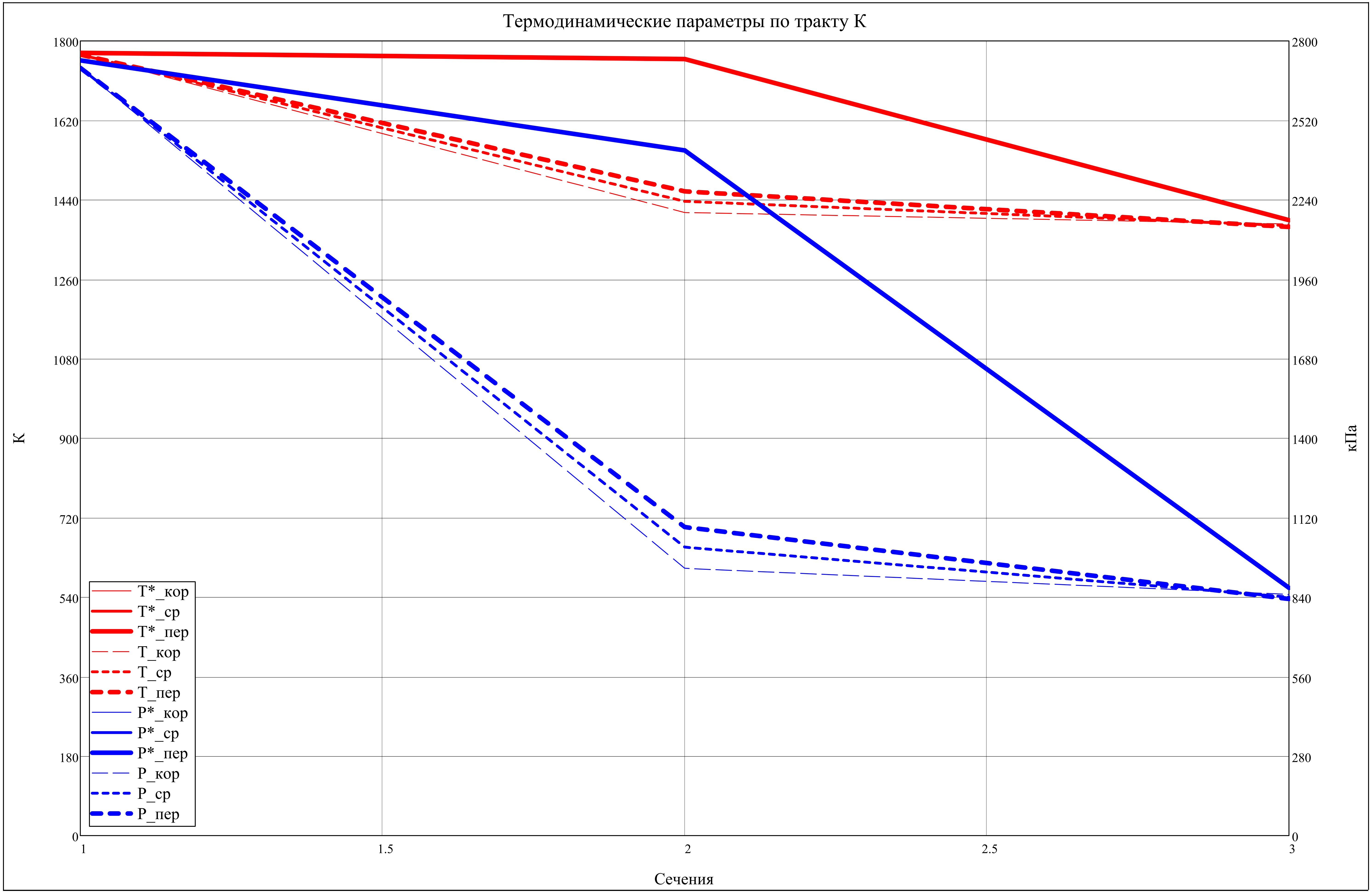
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1878.6	1493.4	1491.0						
2	1888.0	1501.1	1507.6						
3	1897.9	1509.2	1525.1						

$\rho^{*T} =$

	1	2	3
1	5.341	4.758	2.170
2	5.341	4.758	2.170
3	5.341	4.758	2.170

$\rho^T =$

	1	2	3
1	5.301	2.313	2.127
2	5.301	2.452	2.109
3	5.301	2.582	2.096



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

$k^T =$

	1	2	3
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	0.1017
2	0.1784
3	0.2456

$R_L{}^T \geq 0.05 =$

	1
1	1
2	1
3	1

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

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

$u^T =$

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

$c^T =$

	1	2	3
1	100.0	926.1	145.9
2	100.0	891.5	173.5
3	100.0	859.6	191.9

$c_u{}^T =$

	1	2	3
1	0.0	896.7	2.7
2	0.0	863.3	-1.7
3	0.0	832.3	-5.5

$c_a{}^T =$

	1	2	3
1	100.0	231.5	145.9
2	100.0	222.8	173.5
3	100.0	214.9	191.9

$\Delta c_a{}^T =$

	1	2
1	131.5	-85.6
2	122.8	-49.3
3	114.9	-23.0

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

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

$a_{зв}{}^T =$

	1	2	3
1	816.1	729.0	725.3
2	816.1	735.6	724.4
3	816.1	741.3	723.6

$w^T =$

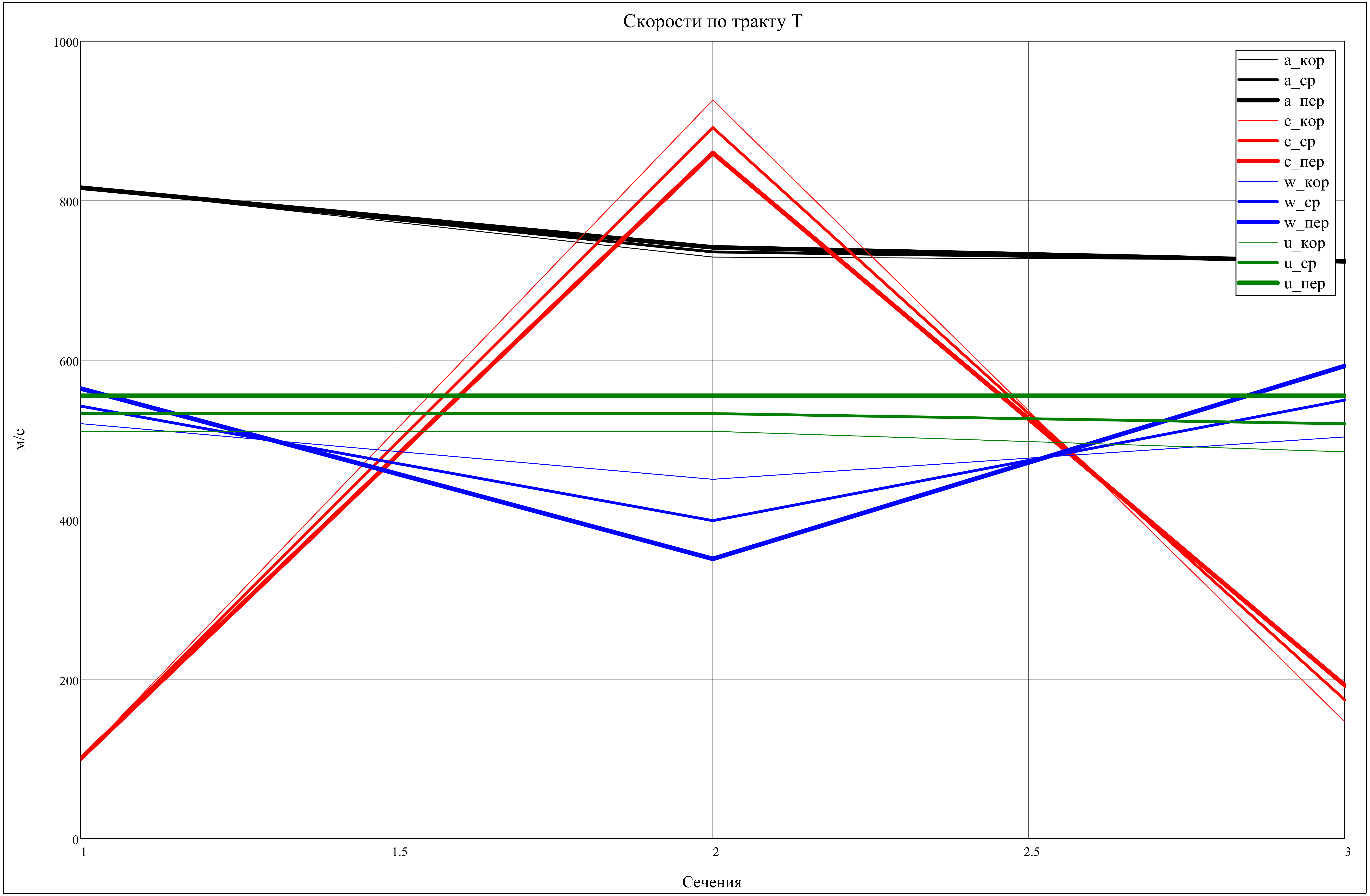
	1	2	3
1	520.2	450.3	503.6
2	542.2	398.5	549.8
3	564.2	350.6	592.6

$w_u{}^T =$

	1	2	3
1	510.5	-386.3	482.0
2	532.9	-330.4	521.7
3	555.2	-277.1	560.7

$w_a{}^T =$

	1	2	3
1	100.0	231.5	145.9
2	100.0	222.8	173.5
3	100.0	214.9	191.9


Скорости по тракту Т
1000
800
600
400
200
0
1
1.5
2
2.5
3
м/с
Сечения
а_кор
а_ср
а_пер
с_кор
с_ср
с_пер
w_кор
w_ср
w_пер
u_кор
u_ср
u_пер

$\alpha^T =$

	1	2	3
1	90.00	14.47	88.92
2	90.00	14.47	90.57
3	90.00	14.47	91.64

$\cdot°$

$\beta^T =$

	1	2	3
1	11.08	149.07	16.84
2	10.63	146.00	18.40
3	10.21	142.21	18.89

$\cdot°$

$80\cdot° \le \alpha^T =$

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

[1, c.78]

Угол поворота потока:

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

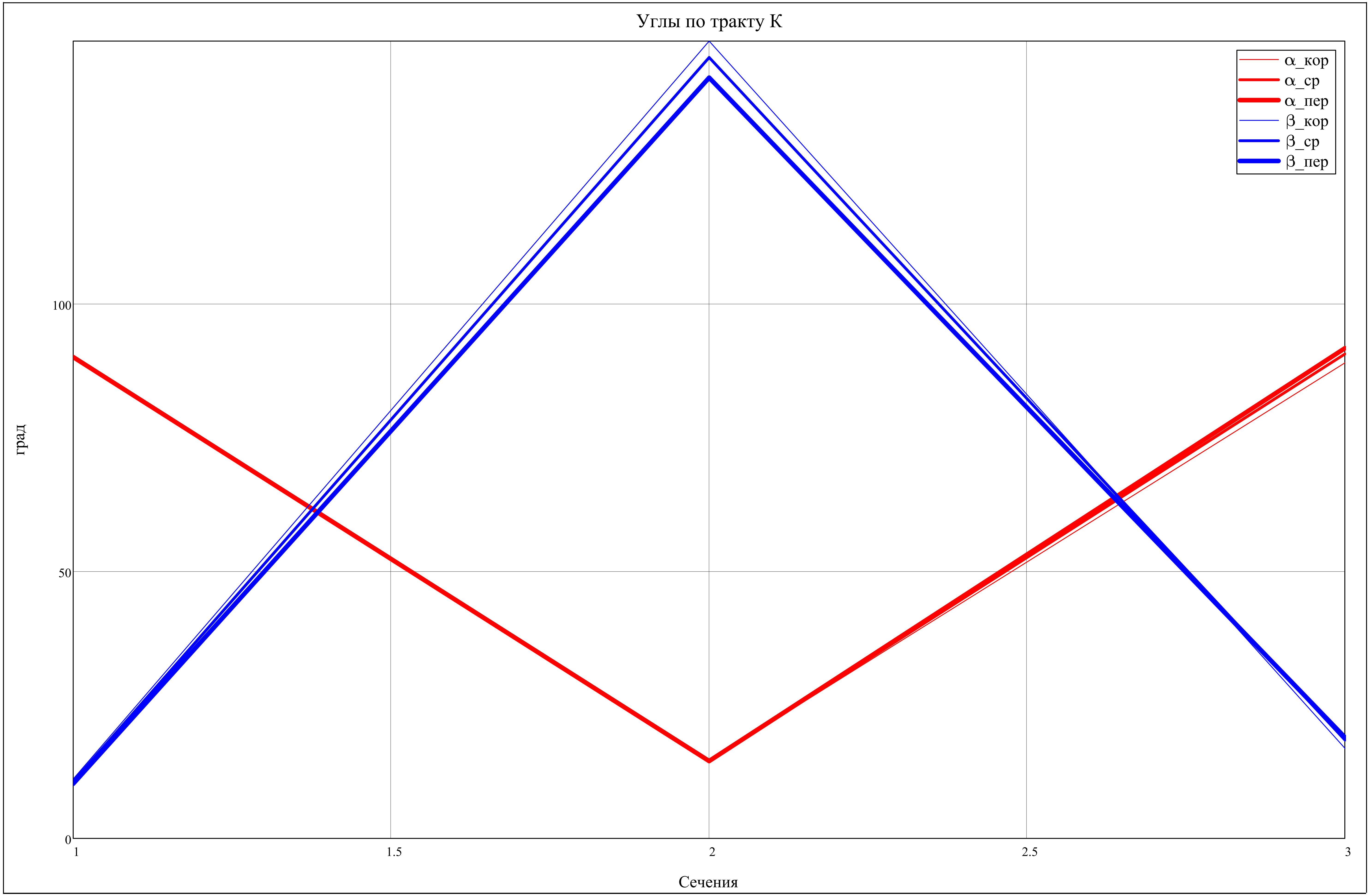
	1
1	75.53
2	75.53
3	75.53

$\cdot°$

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

	1
1	132.23
2	127.60
3	123.32

$\cdot°$



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	1.222	0.216
2	0.131	1.176	0.257
3	0.131	1.134	0.284

$\lambda_w{}^T =$

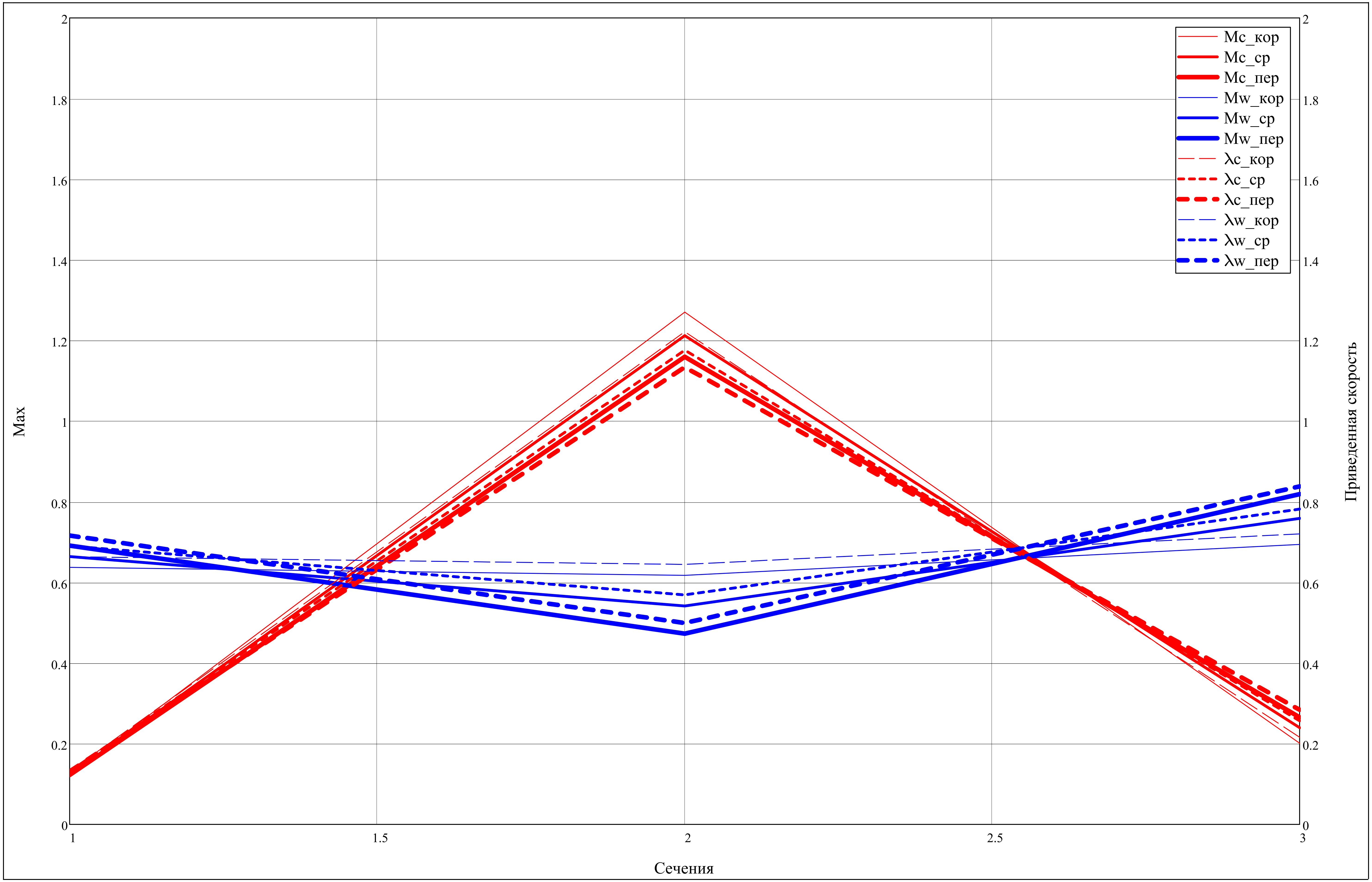
	1	2	3
1	0.664	0.645	0.720
2	0.690	0.569	0.782
3	0.717	0.499	0.838

