Подключение библиотек

Основные уравнения, алгоритмы, зависимости и ф-и

Параметры расчета

Исходные данные

Коэф. запаса: $safety = 1.3$

Горючее: $Fuel = "Керосин"$

$turbine = "ТНД"$

Высота движения (м): $H_\upsilon = 0$

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

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

	1
1	35.43
2	0.04
3	0.81

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Абс. скорость перед Т (м/с):

Абс. скорость после Т (м/с):

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

	1
1	180.0
2	260.0

[1, с.15] $80 \le c_Т \le 400 = 1$

Лопаточный КПД Т: $\eta_Л = 88\%$

$88\% \le \eta_Л \le 95\% = 1$

Угол входа в Т: $\alpha_Г = 90 \cdot °$

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

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

Исходные данные

Основне размеры Т

$z = ORIGIN..N_г$

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

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

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

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

Удельная работа Т (Дж/кг): $L^*_T = \dfrac{N_T}{mean(G_г, G_т)} = 424.1 \cdot 10^3$ $L^*_T \le 550 \cdot 10^3 = 1$

Располагаемый теплоперепад в Т (Дж/кг): $H_T = \dfrac{L^*_T + 0.5 c_т^2}{\eta_л} = 520.3 \cdot 10^3$

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

	1
1	1.0
2	1.3
3	890047.3
4	1356.0

Количество итераций: $iteration = 1$

Показатель адиабаты перед Т: $k_г = 1.298$

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

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

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

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

	1
1	2
2	1.32
3	191463.061
4	994.672

Количество итераций: $\text{iteration} = 2$

Показатель адиабаты после Т: $k_T = 1.320$

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

Статическая температура после Т (К): $T_T = 994.7$

Теплоемкость после Т (Дж/кг/К): $Cp_T = Cp_{газ}(P_T, T_T, \alpha_{ox}, Fuel) = 1190.6$

Ср. показатель адиабаты Т: $k = \mathrm{mean}(k_Г, k_Т) = 1.309$

Ср. теплоемкость Т (Дж/кг/К): $Cp = \frac{k}{k-1} \cdot R_{газ}(\alpha_{ox}, Fuel) = 1222.3$

Степень понижения давления: $\pi_T = \frac{P^*_Г}{P_Т} = 4.84$

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	0.440
2	1.499

Площадь кольцевого сечения перед Т (м²):
Площадь кольцевого сечения после Т (м²):

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

	1
1	86421
2	208684

$\cdot 10^{-6}$

Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

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

Определение количества ступеней Т

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

	1
1	5.000
2	0.022

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

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

Дискретизация ступеней: $i = 1 .. Z$

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

Определение количества ступеней Т

Выбранный материал Л:

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

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	2	3	4
1	"ВЖМ7"	"ВЖМ7"	"ВЖМ7"	"ВЖМ7"

$\rho\_blade^T =$

	1	2	3	4
1	8390	8390	8390	8390

$\sigma\_blade\_long^T =$

	1	2	3	4
1	120	120	120	120

$\cdot 10^6$

Коэф. формы: $k_n = 6.8$

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

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

Частота вращения Т

Max частота вращения ротора на входе (об/мин): $\sqrt{\frac{\sigma\_blade\_long}{\ldots}} =$

	1
1	12533
2	12533
3	12533
4	12533

Max частота вращения ротора на выходе (об/мин): $n_{max} = \sqrt{\frac{\sigma\_blade\_long}{\ldots}} = \begin{pmatrix} 8065 \\ 8065 \\ 8065 \\ 8065 \end{pmatrix}$

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

	1
1	7662
2	7662
3	7662
4	7662

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

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

Ср. диаметр перед Т (м):
Ср. диаметр после Т (м):

$\begin{pmatrix} D_{г.ср} \\ D_{т.ср} \end{pmatrix} = \frac{2}{\omega} \cdot \begin{pmatrix} u_Г \\ u_Т \end{pmatrix} =$

	1
1	936.9
2	936.9

$\cdot 10^{-3}$

Длина Л первой ступени Т (м):
Длина Л последней ступени Т (м):

$\begin{pmatrix} l_Г \\ l_Т \end{pmatrix} = \frac{1}{\pi} \cdot \begin{pmatrix} \frac{F_Г}{D_{г.ср}} \\ \frac{F_Т}{D_{т.ср}} \end{pmatrix} =$

	1
1	29.36
2	70.90

$\cdot 10^{-3}$

$\frac{l_Г}{D_{г.ср}} = \frac{1}{31}$ $\frac{l_Т}{D_{т.ср}} = \frac{1}{13}$

Диаметр периферии после Т (м):
Диаметр корня после Т (м):

$\begin{pmatrix} D_{т.пер} \\ D_{т.кор} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{т.ср} + l_Т \\ D_{т.ср} - l_Т \end{pmatrix} =$

	1
1	1007.8
2	866.0

$\cdot 10^{-3}$

Частота вращения Т

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

$N_{ст}^T =$

	1	2	3	4
1	3.80	3.80	3.80	3.80

$\cdot 10^6$

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

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

Определение проточной части ОТ

Линейное распределение кольцевых площадей по сечениям:

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

$F^T =$

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

$\cdot 10^{-6}$

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

$D^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	620.7	620.7	651.1	698.2	750.4	802.7	843.9	866.0	866.0
2	662.2	669.0	704.0	754.0	808.5	862.8	906.5	932.1	936.9
3	703.7	717.4	756.9	809.9	866.6	922.9	969.0	998.1	1007.8

$\cdot 10^{-}$

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

$R^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

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

$\bar{d}^T =$

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

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

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

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

$h^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

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

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

NaN otherwise

D

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

$u^T =$

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

$F^T =$

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

$\cdot 10^{-6}$

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

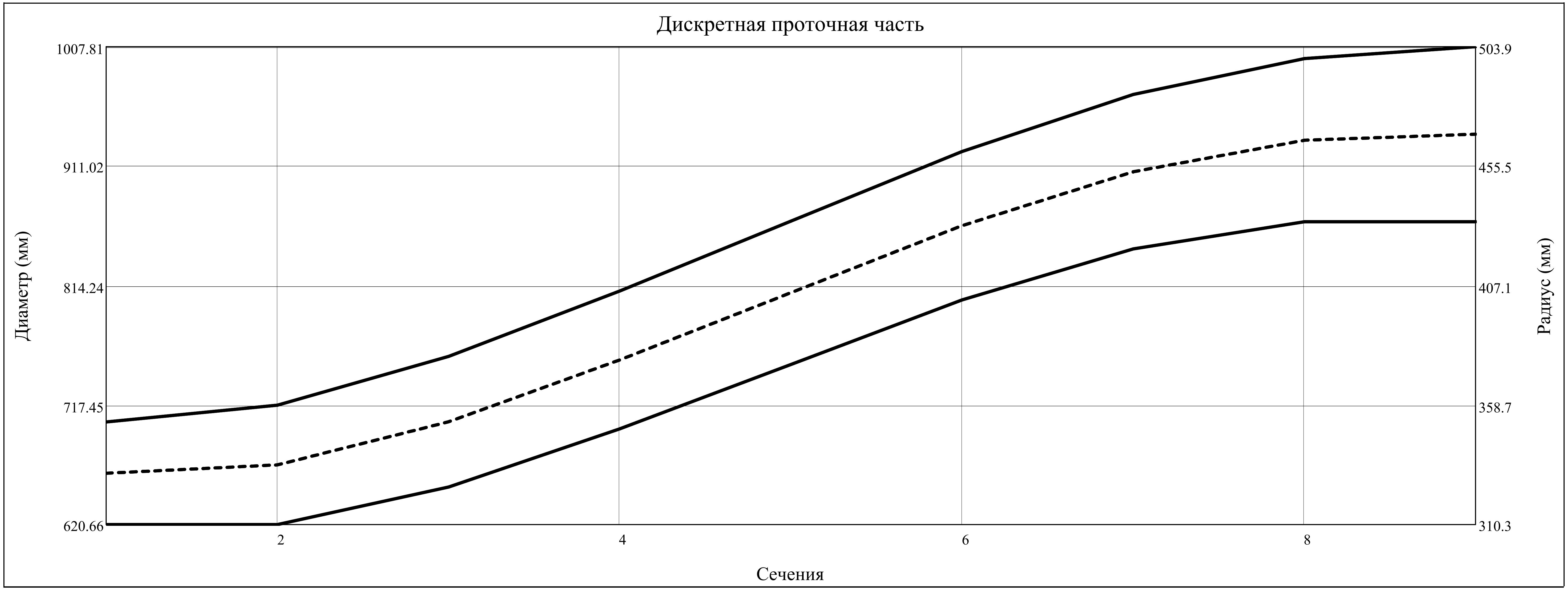
$\overline{d}^T =$

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

$D^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$



$h^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

Осевая ширина Л СА и РК [1, с.183]:

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

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

	1	2	3	4
1	40.1	45.1	51.7	55.8
2	29.3	33.7	37.8	39.0

$\cdot 10^{-3}$

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

$\cdot 10^{-3}$

$\Delta_a{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	10.014	11.282	12.924	13.957

$\cdot 10^{-3}$

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

1
1
1
1

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	9.70	33.92	30.41	40.08	28.58	31.42	14.59	7.08
2	9.70	6.50	2.86	2.32	1.72	2.81	3.42	7.08
3	0.00	27.43	27.56	37.76	26.86	28.61	11.18	0.00

$\cdot°$

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 20\cdot° =$

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

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 25\cdot° =$

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

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -12\cdot° =$

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

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -15\cdot° =$

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

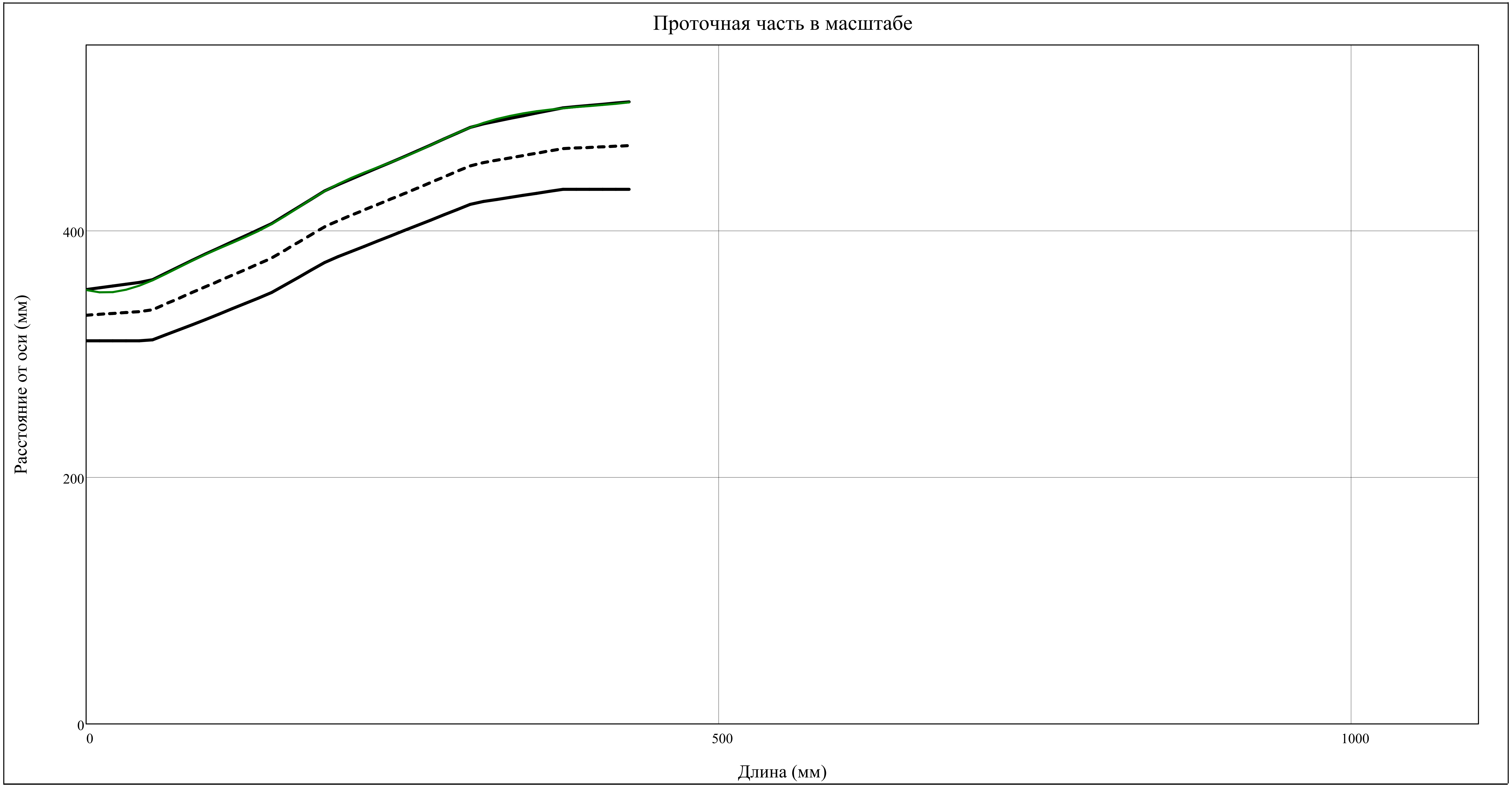
$$\begin{pmatrix} x_{ПЧ} \\ y_{ПЧпер} \\ y_{ПЧср} \\ y_{ПЧкор} \\ y_{Лпер} \end{pmatrix} = \left|\begin{array}{l} c \leftarrow 1 \\ x_{ПЧ_c} \leftarrow 0 \\ y_{ПЧпер_c} \leftarrow D_{st(c,1),N_r} \\ y_{Лпер_c} \leftarrow y_{ПЧпер_c} - \Delta_{r_c} \\ y_{ПЧср_c} \leftarrow D_{st(c,1),av(N_r)} \\ y_{ПЧкор_c}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