$M_c{}^T =$

	1	2	3
1	0.123	1.270	0.201
2	0.123	1.212	0.240
3	0.123	1.160	0.265

$M_w{}^T =$

	1	2	3
1	0.637	0.618	0.694
2	0.664	0.542	0.759
3	0.691	0.473	0.819


Mc_кор
Mc_ср
Mc_пер
Mw_кор
Mw_ср
Mw_пер
λc_кор
λc_ср
λc_пер
λw_кор
λw_ср
λw_пер
Max
Приведенная скорость
Сечения

Вывод результатов расчета параметров потока по высоте Л

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

Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

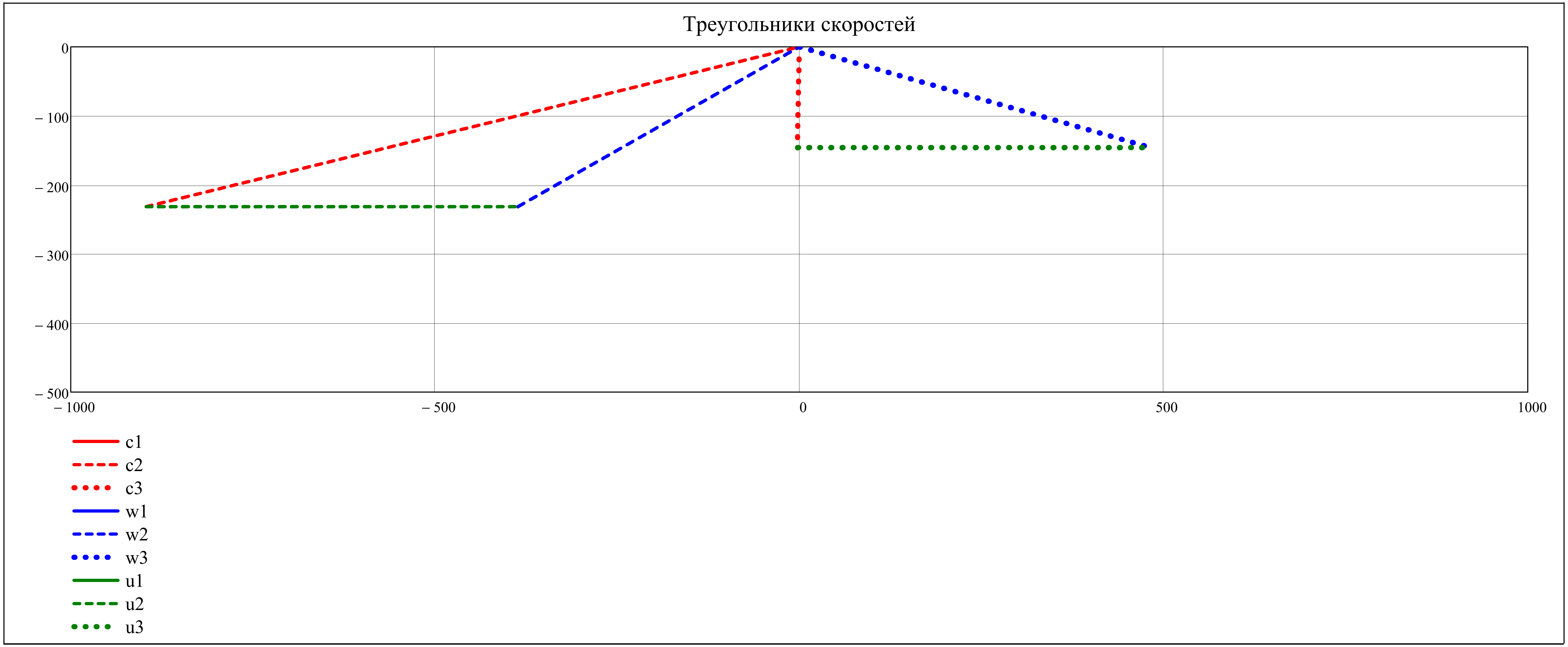
$$\Delta_w(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{l} -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \quad \text{if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) \ge 0\right) \wedge \left(-\left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right| \le v \le 0\right) \wedge (j \ne 1) \\ -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot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

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

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

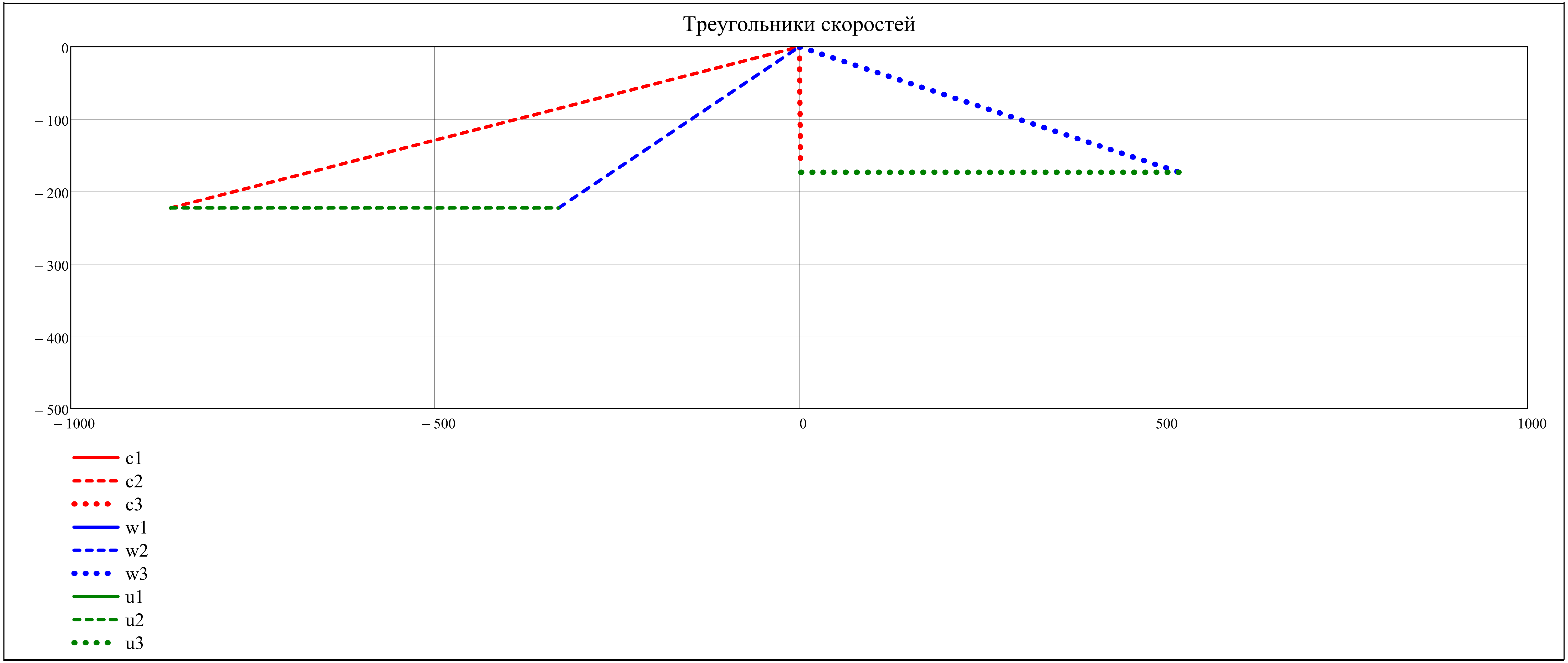
$$v = -\max(c,w,u), -\max(c,w,u) + \frac{\max(c,w,u)}{3000} \,..\, \max(c,w,u)$$

r = 1



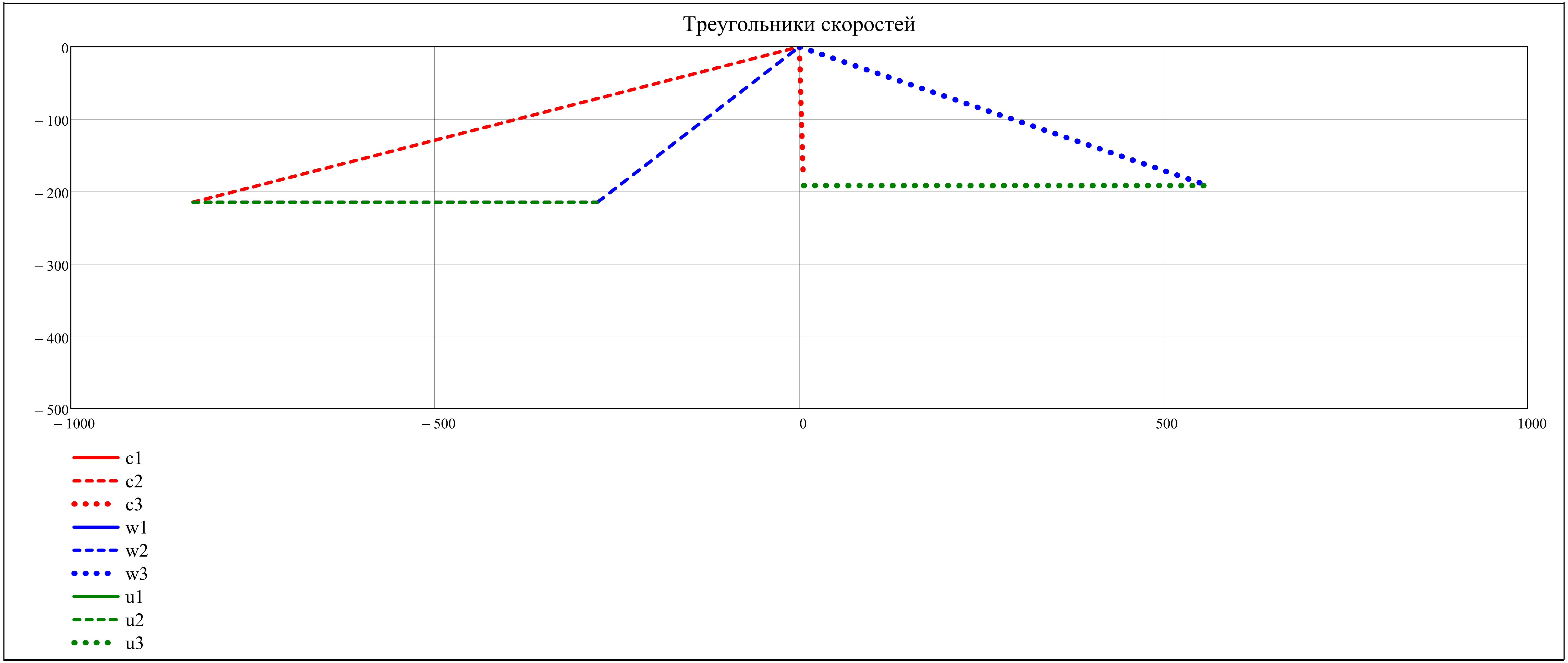
Треугольники скоростей
0
– 100
– 200
– 300
– 400
– 500
– 1000
– 500
0
500
1000
c1
c2
c3
w1
w2
w3
u1
u2
u3

$r = av(N_r)$



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

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

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

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

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

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

Расчет параметров решетки

Результаты расчета параметров решеток

Относительные радиусы профилей ():

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

	1
1	6.000
2	6.000
3	6.000

$\cdot\%$

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

	1
1	5.100
2	3.900
3	3.300

$\cdot\%$

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

	1
1	3.000
2	3.000
3	3.000

$\cdot\%$

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

	1
1	1.700
2	1.300
3	1.100

$\cdot\%$

Относительная толщина профиля ():

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

	1
1	15.00
2	15.00
3	15.00

$\cdot\%$

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

	1
1	17.00
2	13.00
3	11.00

$\cdot\%$

Относительный шаг решетки ():

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

	1
1	0.8343
2	0.8709
3	0.9075

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

	1
1	0.5828
2	0.6917
3	0.7939

Относительная густота решетки ():

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

	1
1	1.199
2	1.148
3	1.102

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

	1
1	1.716
2	1.446
3	1.260

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	1.96
2	1.33
3	1.04

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	2.04
2	2.04
3	2.04

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	0.65
2	0.44
3	0.35

$\cdot 10^{-3}$

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	75.53
2	75.53
3	75.53

$\cdot°$

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

	1
1	132.23
2	127.60
3	123.32

$\cdot°$

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

	1
1	117.3
2	117.3
3	117.3

$\cdot°$

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

	1
1	111.9
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	47.8
2	52.4
3	56.7