$$Length = \sum_{i=1}^{Z} B_{CA_i} + \sum_{i=1}^{Z} \Delta_{a_i} + \sum_{i=1}^{Z} B_{PK_i} = 380.7\cdot10^{-3}$$

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

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

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



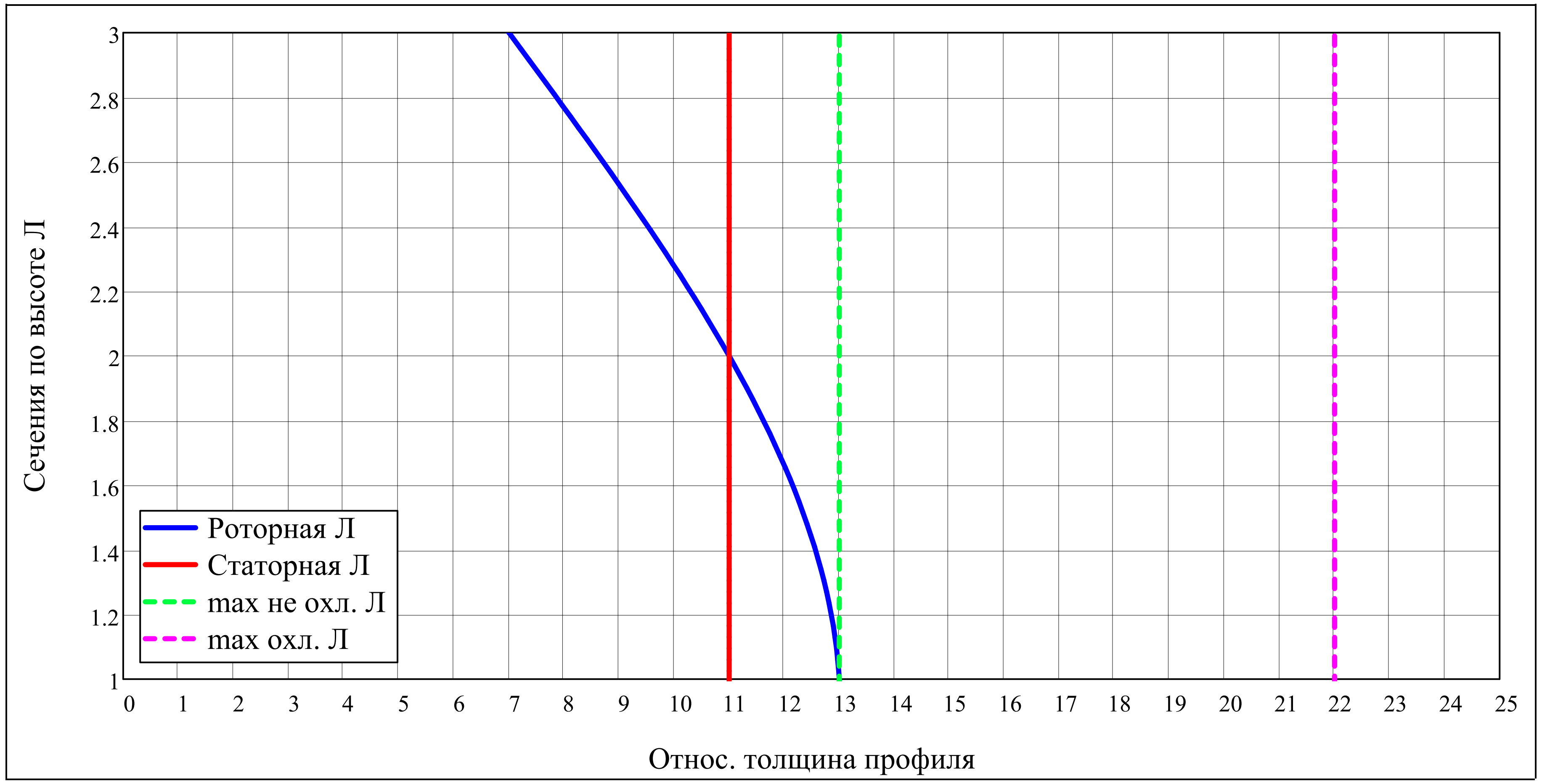
Определение проточной части ОТ

Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

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

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



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

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

	1	2	3	4
1	11.00	11.00	11.00	11.00
2	11.00	11.00	11.00	11.00
3	11.00	11.00	11.00	11.00

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	13.00	13.00	13.00	13.00
2	11.00	11.00	11.00	11.00
3	7.00	7.00	7.00	7.00