$\cdot°$

Результаты расчета параметров решеток

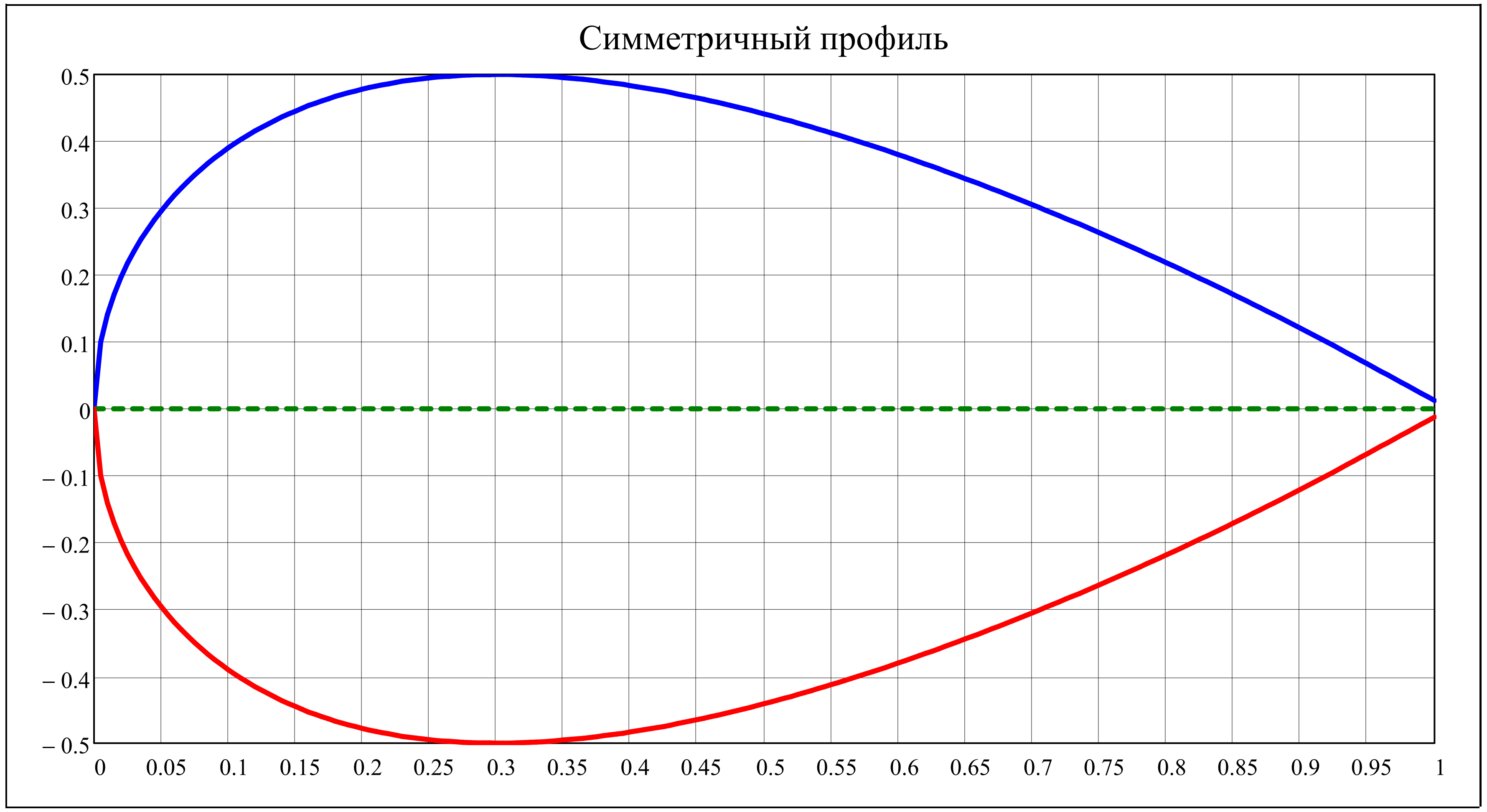
Подключение симметричного профиля

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

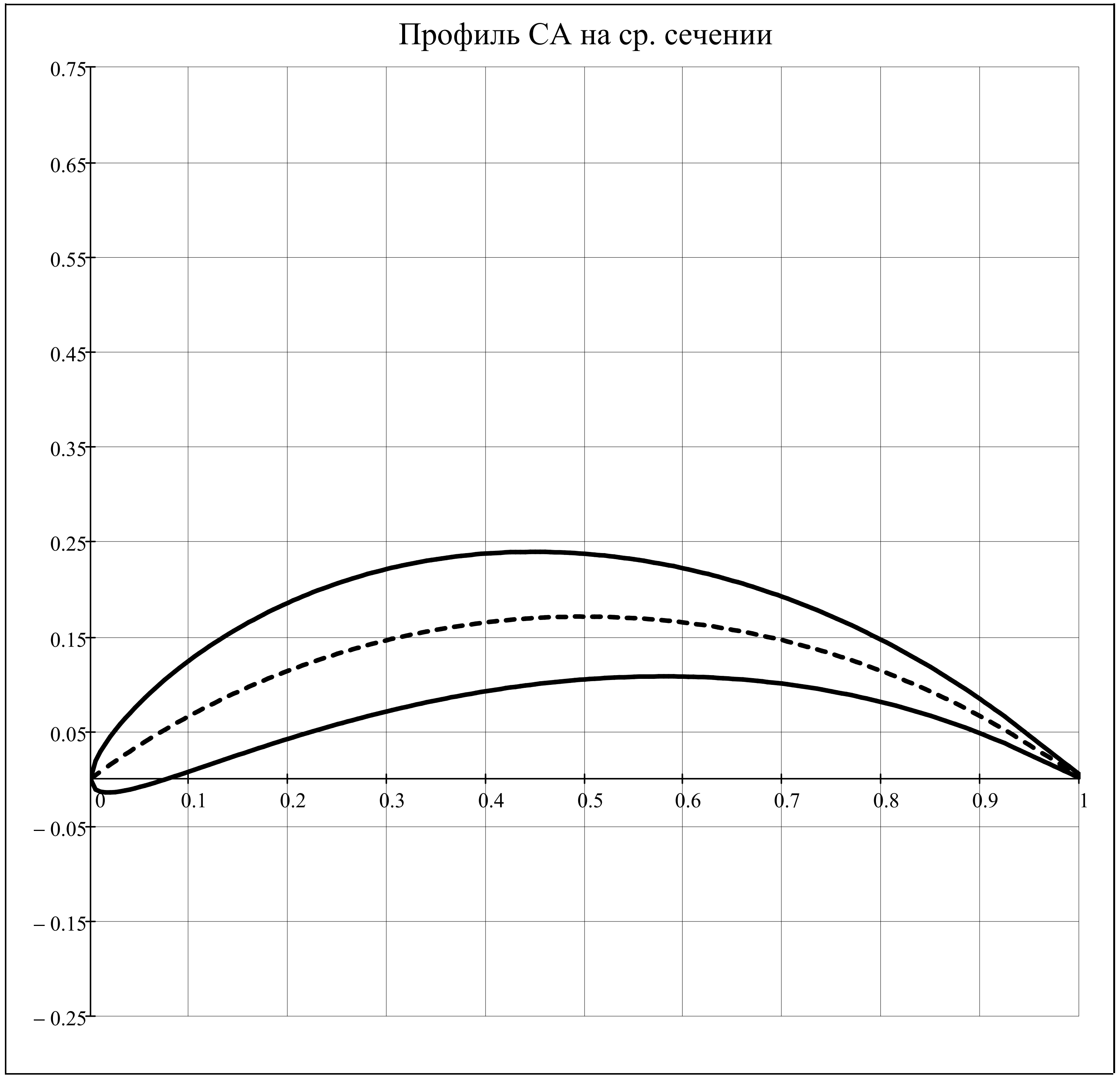
Относ. координаты профиля РК и СА:

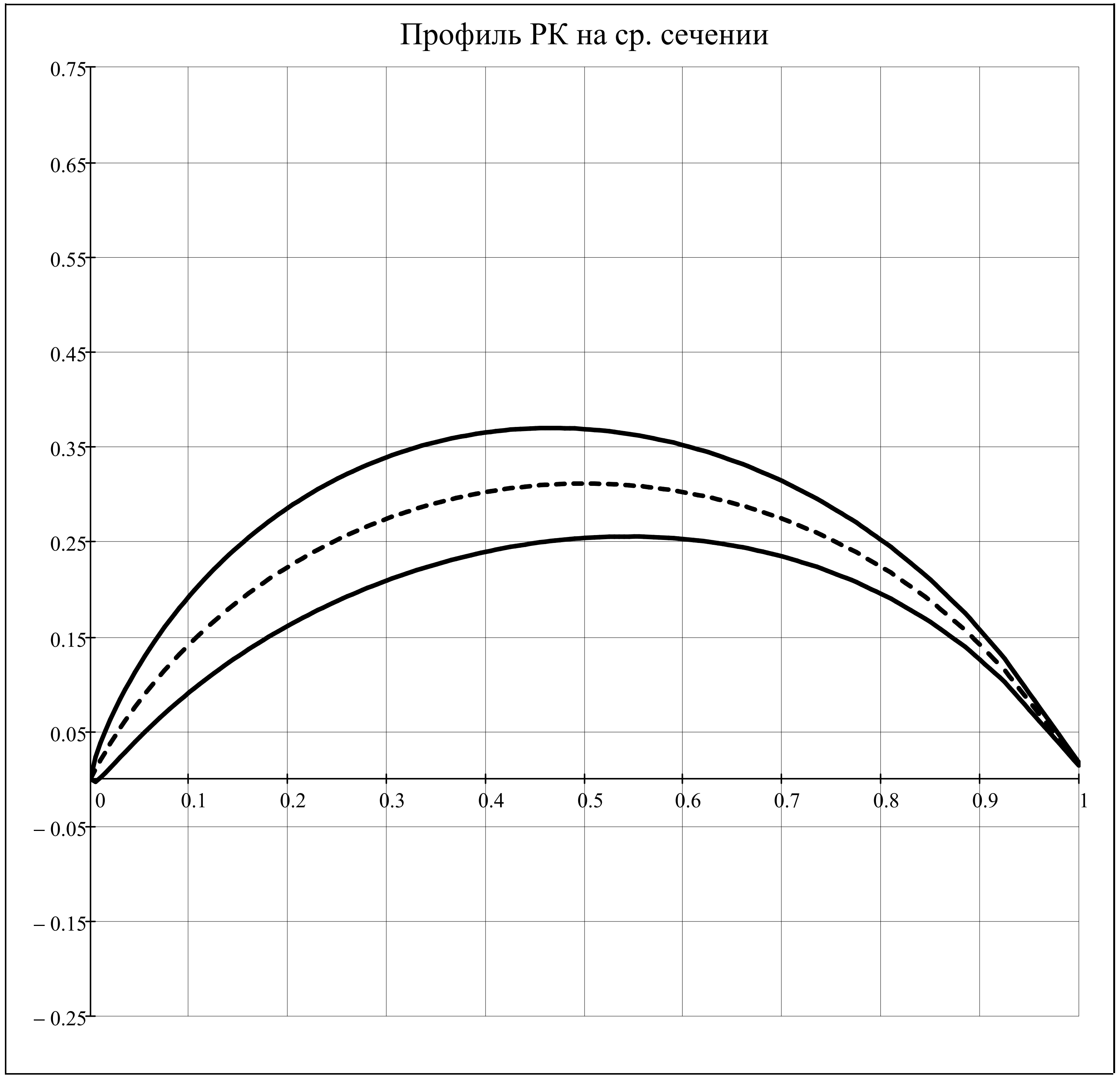
$$\mathrm{AIRFOIL}_0(x, line, \overline{f}, \overline{x}_f, \overline{c}) = \left| \begin{array}{l} \text{if } 0 \le x \le 1 \\ \quad \left| \begin{array}{ll} \mathrm{linterp}(X_U, Y_U, x) & \text{if line = "+"} \\ \dfrac{\mathrm{linterp}(X_U, Y_U, x) + \mathrm{linterp}(X_L, Y_L, x)}{2} & \text{if line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

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



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





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	78.09
2	78.09
3	78.09

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	70.66
2	70.66
3	70.66

$\cdot 10^{-3}$

$area_{stator}^{T} =$

	1
1	474.07
2	474.07
3	474.07

$\cdot 10^{-6}$

$Sx_{stator}^{T} =$

	1
1	4235.7
2	4235.7
3	4235.7

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{stator}^{T} =$

	1
1	13572.3
2	13572.3
3	13572.3

$\cdot 10^{-9}$

$x0_{stator}^{T} =$

	1
1	28.6
2	28.6
3	28.6

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{stator}^{T} =$

	1
1	8.9
2	8.9
3	8.9

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	52.03
2	44.79
3	40.21

$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	44.28
2	39.56
3	36.21

$\cdot 10^{-3}$

$area_{rotor}^{T} =$

	1
1	171.21
2	104.00
3	74.31

$\cdot 10^{-6}$

$Sx_{rotor}^{T} =$

	1
1	1714.5
2	883.8
3	554.1

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{rotor}^{T} =$

	1
1	2766.9
2	1498.0
3	983.5

$\cdot 10^{-9}$

$x0_{rotor}^{T} =$

	1
1	16.2
2	14.4
3	13.2

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{rotor}^{T} =$

	1
1	10.0
2	8.5
3	7.5

$\cdot 10^{-3}$

$$Jx_{stator}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 44318 \\ \hline 2 & 44318 \\ \hline 3 & 44318 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy_{stator}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 509156 \\ \hline 2 & 509156 \\ \hline 3 & 509156 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy_{stator}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 128683 \\ \hline 2 & 128683 \\ \hline 3 & 128683 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jx0_{stator}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 6472 \\ \hline 2 & 6472 \\ \hline 3 & 6472 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy0_{stator}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 120593 \\ \hline 2 & 120593 \\ \hline 3 & 120593 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy0_{stator}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 7417 \\ \hline 2 & 7417 \\ \hline 3 & 7417 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

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

$$Jx_{rotor}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 18828 \\ \hline 2 & 8190 \\ \hline 3 & 4501 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy_{rotor}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 58593 \\ \hline 2 & 28273 \\ \hline 3 & 17058 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy_{rotor}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 29177 \\ \hline 2 & 13416 \\ \hline 3 & 7736 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jx0_{rotor}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 1659 \\ \hline 2 & 680 \\ \hline 3 & 369 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jy0_{rotor}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 13878 \\ \hline 2 & 6697 \\ \hline 3 & 4040 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jxy0_{rotor}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 1468 \\ \hline 2 & 687 \\ \hline 3 & 402 \\ \hline \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$\alpha\_major_{rotor}^{T} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 6.76 \\ \hline 2 & 6.43 \\ \hline 3 & 6.17 \\ \hline \end{array} \cdot {}^\circ$$

$$Ju_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 5992 \\ 2 & 5992 \\ 3 & 5992 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jv_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 121073.3 \\ 2 & 121073.3 \\ 3 & 121073.3 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

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

$$Jp_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 127065 \\ 2 & 127065 \\ 3 & 127065 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Wp_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 3148.5 \\ 2 & 3148.5 \\ 3 & 3148.5 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$stiffness_{stator}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 11350.7 \\ 2 & 11350.7 \\ 3 & 11350.7 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Ju_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1485 \\ 2 & 602 \\ 3 & 326 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Jv_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 14052 \\ 2 & 6774 \\ 3 & 4084 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

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

$$Jp_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 15536 \\ 2 & 7376 \\ 3 & 4410 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$Wp_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 637.5 \\ 2 & 342.3 \\ 3 & 224.3 \end{array} \cdot 10^{-9}$$

$$stiffness_{rotor}{}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1677.8 \\ 2 & 473.4 \\ 3 & 204.5 \end{array} \cdot 10^{-12}$$

$$CPx_{stator}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 23.795 \\ 2 & 23.795 \\ 3 & 23.795 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$CPx_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 13.432 \\ 2 & 11.972 \\ 3 & 11.001 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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

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

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

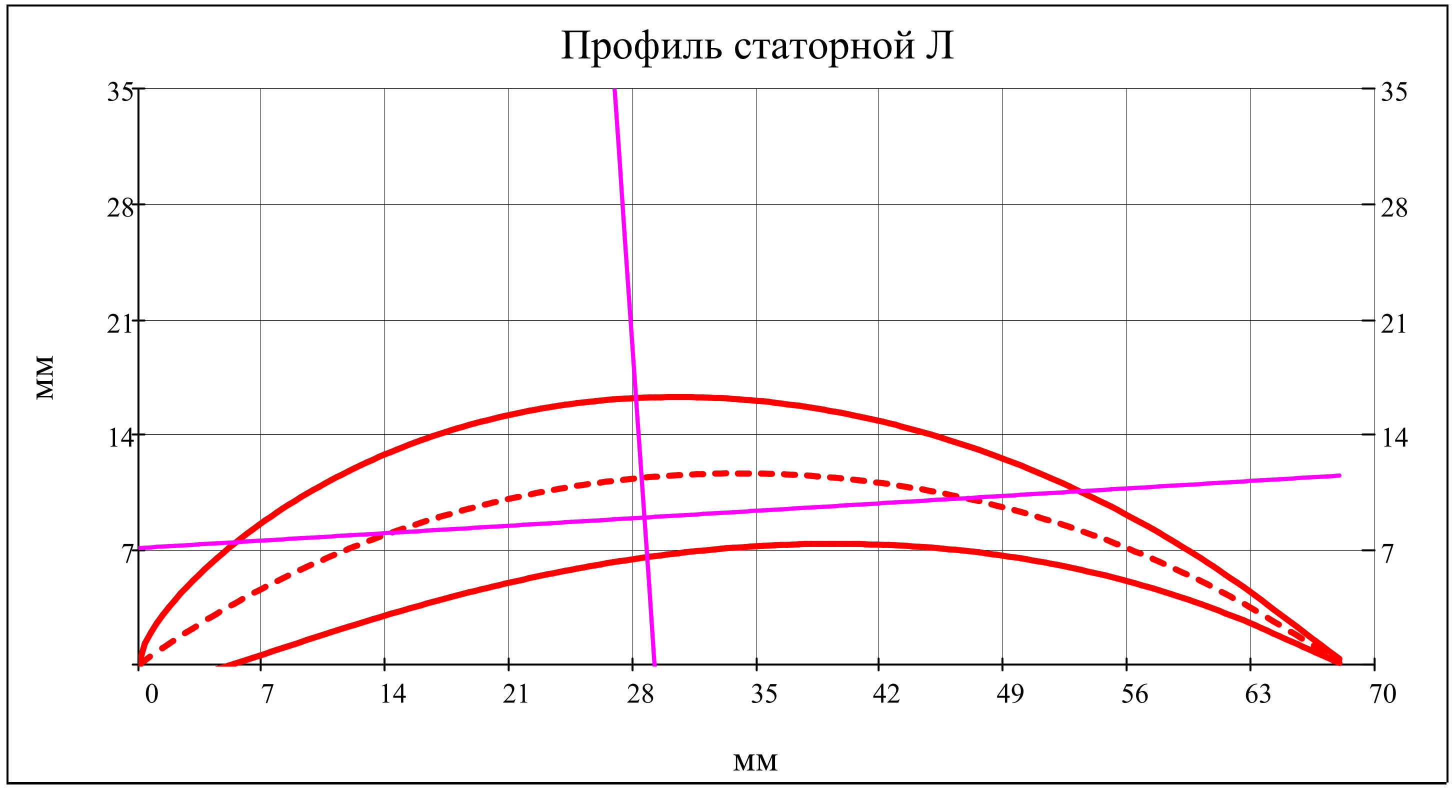
Построение профилей Л РК и НА

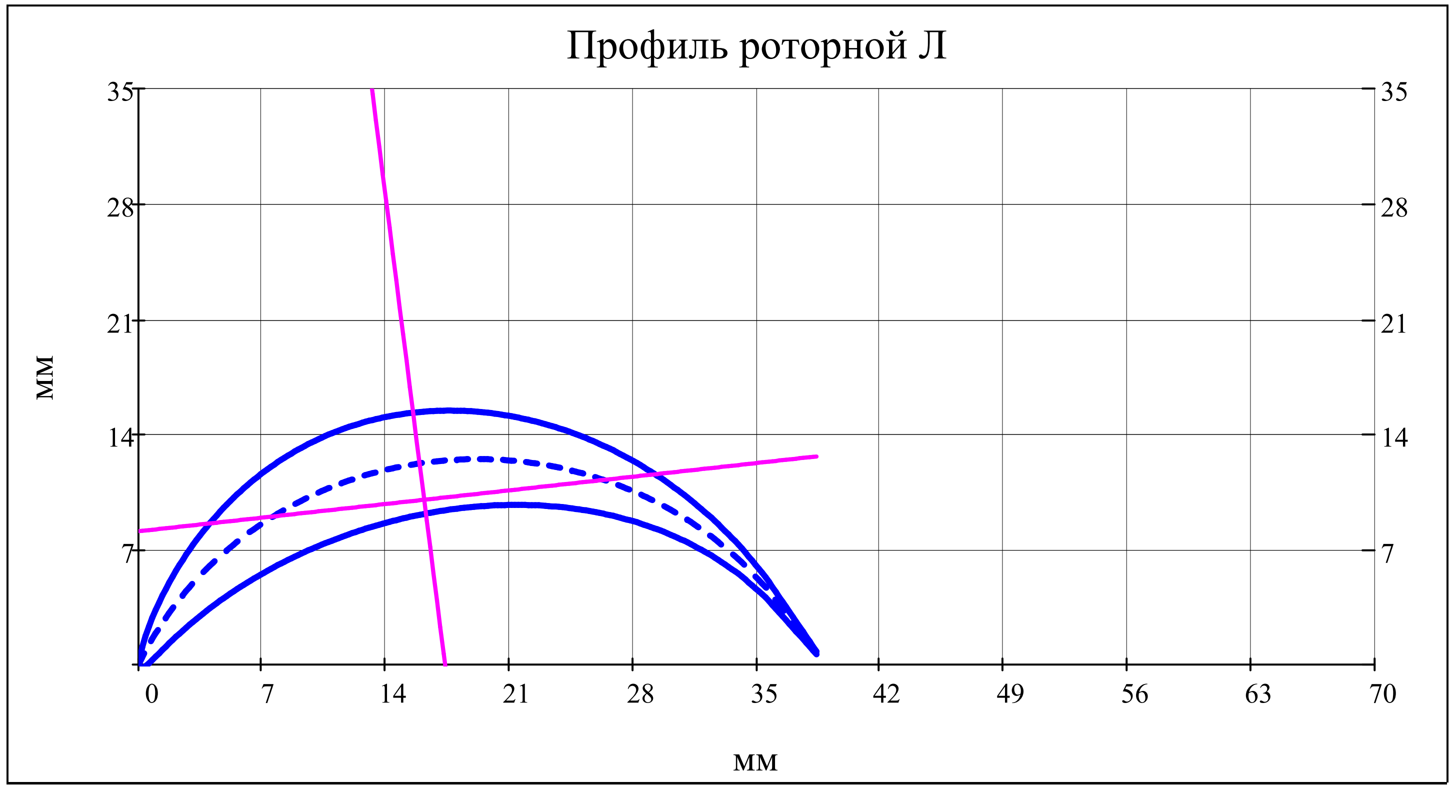
$$AXLE0(type, x, i, r) := \begin{vmatrix} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right)\cdot\left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } type = \text{"rotor"} \\ \dfrac{y0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{stator_{i,r}}\right)\cdot\left(x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