$\cdot\%$

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

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

	1	2	3	4
1	4.400	4.400	4.400	4.400
2	4.400	4.400	4.400	4.400
3	4.400	4.400	4.400	4.400

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	3.900	3.900	3.900	3.900
2	3.300	3.300	3.300	3.300
3	2.100	2.100	2.100	2.100

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	2.200	2.200	2.200	2.200
2	2.200	2.200	2.200	2.200
3	2.200	2.200	2.200	2.200

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	1.300	1.300	1.300	1.300
2	1.100	1.100	1.100	1.100
3	0.700	0.700	0.700	0.700

$\cdot\%$

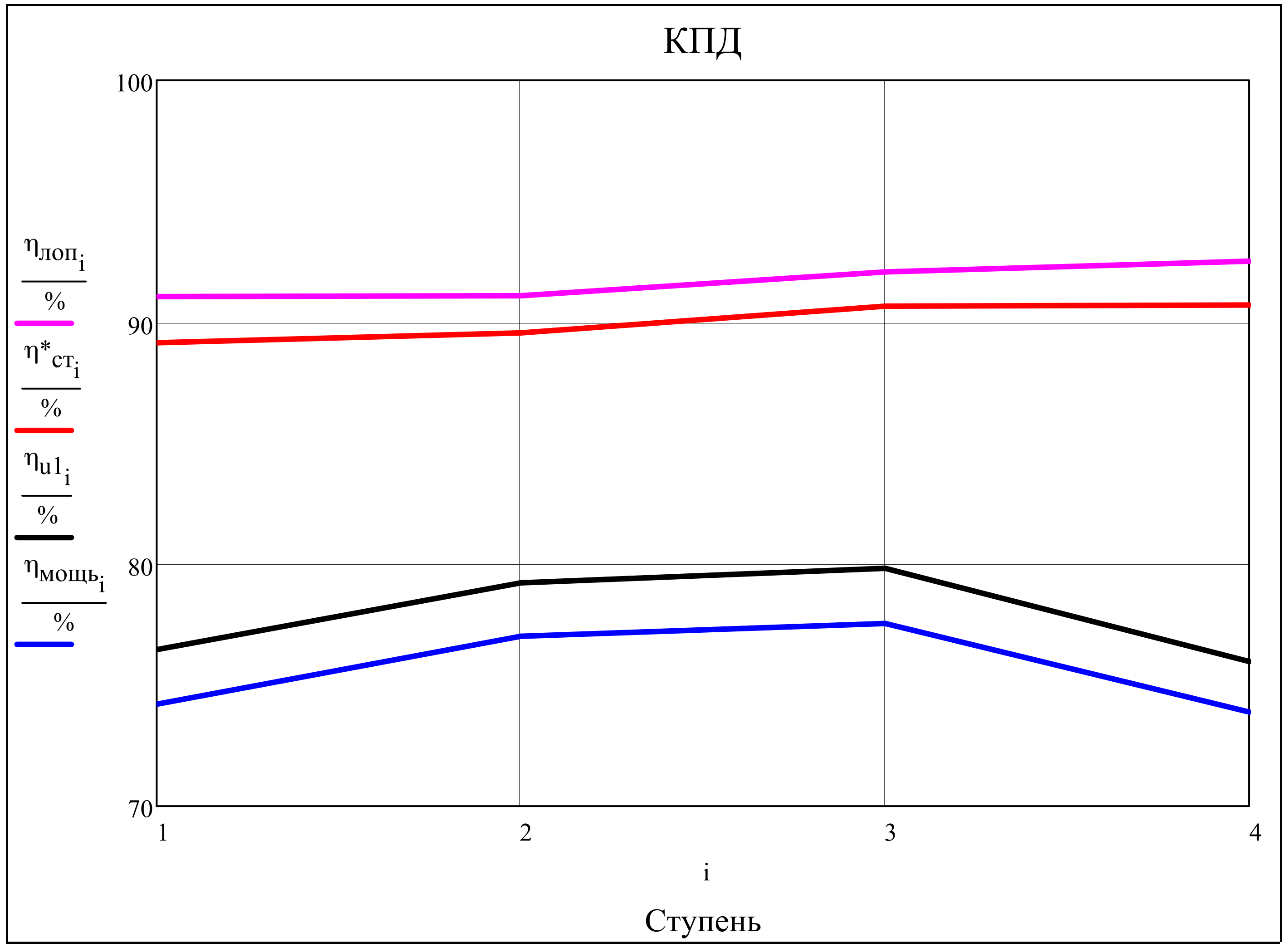
Относ. толщины и радиусы профилей

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

Параметры турбины



$\eta_{лоп}^{T} =$

	1	2	3	4
1	91.06	91.09	92.08	92.53

$\cdot\%$

$\eta^{*}_{ст}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	89.16	89.56	90.67	90.72

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	76.46	79.22	79.83	75.98
2	76.16	79.02	79.67	75.79

$\cdot\%$

$\eta_{мощь}^{T} =$

	1	2	3	4
1	74.21	77.02	77.55	73.89

$\cdot\%$

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

1
1
1
1

Степень понижения полного давления Т:
Степень понижения давления Т:

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

	1
1	4.06
2	4.46

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	476.4
2	567.0

$\cdot 10^3$

Мощность Т (Вт): $\sum_{i=1}^{Z} N_{ст_i} = 15.18 \cdot 10^6$ $\quad eps\left(\text{"rel"}, N_T, \sum_{i=1}^{Z} N_{ст_i}\right) = 0.000 \cdot \%$

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

Лопаточный КПД Т: $$\eta_{Тлоп} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)} + \frac{\left(c_{st(Z,3),av(N_r)}\right)^2}{2}}{H_T} = 80.42 \cdot \%$$

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

Адиабатный КПД Т: $\eta^*_T = \frac{L_T}{H^*_T} = 90.04 \cdot \%$

Политропический КПД Т: $\eta^*_{Т.п} = \eta^*_n\left(\text{"расширение"}, \eta^*_T, \pi^*_T, k_{T.cp}\right) = 88.42 \cdot \%$

Мощностной КПД Т: $$\eta_{Тмощь} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} \frac{N_{ст_i}}{mean\left(G_{st(i,2)}, G_{st(i,3)}\right)}}{H_T} = 75.65 \cdot \%$$

$L_{ст}^{T} =$

	1	2	3	4
1	107.1	107.2	107.2	107.2

$\cdot 10^{3}$

$N_{ст}^{T} =$

	1	2	3	4
1	3.8	3.8	3.8	3.8

$\cdot 10^{6}$

$Lu_{ст}^{T} =$

	1	2	3	4
1	110.4	110.3	110.4	110.3

$\cdot 10^{3}$

$Lu_{нагрузка}^{T} =$

	1	2	3	4
1	3.0	2.3	1.8	1.6

$H_{ст}^{T} =$

	1	2	3	4
1	144.4	139.2	138.3	145.1

$\cdot 10^{3}$

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

	1	2	3	4
1	125.6	118.3	113.4	118.3
2	18.8	21.0	25.0	27.0

$\cdot 10^{3}$

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

	1	2	3	4
1	0.1	0.2	0.2	0.2

$G^{T} =$

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

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

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

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

	1	2	3	4
1	-0.005	-0.112	-0.246	-0.420
2	-0.066	-0.192	-0.353	-0.568

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

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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

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

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

$G_{cooling} = 0.8$

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	927.5	914.5	676.5	665.4	483.0	475.7	337.5	332.0	228.6

$\cdot 10^3$

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	890.0	666.6	633.1	485.0	456.1	342.7	316.7	228.6	208.2

$\cdot 10^3$

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1368.9	1369.9	1281.1	1282.0	1192.4	1193.4	1102.5	...

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1356.0	1273.0	1261.5	1190.4	1176.4	1103.9	1085.9	...

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0	1316.3	1317.8	1225.8	1228.5	1134.2	1136.8	...

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0	1268.9	1257.9	1185.9	1173.4	1100.0	1083.4	...

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

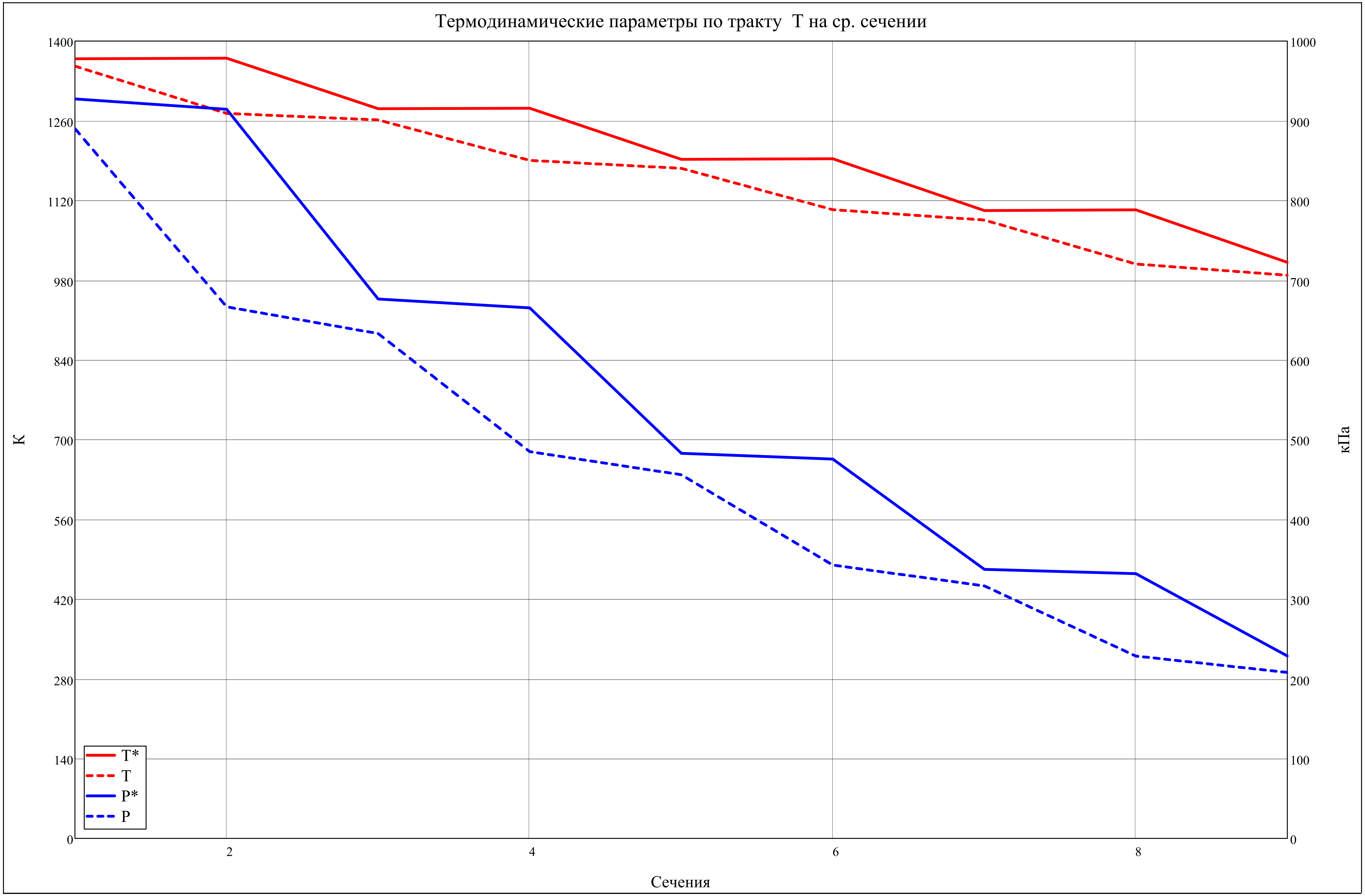
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.440	0.551	0.575	0.708	0.744	0.929	0.989	1.273	1.370

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.349	2.314	1.830	1.799	1.404	1.382	1.061	1.043	0.784

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.275	1.815	1.740	1.412	1.344	1.076	1.011	0.786	0.730


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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	712.6	691.5	688.5	669.8	666.1	646.3	641.3	619.4	613.6

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	667.9	668.6	646.6	647.3	624.3	625.1	600.9	601.8	576.2

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	655.4	655.8	632.9	633.7	609.3	610.2	584.6	584.9

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	490.9	220.6	474.7	197.9	465.9	200.4	476.7	232.6