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

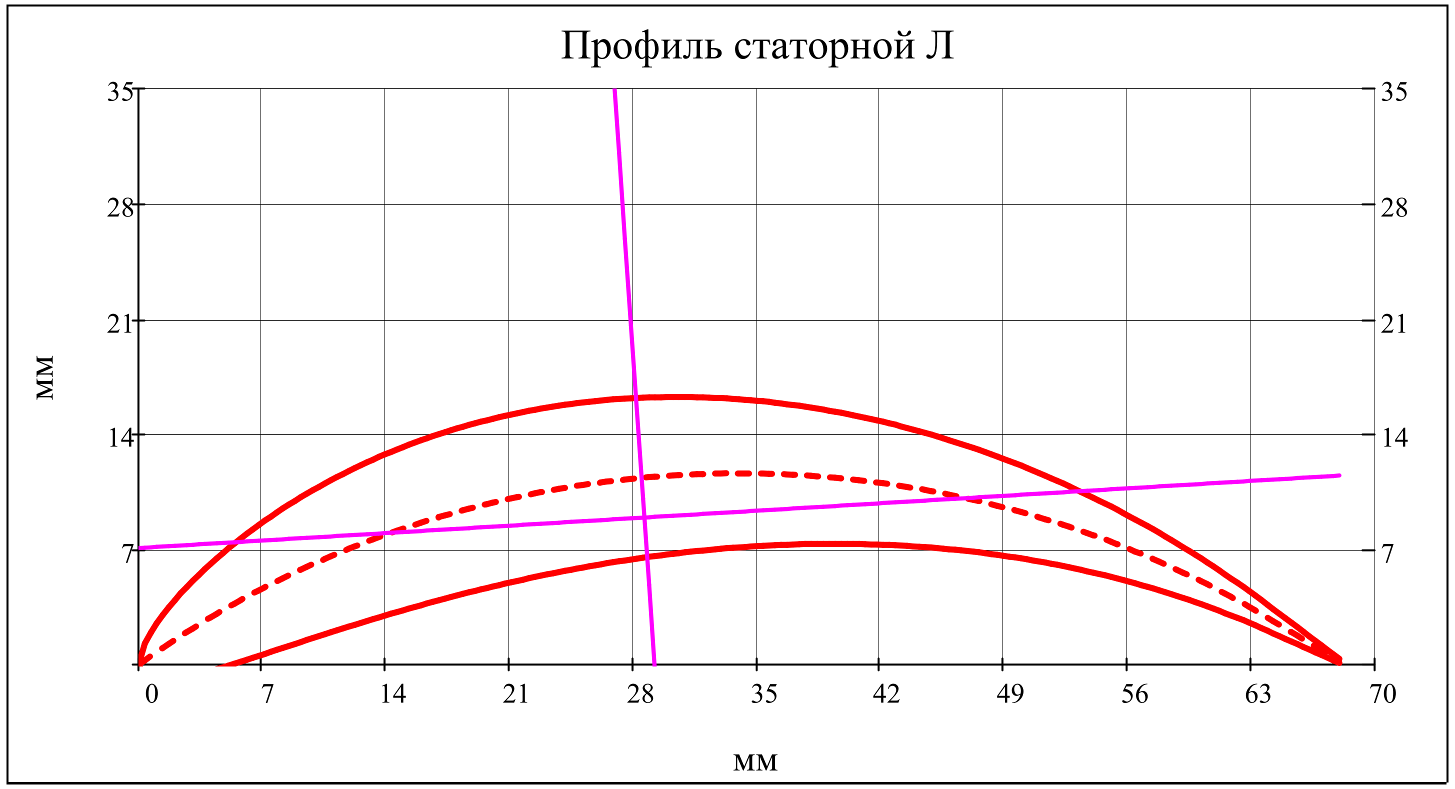
$$AXLE90(type, x, i, r) := \begin{vmatrix} \dfrac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}} + \dfrac{\pi}{2}\right)\cdot\left(x - \dfrac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } (type = \text{"rotor"}) \wedge \left|\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right|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

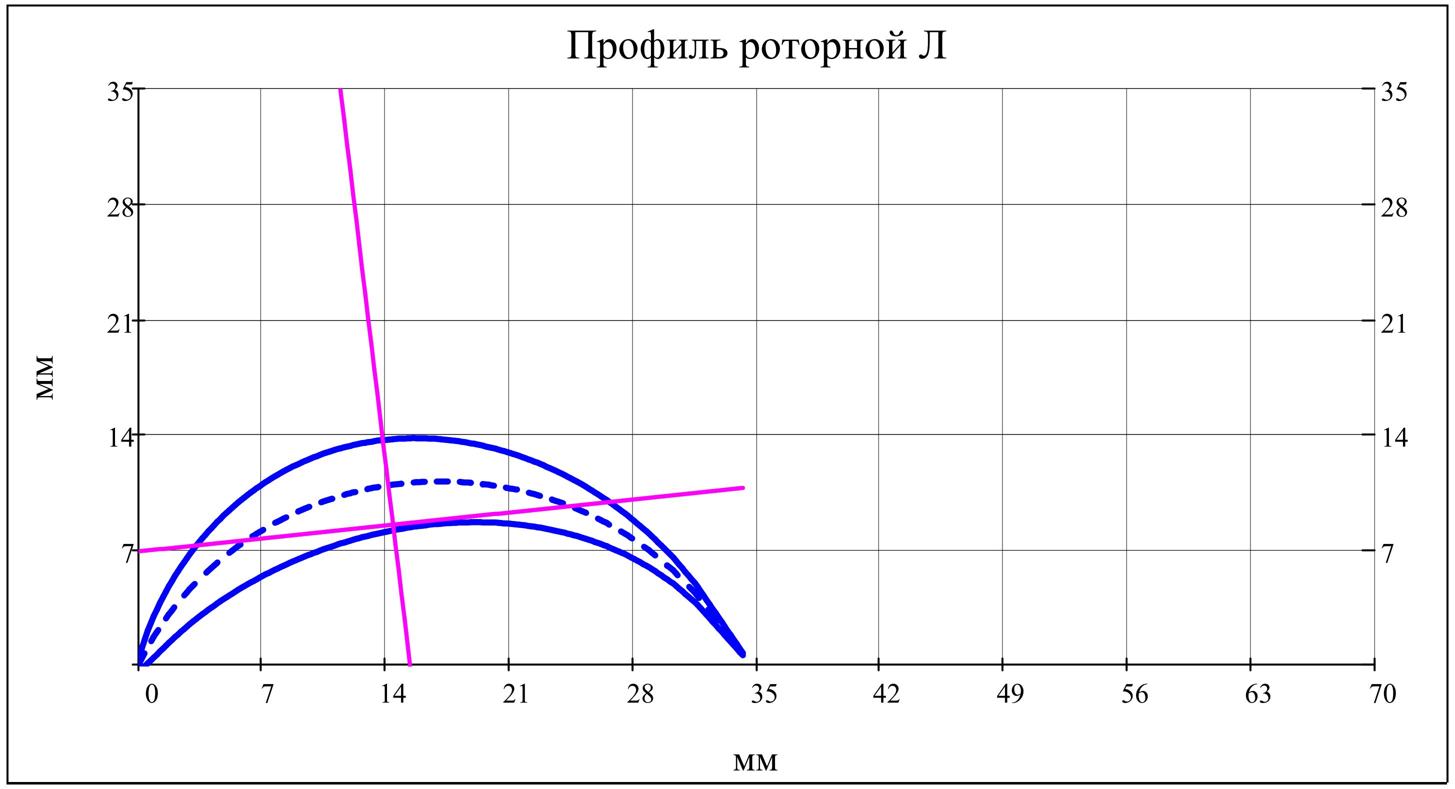
$r = 1$


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

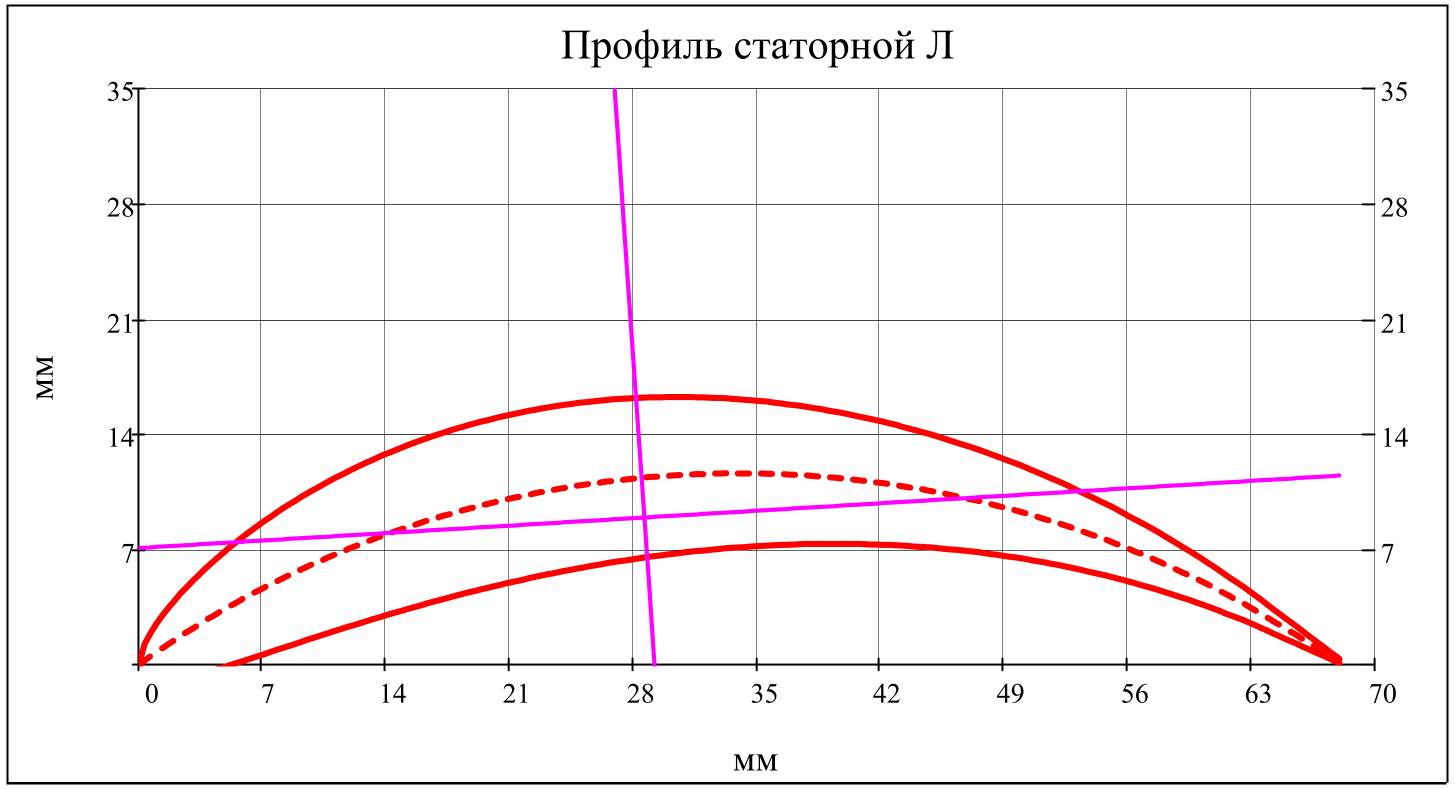

Профиль роторной Л
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм
мм

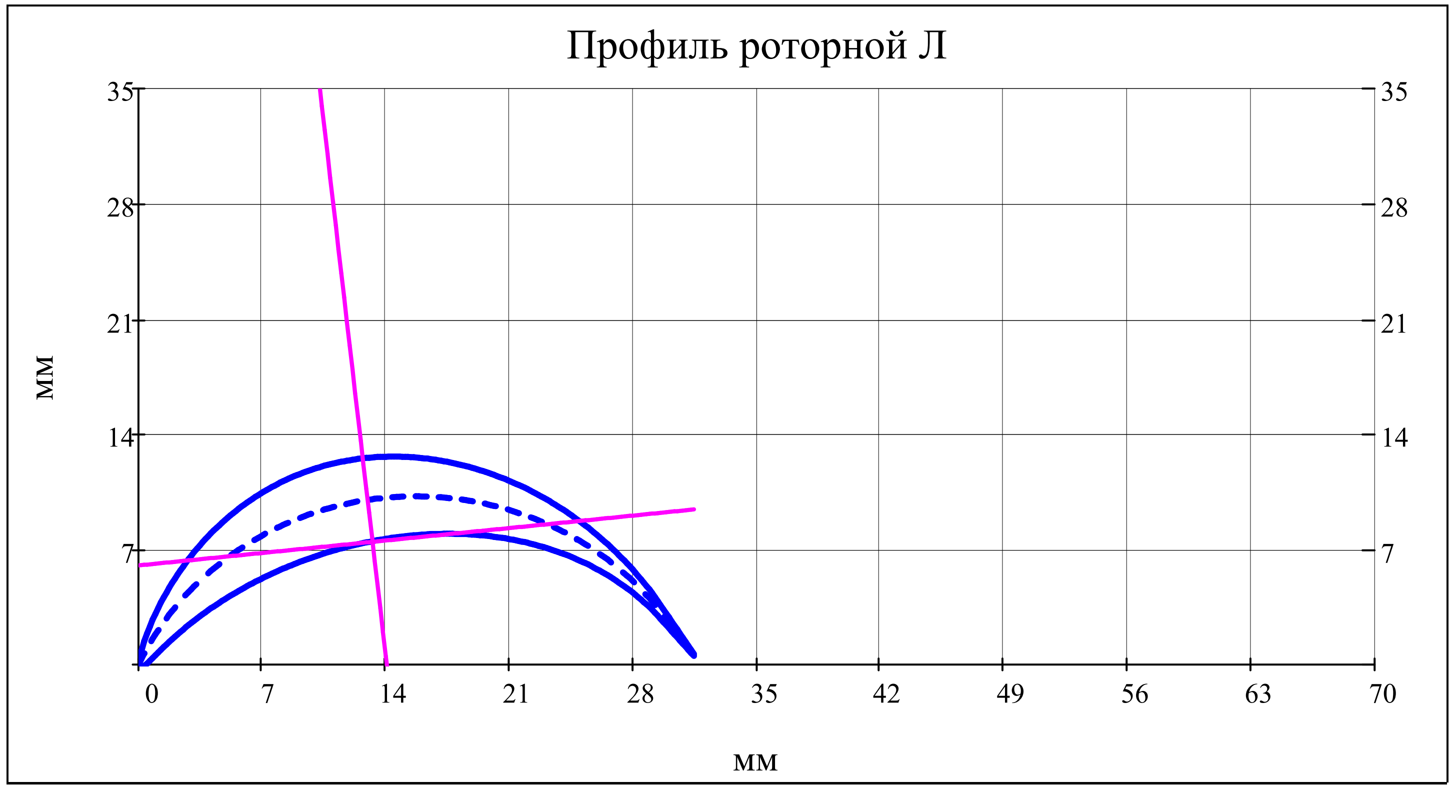
$r = av(N_r)$





$r = N_r$





Построение профилей Л РК и НА

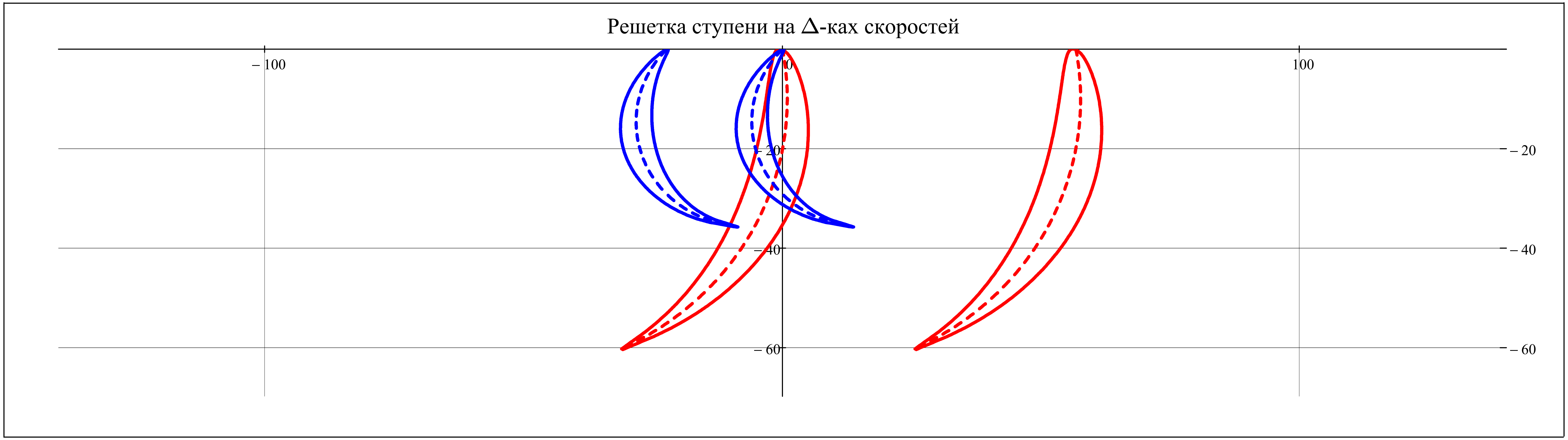
Вывод координат для построения профиля Л