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	451.9	135.7	435.3	85.6	419.9	39.1	415.9	10.3

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	191.7	173.9	189.4	178.5	202.0	196.6	232.9	232.4

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	328.1	373.9	294.9	357.6	270.8	350.9	281.0	356.5

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	266.2	331.0	226.0	309.9	180.5	290.6	157.3	270.3

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	191.7	173.9	189.4	178.5	202.0	196.6	232.9	232.4

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

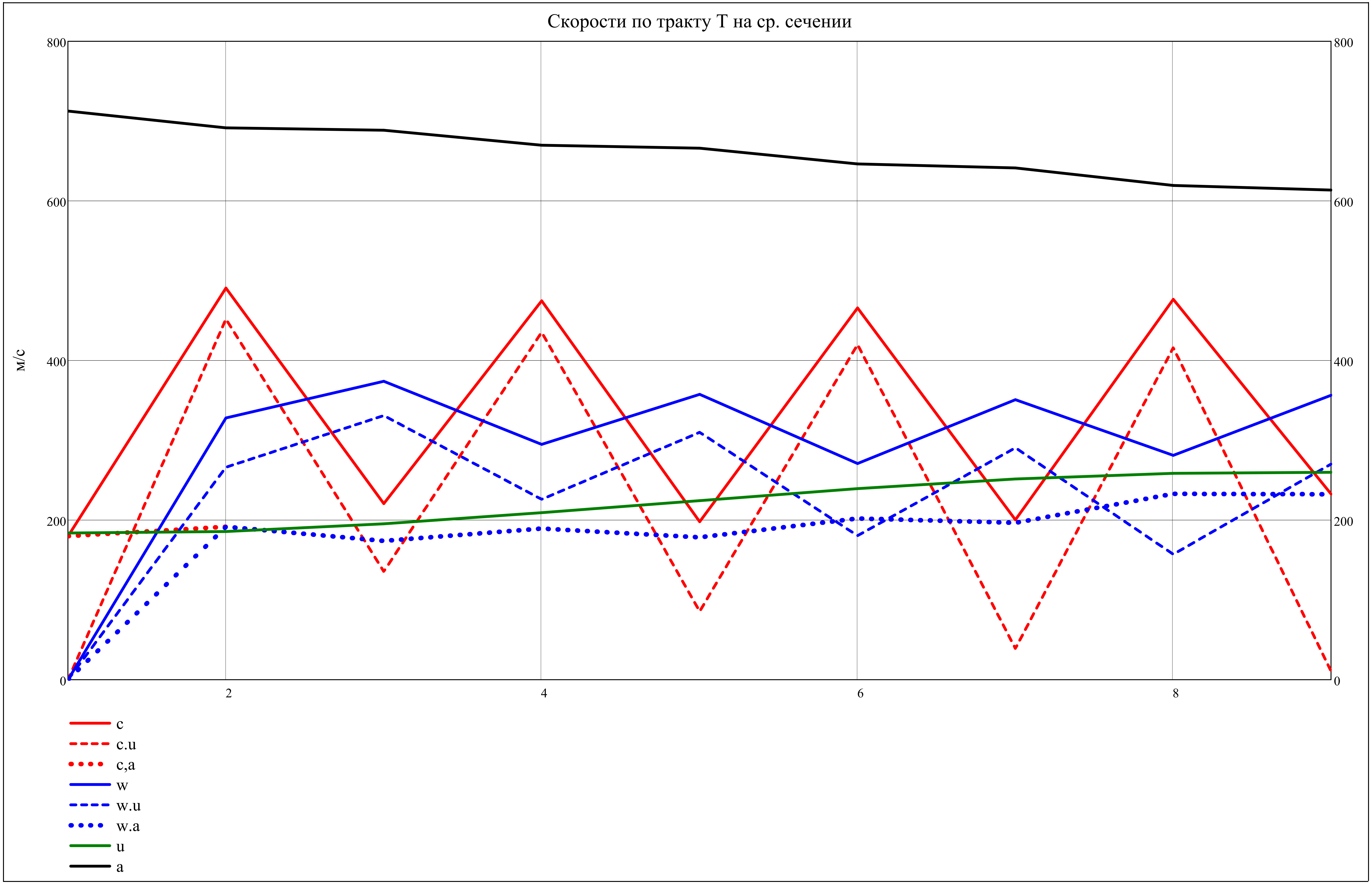
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	537.4	501.2	527.6	486.5	525.9	476.2	538.7	486.4

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	0.0	386.0	0.0	368.0	0.0	359.5	0.0	365.5

$u^{T} =$

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


Скорости по тракту Т на ср. сечении
м/с
800
600
400
200
0
2
4
6
8
c
c.u
c,a
w
w.u
w.a
u
a

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.00	22.99	52.05	23.52	64.39	25.69	78.75	29.25	87.45

$\cdot\circ$

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.00	35.76	27.72	39.97	29.94	48.22	34.07	55.97	40.68				