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

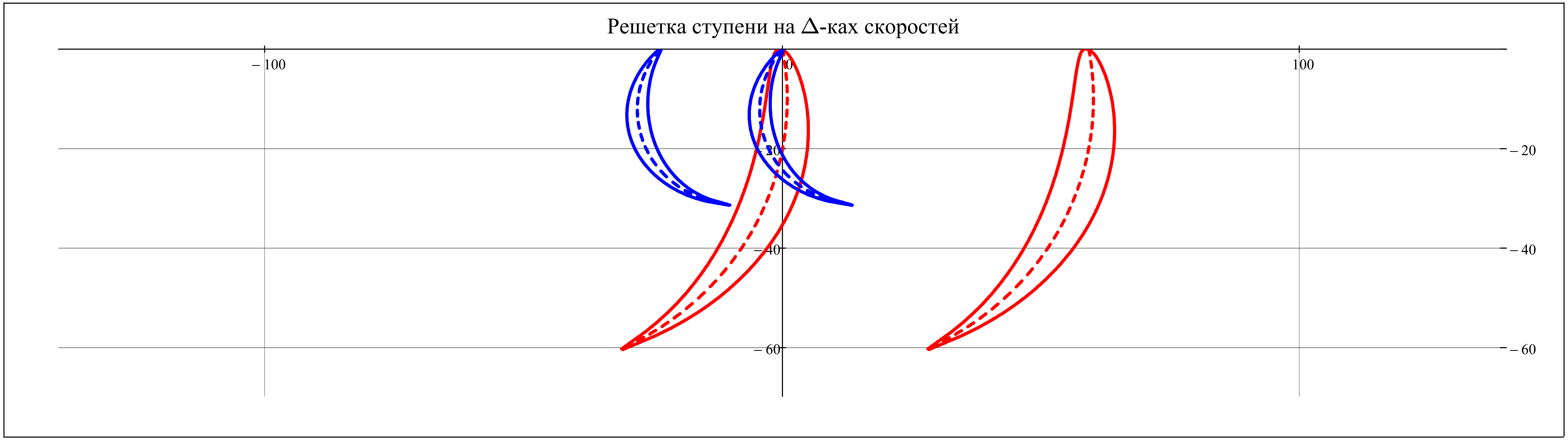
$$b_{lim} := \frac{\text{ceil}\left(\max\left(\text{chord}_{\text{rotor}_{j,N_r}}, \text{chord}_{\text{stator}_{j,N_r}}\right)\cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0\cdot 10^{-3}$$

Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

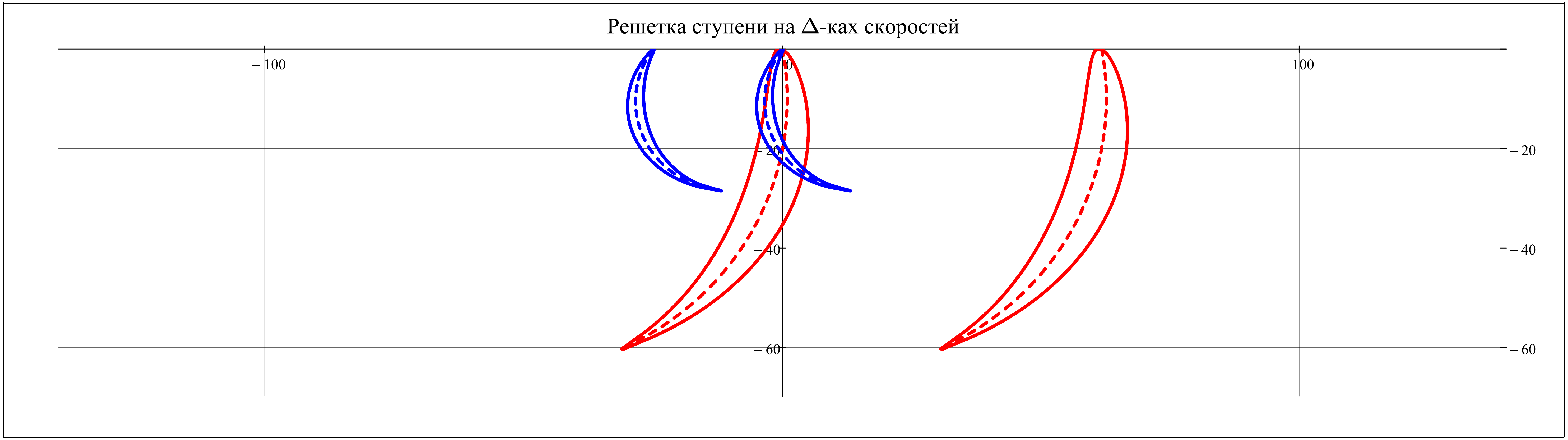
$r := 1$



$r = av(N_r)$



$r = N_r$



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

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

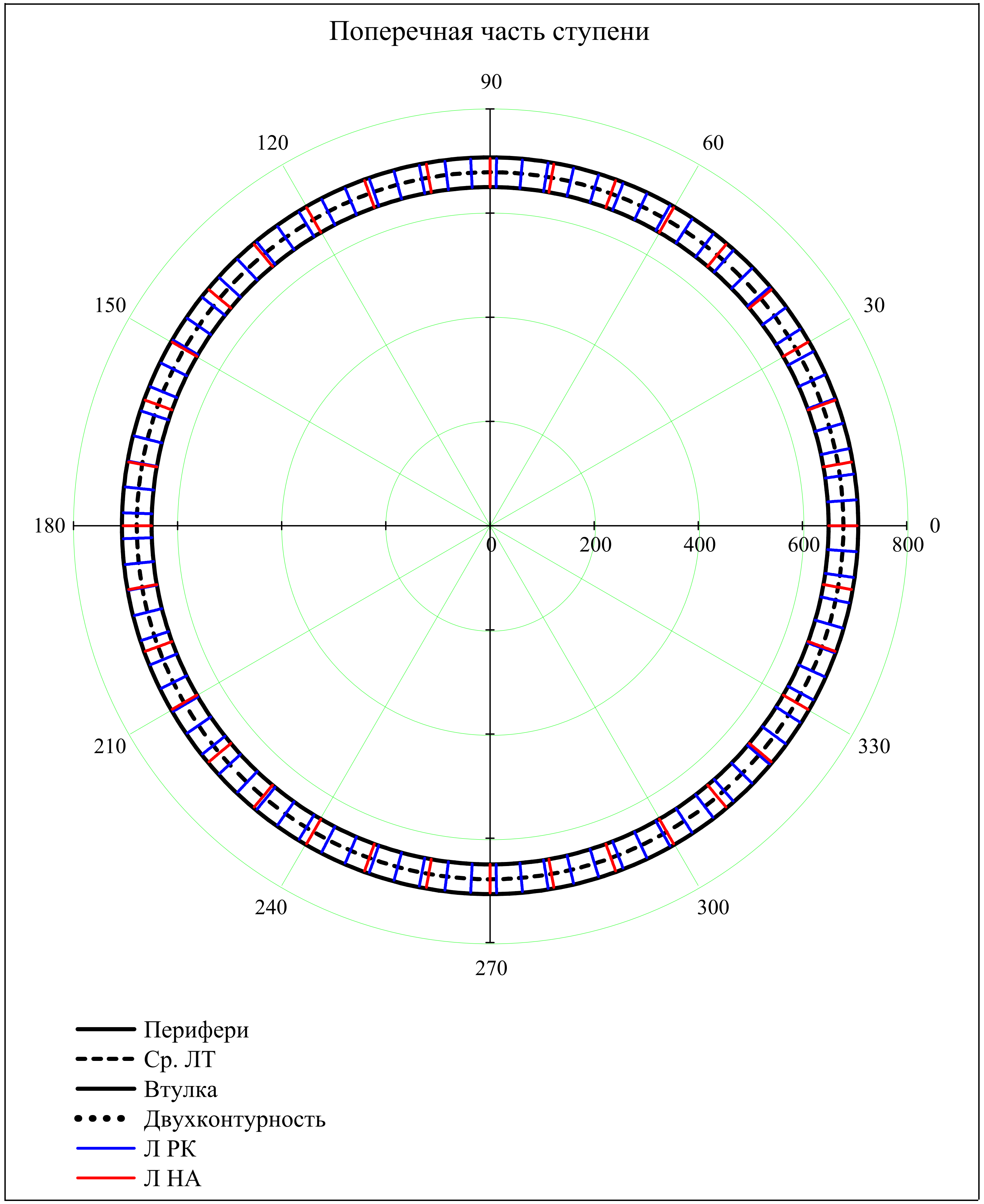
$$i_{rotor} := 1 .. Z_{rotor_j}$$

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

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

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

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



Поперечная часть ступени

Расчет собственных частот колебаний Л

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	12599	5146						
2	78961	32254						
3	221116	90322						
4	433623	177128						
5	716516	292685						
6	1070076	437108						

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

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

	1	2
1	8364	5507
2	25091	16521
3	41819	27535
4	58546	38548
5	75273	49562
6	92001	60576

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

	1	2
1	16727	11014
2	33455	22028
3	50182	33041
4	66910	44055
5	83637	55069
6	100364	66083

Расчет собственных частот колебаний Л

Вывод результатов расчета собственных частот колебаний Л

Расчетный узел: type = "turbine"

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

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

Расчет Л на прочность

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

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

Определение координат точек профиля Л, наиболее удаленных от НЛ

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$u\_u_{rotor}^T =$

	1
1	-0.219
2	0.395
3	-5.990

$\cdot 10^{-3}$

$v\_u_{rotor}^T =$

	1
1	5.326
2	4.047
3	13.961

$\cdot 10^{-3}$

$u\_l_{rotor}^T =$

	1
1	21.035
2	18.836
3	-8.989

$\cdot 10^{-3}$

$v\_l_{rotor}^T =$

	1
1	-11.797
2	-10.076
3	-17.329

$\cdot 10^{-3}$

$u\_u_{stator}^T =$

	1
1	-7.067
2	8.162
3	8.158

$\cdot 10^{-3}$

$v\_u_{stator}^T =$

	1
1	29.147
2	8.196
3	8.200

$\cdot 10^{-3}$

$u\_l_{stator}^T =$

	1
1	-11.367
2	-25.854
3	-25.848

$\cdot 10^{-3}$

$v\_l_{stator}^T =$

	1
1	-38.703
2	-14.484
3	-14.496

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

	1
1	-18.39
2	-8.85
3	0.00

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

	1
1	40.27
2	21.79
3	0.00

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

	1
1	0.00
2	3.46
3	13.82

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

	1
1	0.00
2	-7.05
3	-28.18

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1
2	1
3	1

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

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

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

	1
1	161.45
2	101.66
3	0.00

$\cdot 10^6$

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

	1
1	0.00
2	5.60
3	16.39

$\cdot 10^6$

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

$safety_{rotor}{}^T =$

	1
1	1.27
2	2.02
3	00000000000000000000000000000000

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

	1
1	0
2	1
3	1

$safety_{stator}{}^T =$

	1
1	00000000000000000000000000000000
2	36.61
3	12.51

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

	1
1	1
2	1
3	1

Рассматриваемая ступень:

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

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

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

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

$\cdot 10^{-3}$

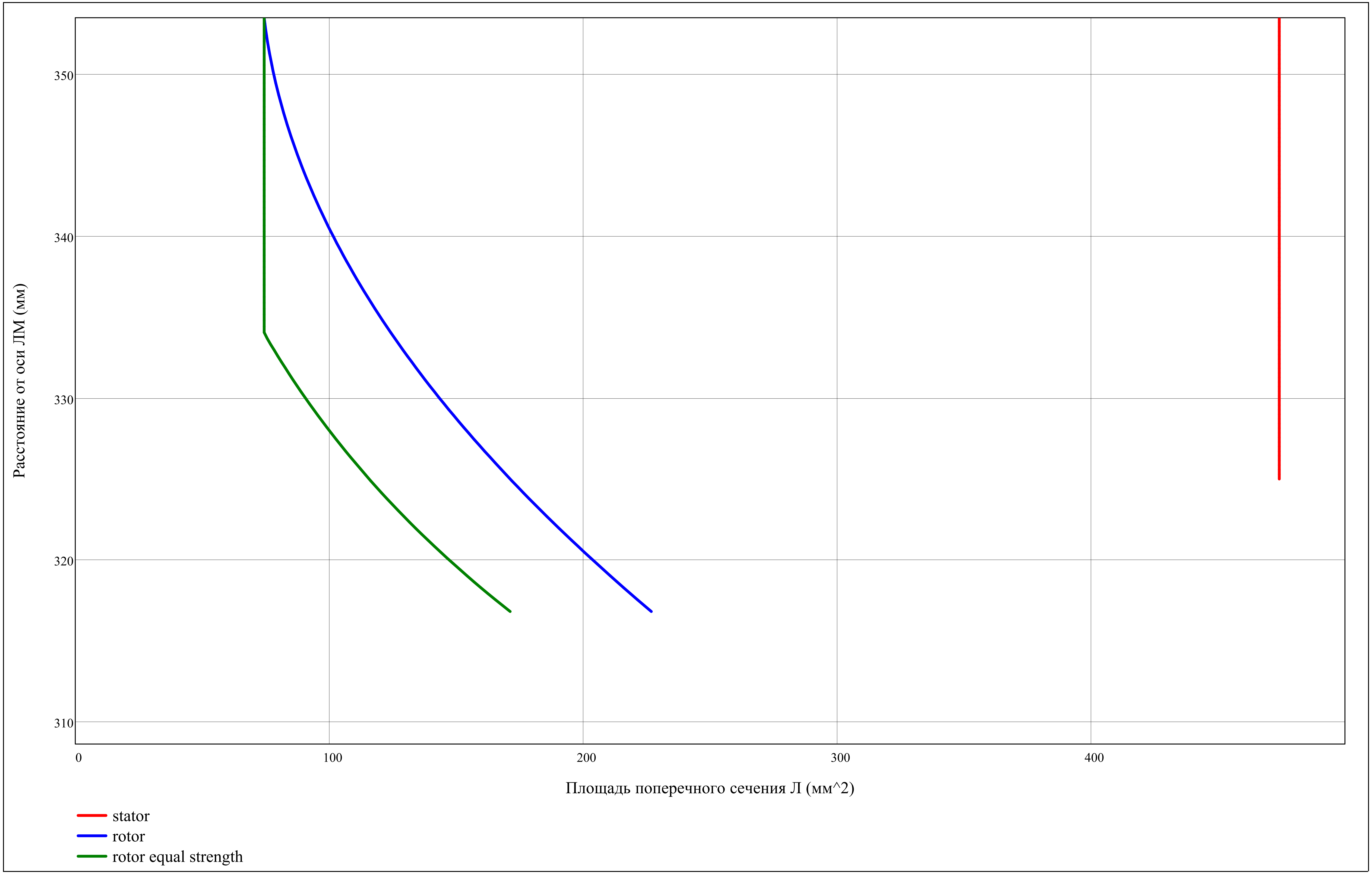
Дискретизация по высоте Л:

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

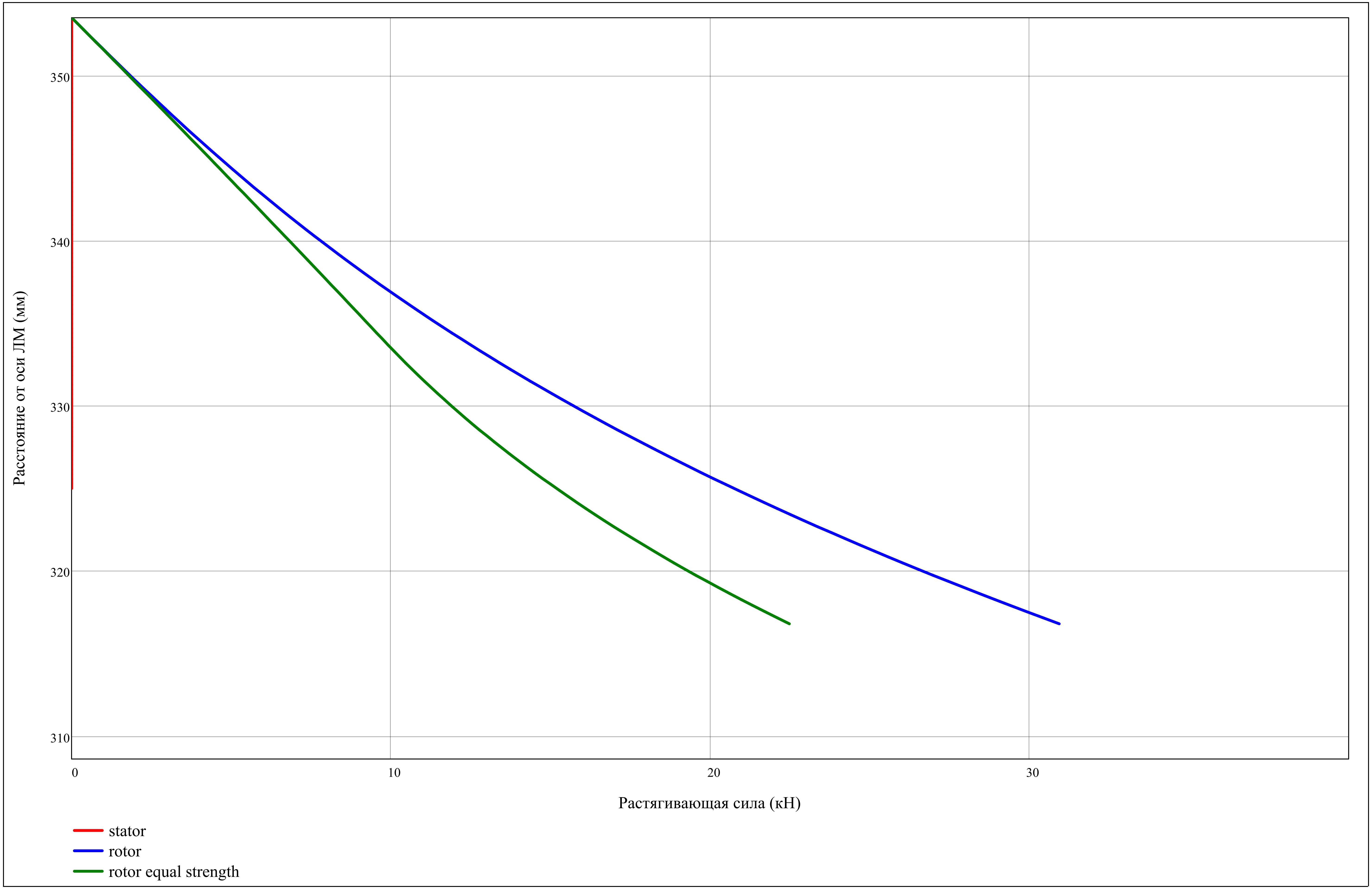
$$z_{rotor} := \left| \begin{array}{l} \text{mean}(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}), \text{mean}(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}) + \frac{\text{mean}(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}) - \text{mean}(Rj_{1,1}, Rj_{2,1})}{100} .. \text{mean}(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}) \ \text{if } type = \text{"compressor"} \\ \text{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}),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

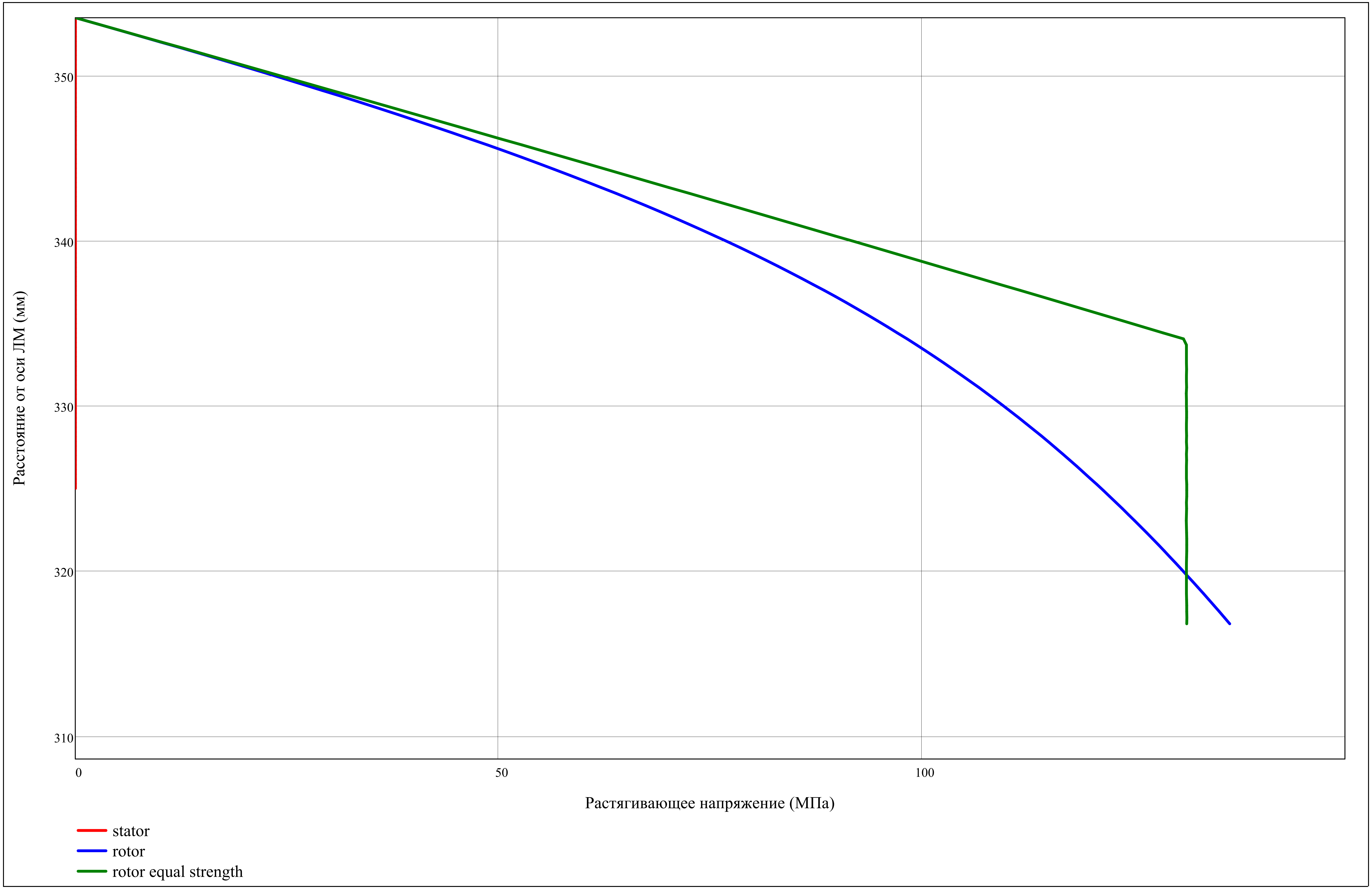
$$z_{stator} := \left| \begin{array}{l} \text{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}), \text{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}) + \frac{\text{mean}(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}) - \text{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1})}{100} .. \text{mean}(Rj_{2,N_r}, Rj_{3,N_r}) \ \text{if } type = \text{"compressor"} \\ \text{mean}(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}),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

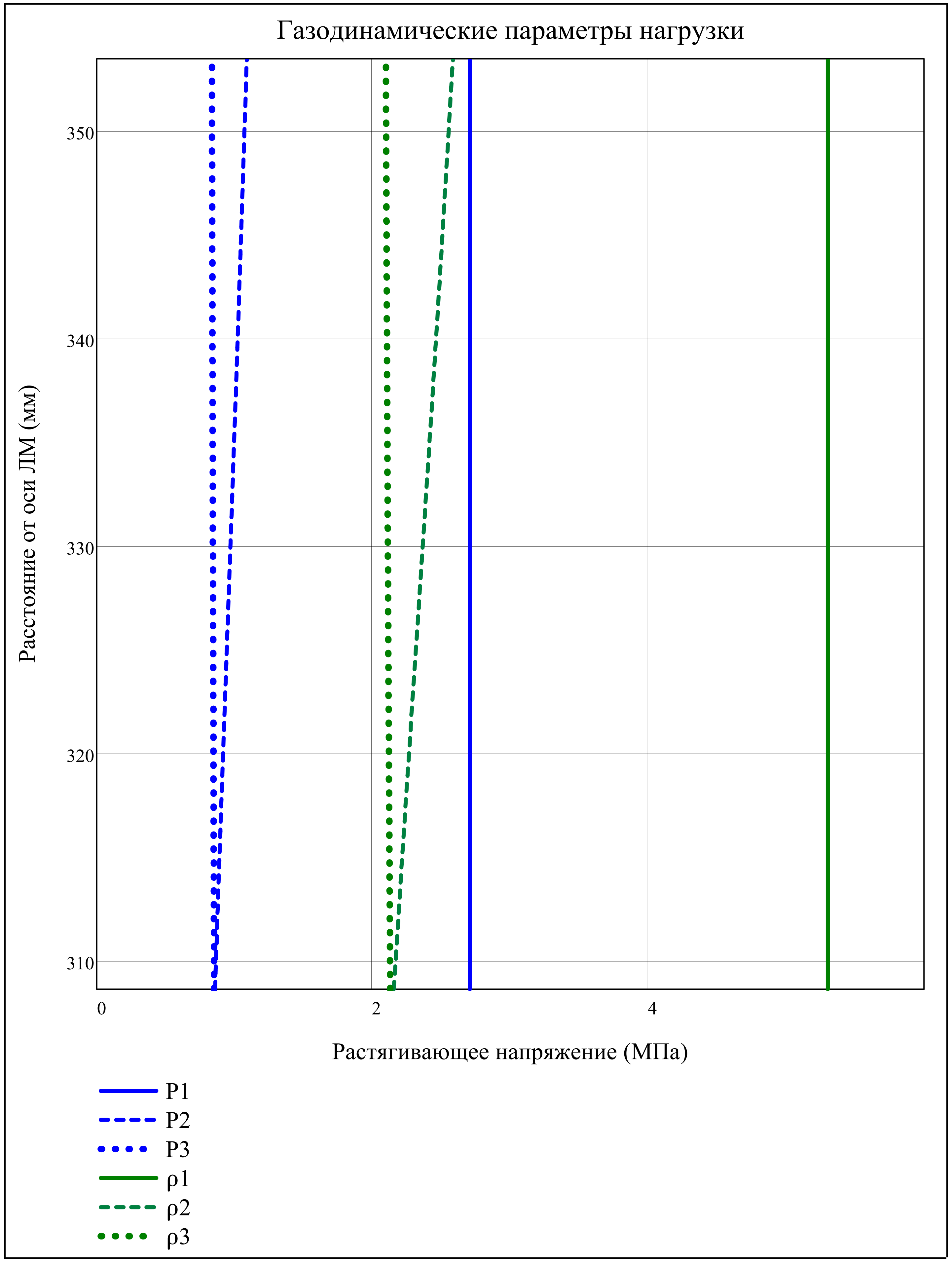
Результаты расчета на прочность Л

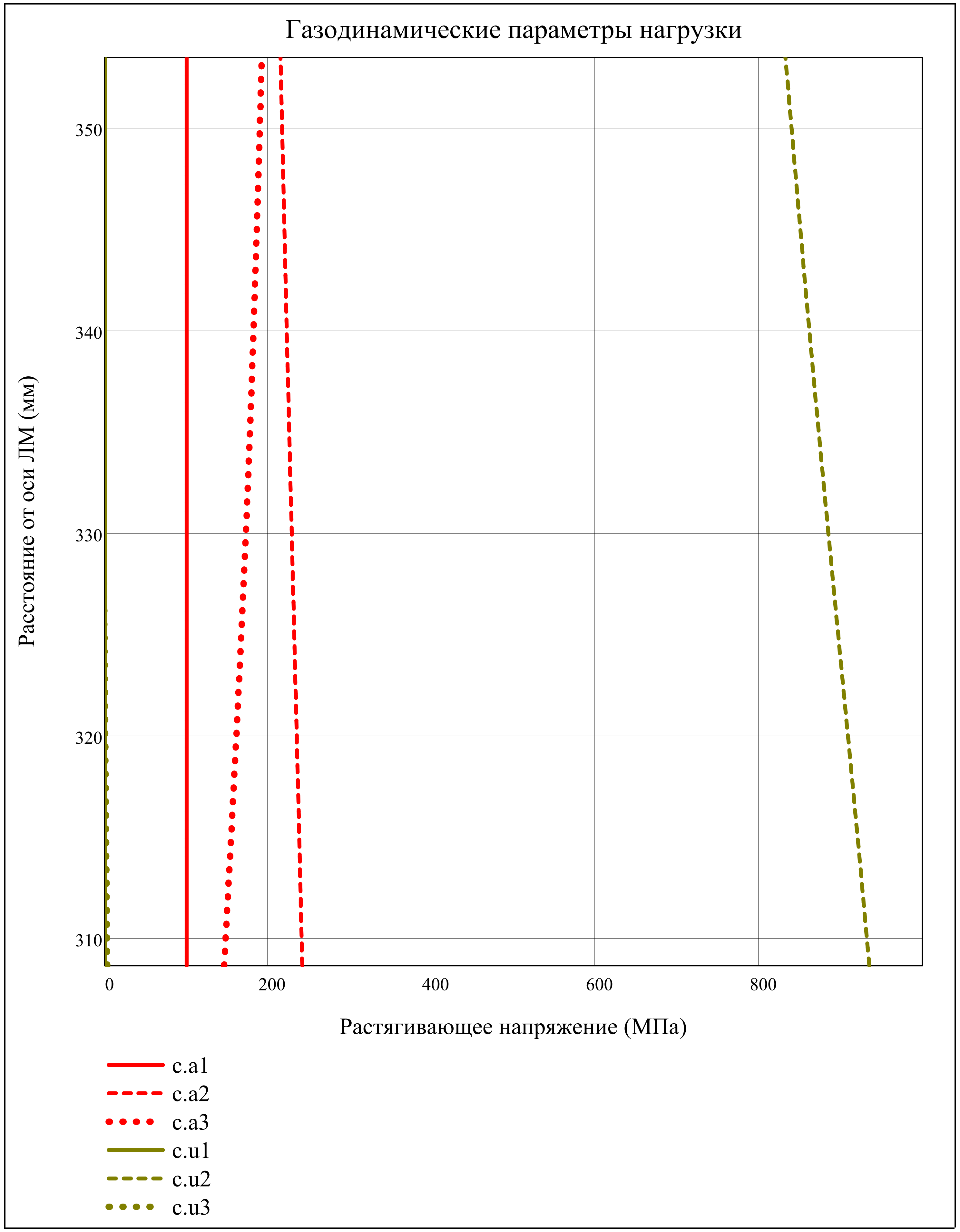


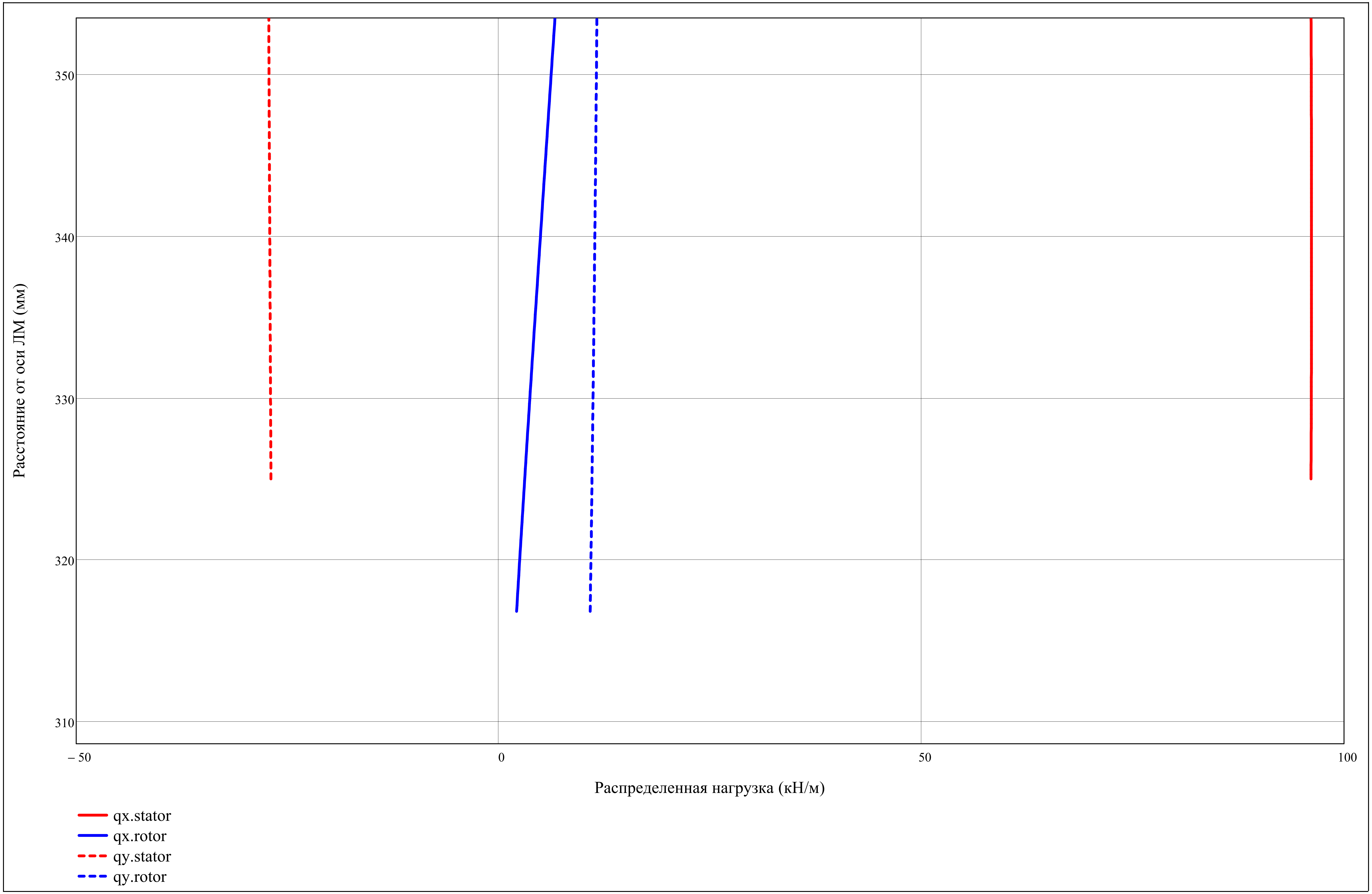
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
100
200
300
400
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength


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

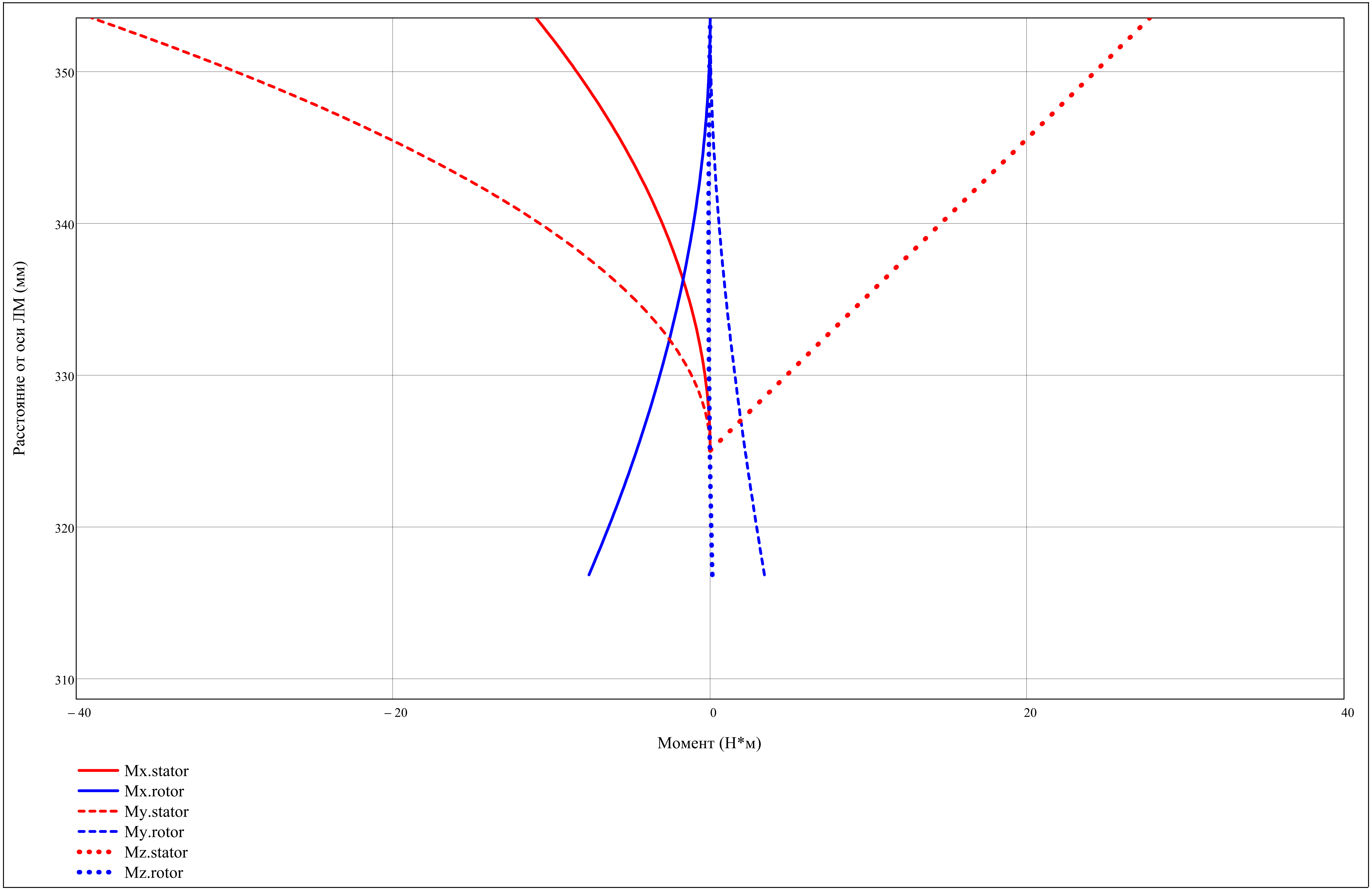

350
340
330
320
310
0
50
100
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Растягивающее напряжение (МПа)
stator
rotor
rotor equal strength

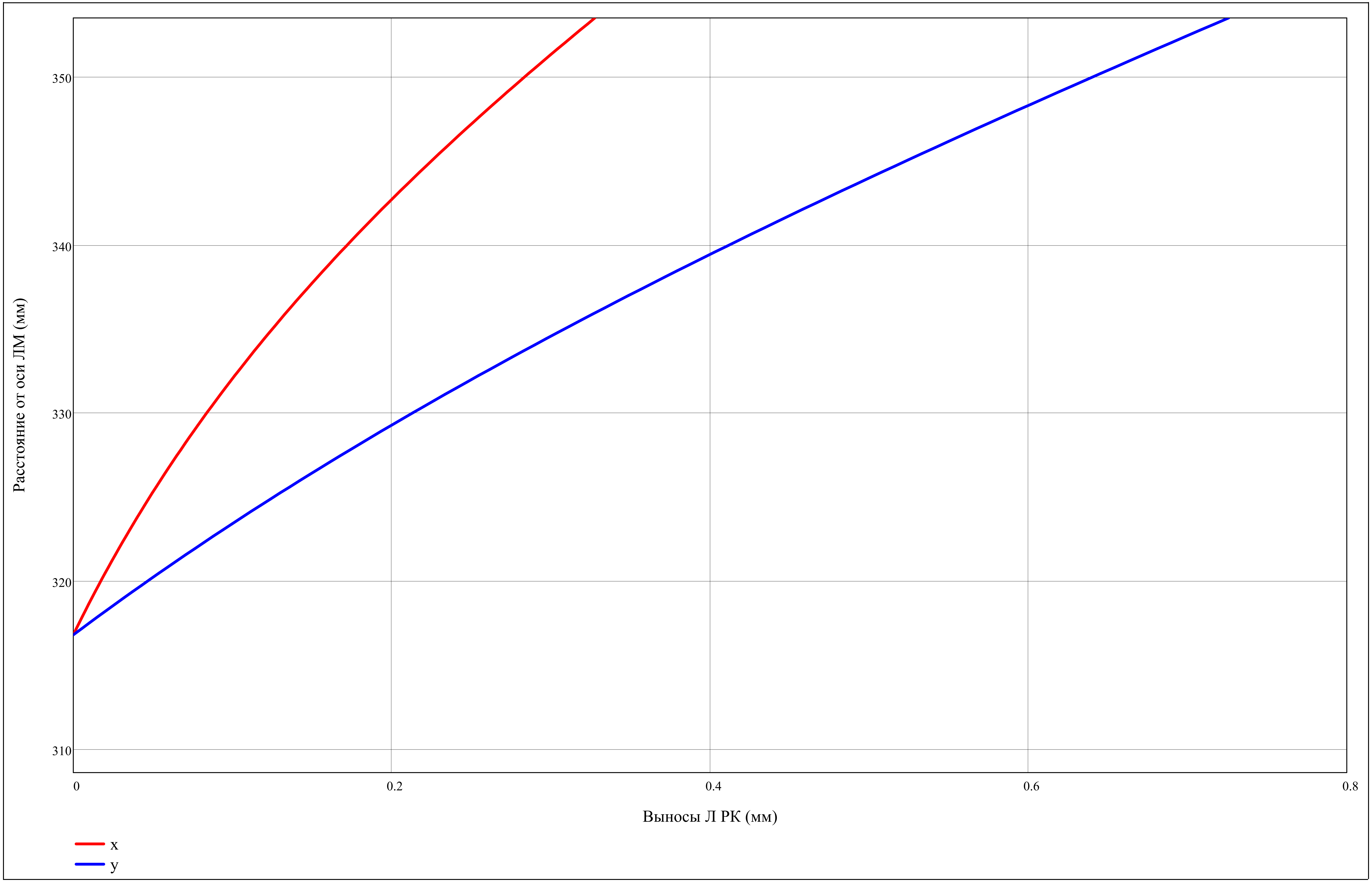

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
2
4
Растягивающее напряжение (МПа)
P1
P2
P3
ρ1
ρ2
ρ3

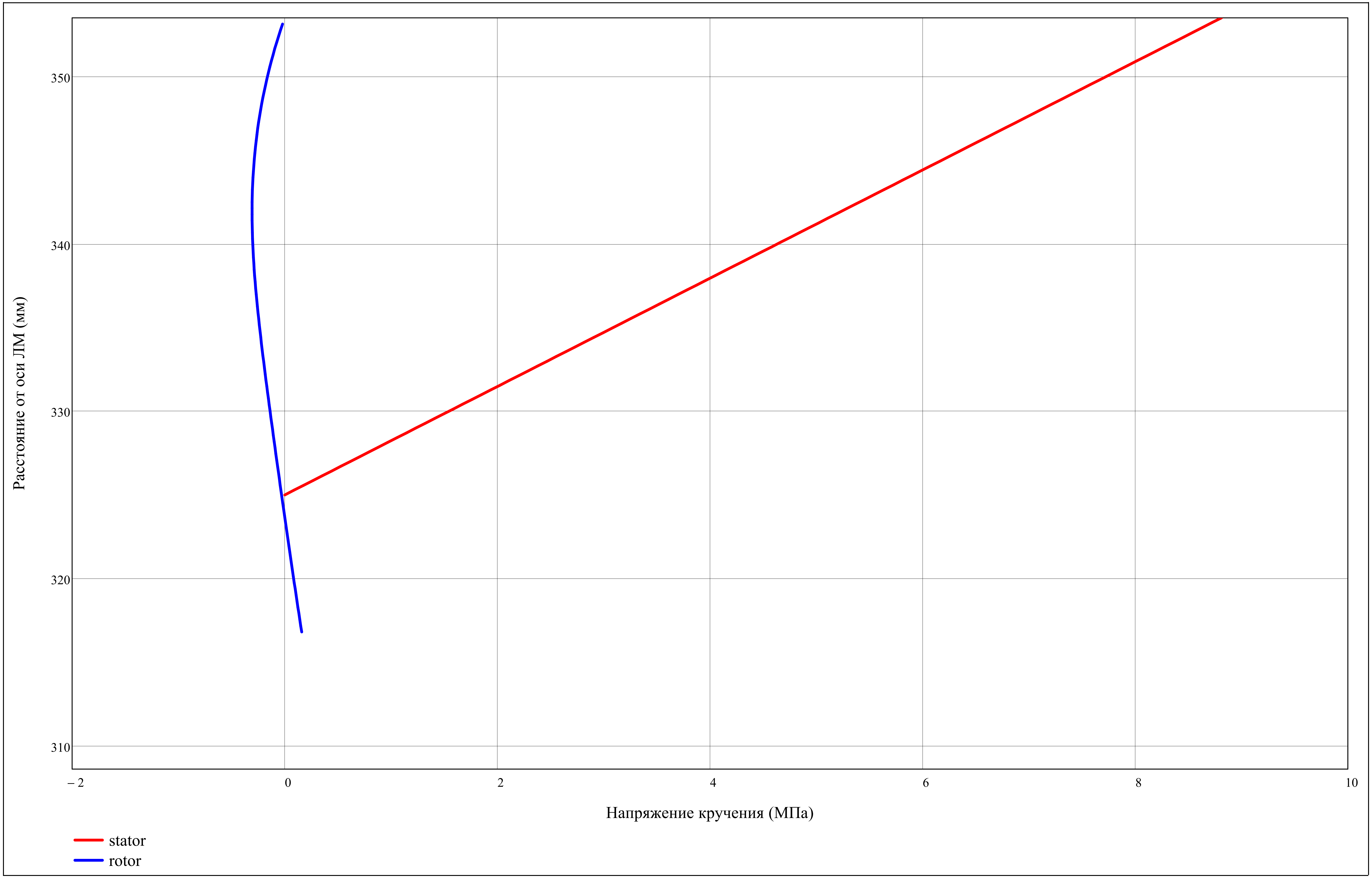

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
200
400
600
800
Растягивающее напряжение (МПа)
c.a1
c.a2
c.a3
c.u1
c.u2
c.u3

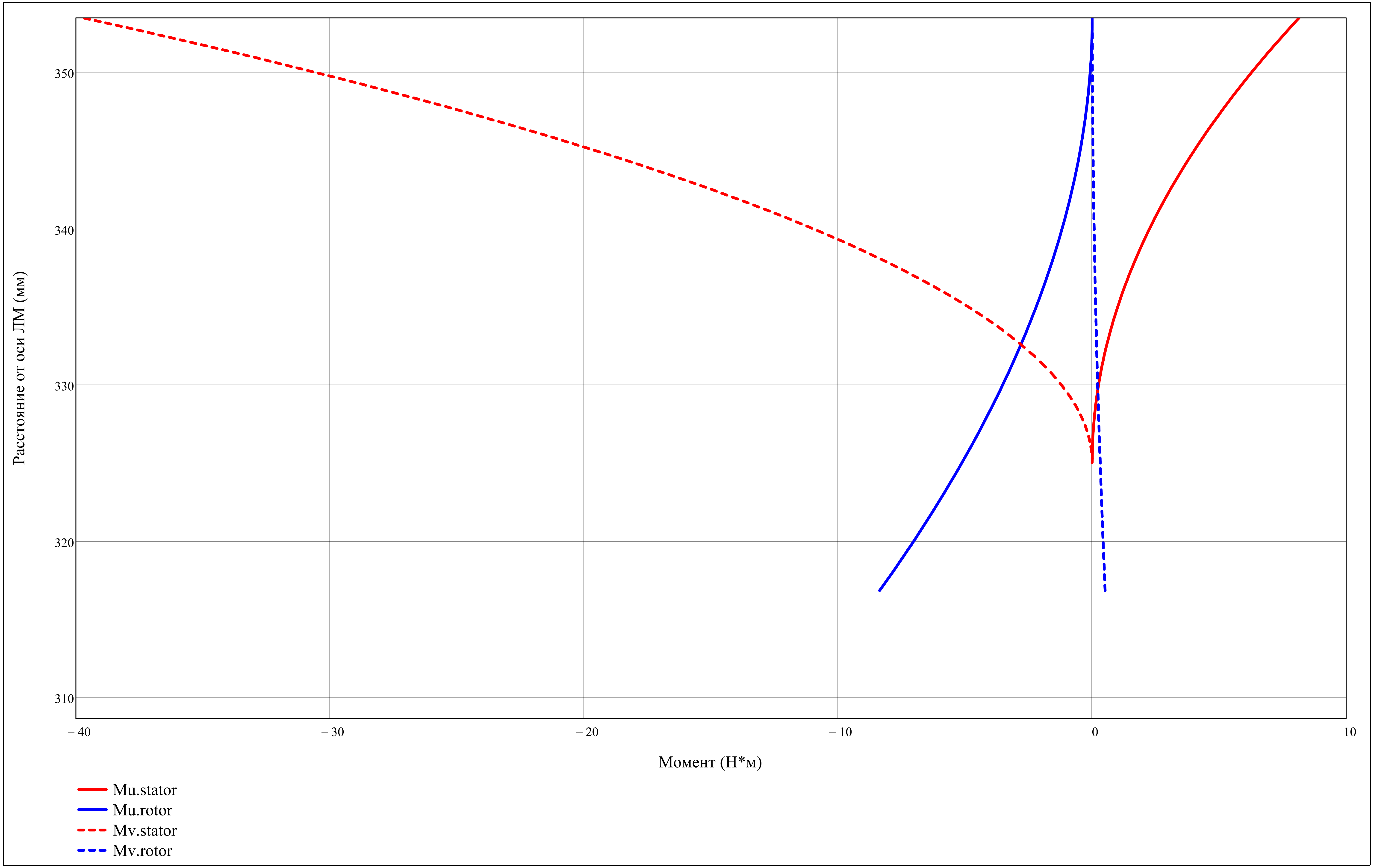


Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
– 50
0
50
100
Распределенная нагрузка (кН/м)
qx.stator
qx.rotor
qy.stator
qy.rotor