$\cdot\circ$

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

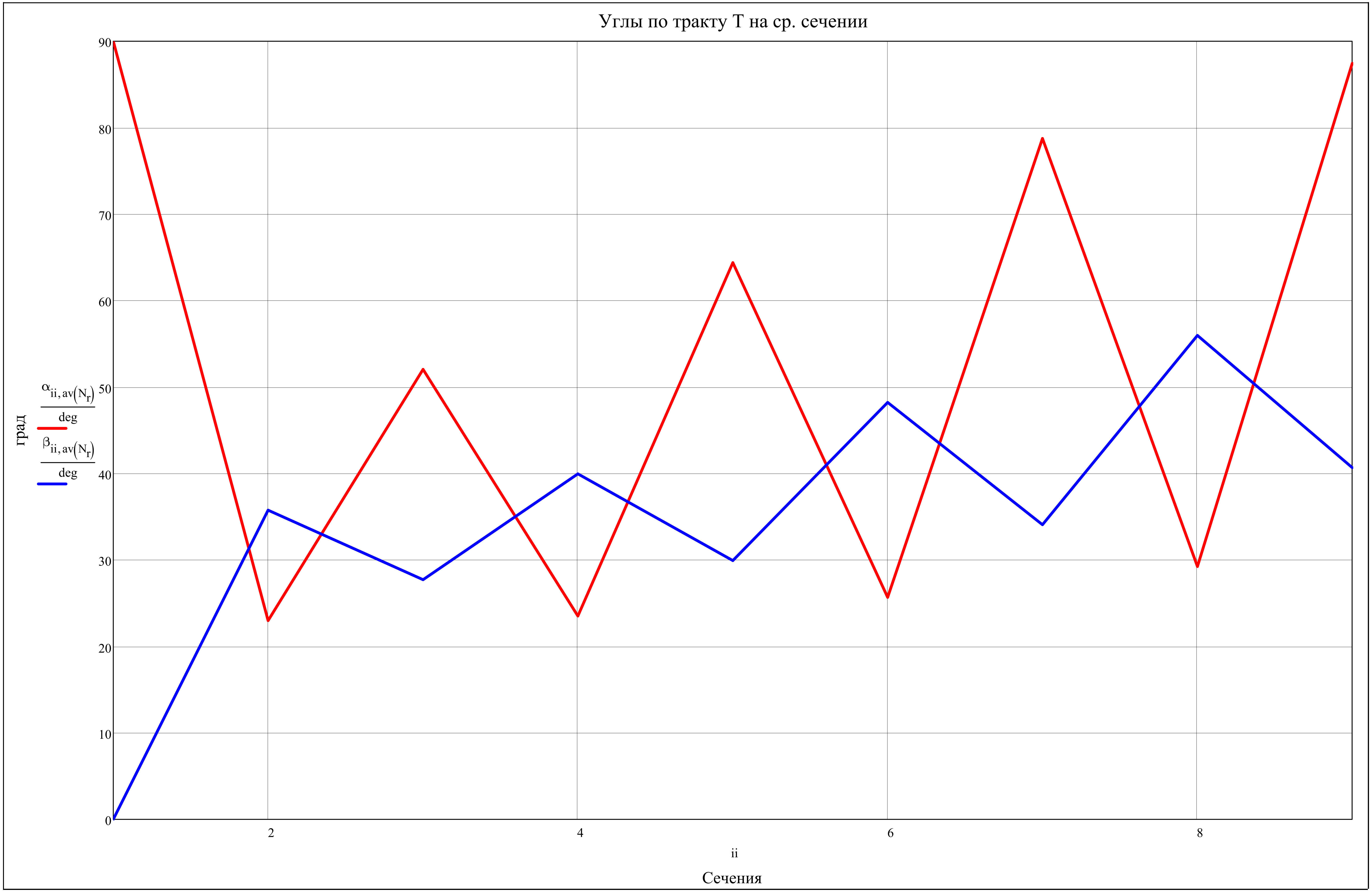
	1	2	3	4	5	6
1	-67.01	-28.53	-38.7	-49.51		

$\cdot\circ$

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

	1	2	3	4	5	6
1	-8.04	-10.03	-14.14	-15.29		

$\cdot\circ$



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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.2695	0.7342	0.3411	0.7334	0.3170	0.7454	0.3335	...

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.5006	0.5702	0.4660	0.5643	0.4445	0.5750	...

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.2526	0.7099	0.3204	0.7088	0.2972	0.7209	0.3125	...

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.4744	0.5431	0.4403	0.5369	0.4190	0.5471	...

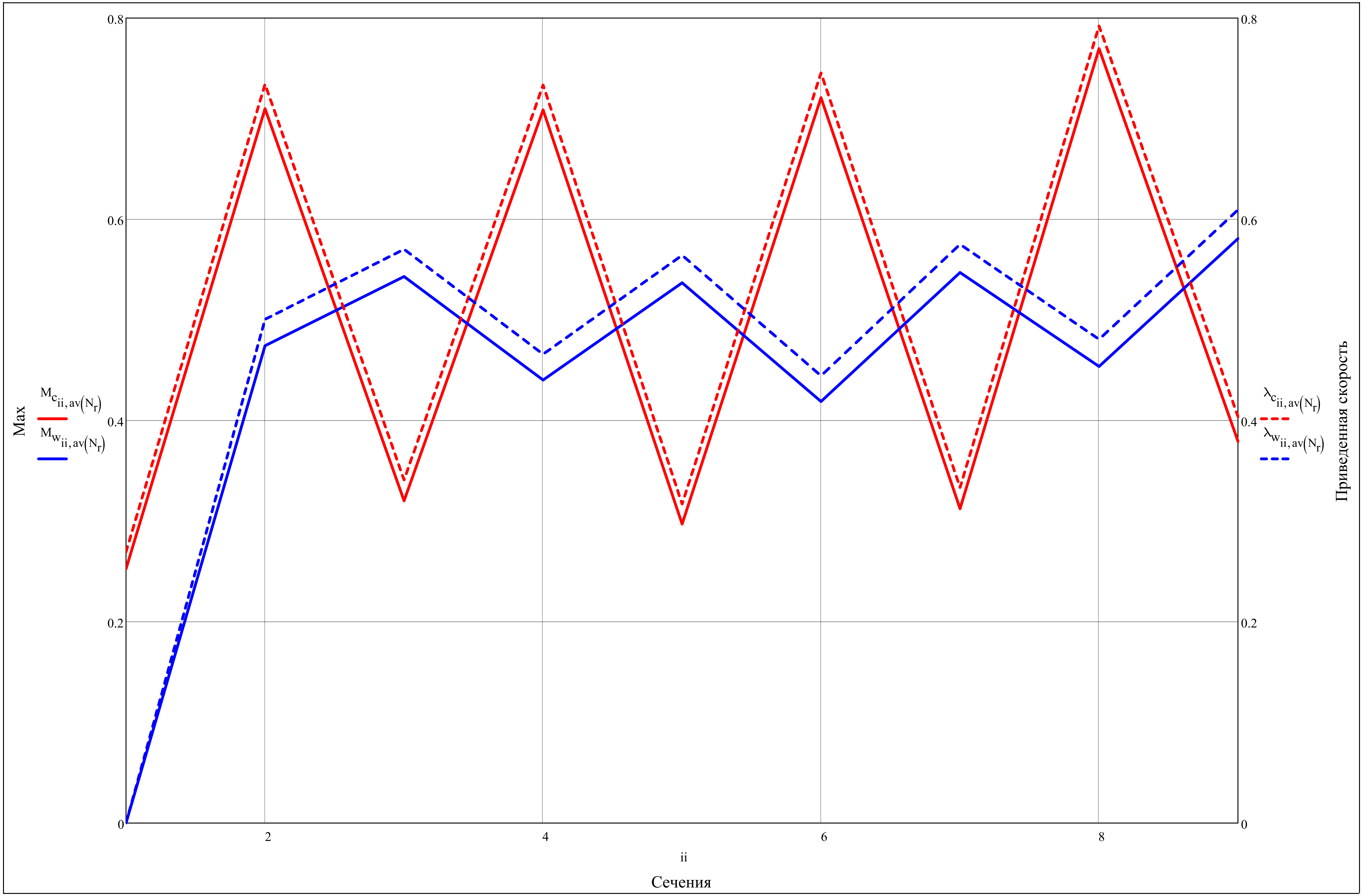
$\mathrm{submatrix}\left(M_w, 1, 2Z+1, \mathrm{av}(N_r), \mathrm{av}(N_r)\right)^T \le 1 =$