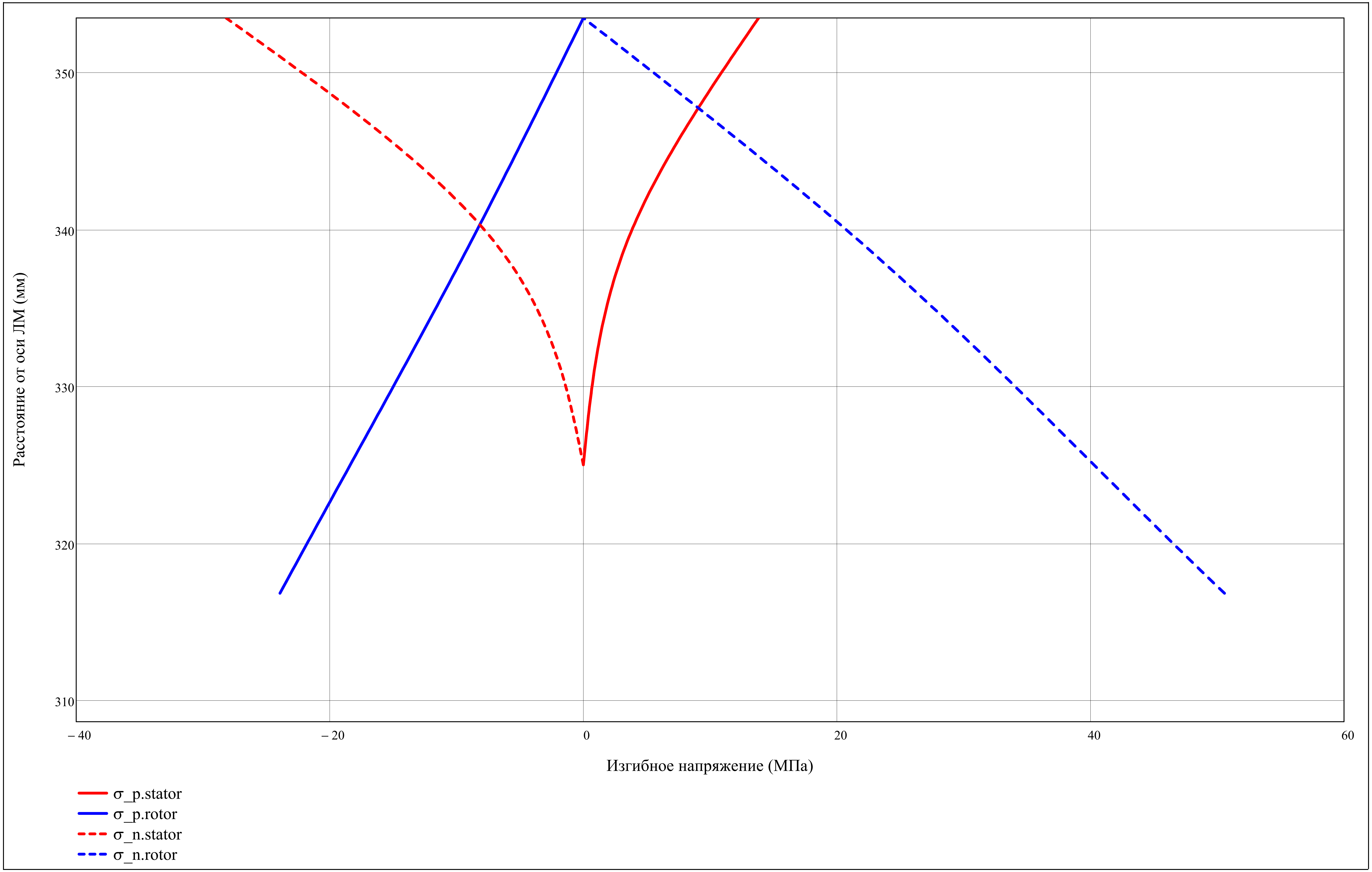

350
340
330
320
310
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 40
– 20
0
20
40
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor

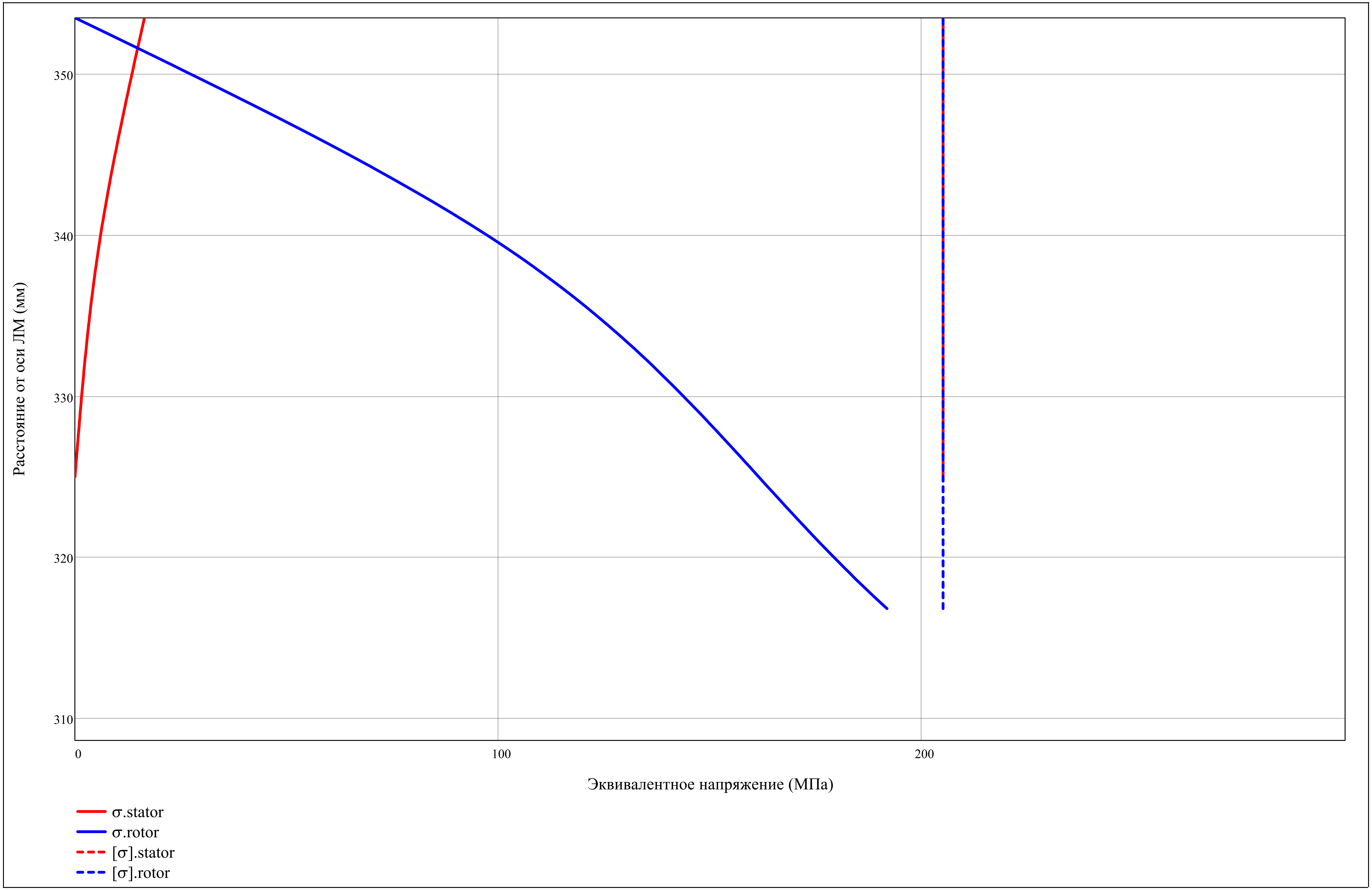

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
0.2
0.4
0.6
0.8
Выносы Л РК (мм)
x
y


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



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


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

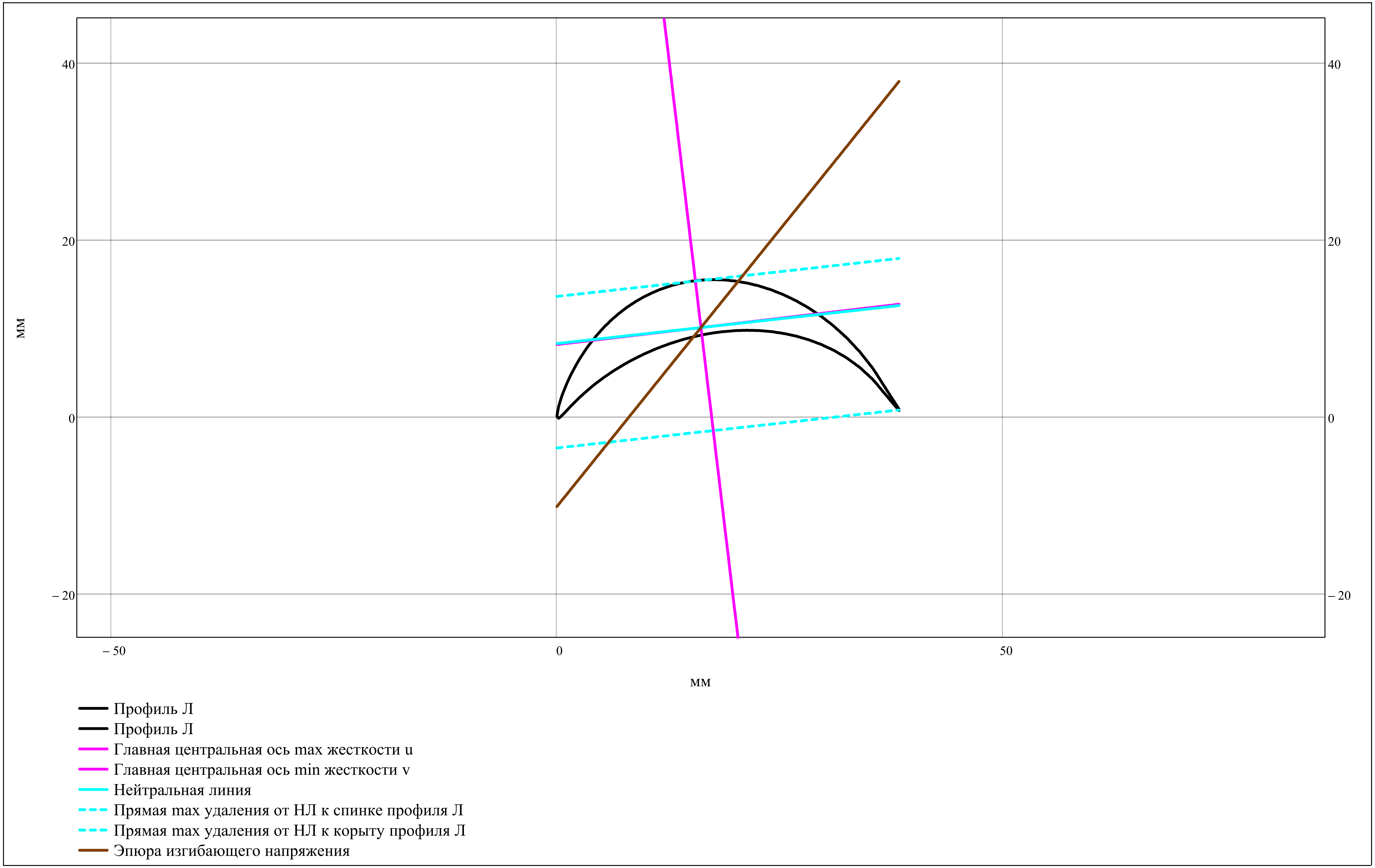

Расстояние от оси ЛМ (мм)
350
340
330
320
310
0
100
200
Эквивалентное напряжение (МПа)
σ.stator
σ.rotor
[σ].stator
[σ].rotor

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

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 5.326 \\ 2 & -11.797 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} x0_{rotor_{j,r}} \\ y0_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} x0_{stator_{j,r}} \\ y0_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 16.161 \\ 2 & 10.014 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

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


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

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	-0.22	5.33
2	21.04	-11.80
3	-7.07	29.15
4	-11.37	-38.70

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

	1	2
1	-18.4	0.0
2	40.3	0.0

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

	1
1	0.0
2	161.5

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

	1
1	)000000000000000000000(
2	

Результаты расчета на прочность Л

Вывод результатов расчета Л на прочность

Выбор материала Д

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

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

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

$\cdot 10^6$

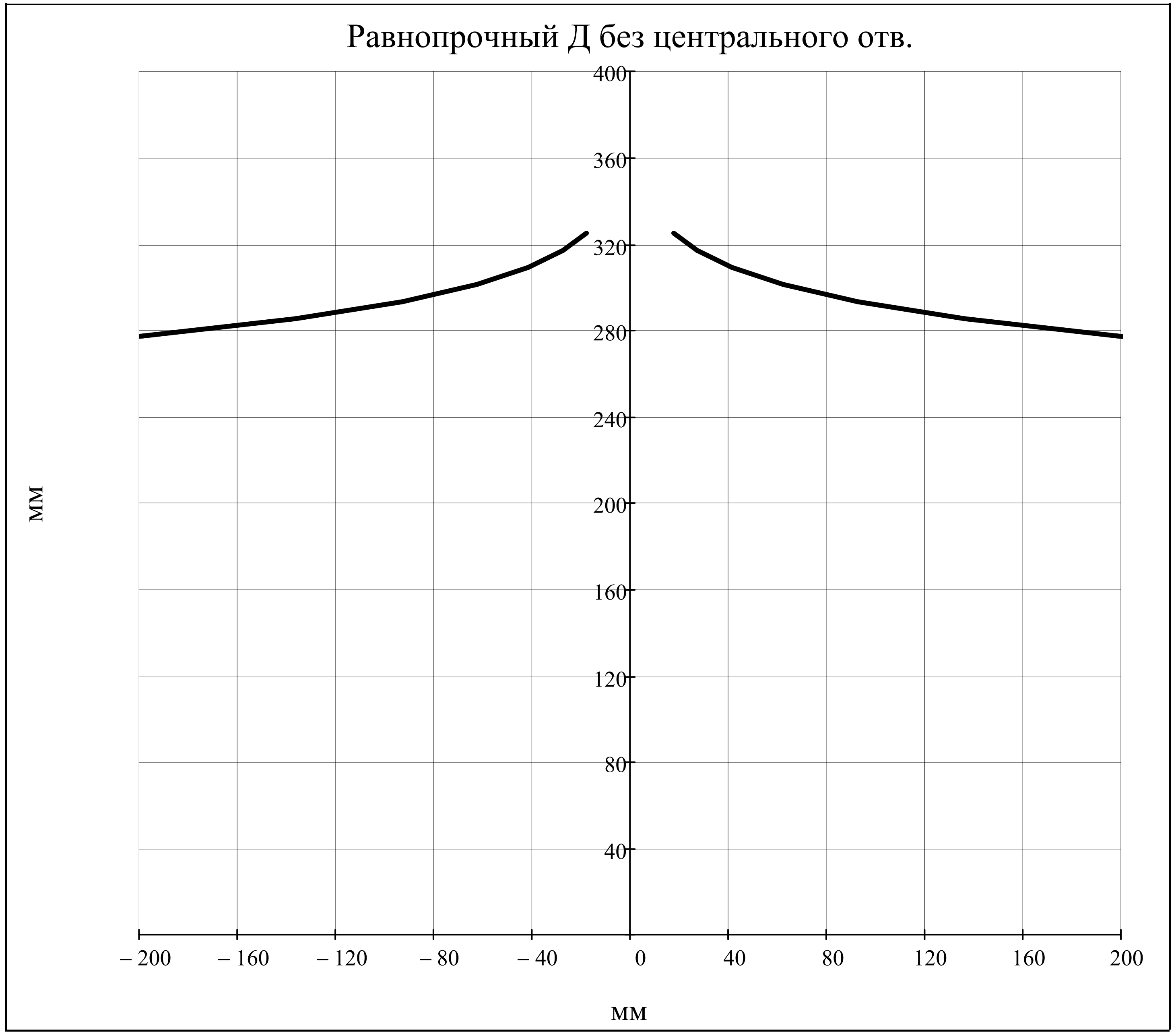
Выбор материала Д

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

Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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



Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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

Приведенная скорость по профилю Л

Общие параметры охлаждения

Конвективное охлаждение

Результаты конвективного охлаждения

Конвективно-пленочное охлаждение

Результат конвективно-пленочного охлаждения

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 926.13 \\ 145.91 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 231.49 \\ 145.88 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 520.18 \\ 450.31 \\ 503.61 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.47 \\ 88.92 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

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

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11.08 \\ 149.07 \\ 16.84 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.53 \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 132.23 \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 891.55 \\ 173.52 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 222.84 \\ 173.52 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 542.17 \\ 398.52 \\ 549.83 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.47 \\ 90.57 \end{pmatrix} \cdot {}^\circ$$

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

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.63 \\ 146.00 \\ 18.40 \end{pmatrix} \cdot {}^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.53 \cdot {}^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 127.6 \cdot {}^\circ$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 859.60 \\ 191.93 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100.00 \\ 214.86 \\ 191.85 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 564.18 \\ 350.62 \\ 592.65 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.00 \\ 14.47 \\ 91.64 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

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

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.21 \\ 142.21 \\ 18.89 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 75.53 \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 123.32 \cdot ^\circ$$

)0000000.C
1.270