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

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

	1	2	3	4
1	43.08	63.04	58.94	53.66
2	68.71	68.31	67.38	67.10

$\cdot ^\circ$



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

$t_{stator}^T =$

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

$t_{rotor}^T =$

	1	2	3	4
1	18.7	22.1	26.7	28.6
2	20.2	23.8	28.7	30.9
3	21.6	25.6	30.6	33.2

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	58.6	50.6	60.3	69.3

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	31.5	36.3	40.9	42.4

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	48	76	68	62
2	107	103	97	95

$\mathrm{stack}\left(\bar{t}_{оптСА}^T, \bar{t}_{оптРК}^T\right) =$

	1	2	3	4
1	0.762	0.603	0.644	0.686
2	0.651	0.669	0.704	0.731

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

0.743
0.595
0.640
0.672

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

1
0
0
0

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

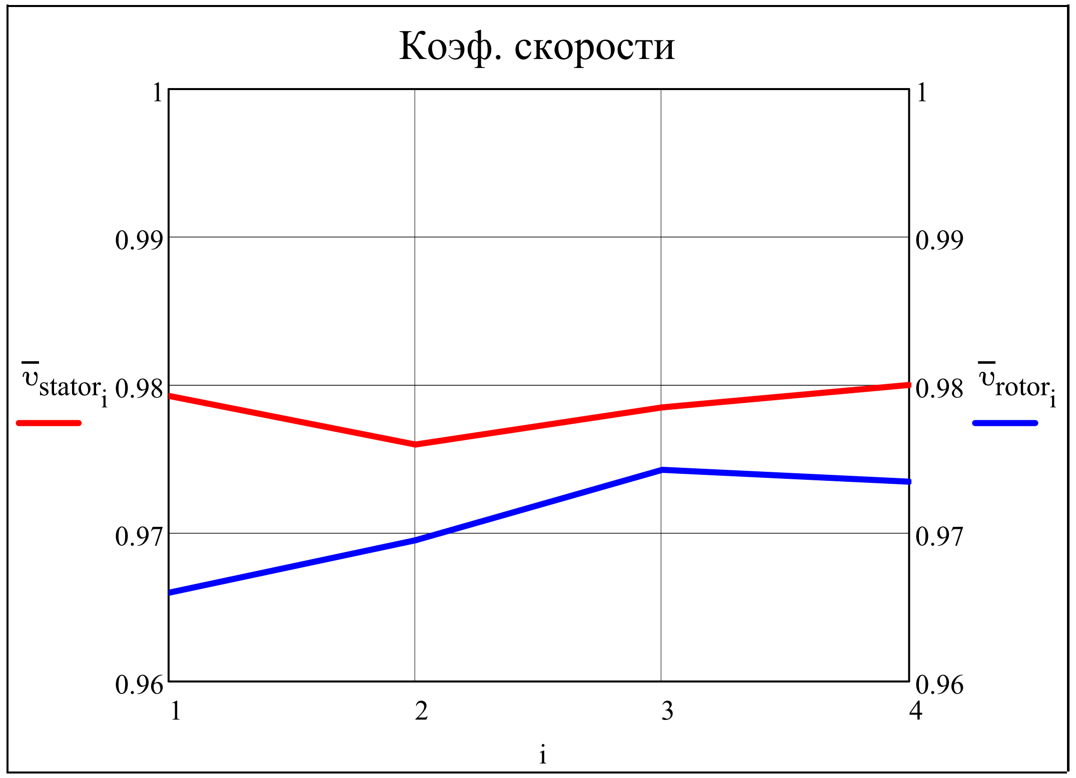
0.640
0.657
0.700
0.729

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

0
0
1
1

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

	1	2	3	4
1	0.9793	0.9760	0.9785	0.9800
2	0.9660	0.9695	0.9743	0.9735



$stack(\xi_{трСА}^T, \xi_{трРК}^T) =$ ·%

	1	2	3	4
1	1.396	1.811	1.520	1.394
2	3.905	3.265	2.464	2.488

$stack(\xi_{крСА}^T, \xi_{крРК}^T) =$ ·%

	1	2	3	4
1	1.517	1.852	1.587	1.340
2	0.739	0.671	0.561	

$stack(\xi_{прСА}^T, \xi_{прРК}^T) =$ ·%

	1	2	3	4
1	3.117	3.961	3.405	2.995
2	5.301	4.665	3.809	3.818

$stack(\xi_{ReСА}^T, \xi_{ReРК}^T) =$ ·%

	1	2	3	4
1	-0.014	0.079	0.097	0.127
2	0.287	0.348	0.424	0.572

$stack(\xi_{\lambda СА}^T, \xi_{\lambda РК}^T) =$ ·%

	1	2	3	4
1	0.218	0.219	0.201	0.134
2	0.370	0.381	0.360	0.295

$stack(\xi_{втСА}^T, \xi_{втРК}^T) =$ ·%

	1	2	3	4
1	0.982	0.780	0.847	0.961
2	1.384	1.337	1.265	1.414

$stack(\xi_{тдСА}^T, \xi_{тдРК}^T) =$ ·%

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

$stack(\xi_{смСА}^T, \xi_{смРК}^T) =$ ·%

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

$stack(\xi_{СА}^T, \xi_{РК}^T) =$ ·%

	1	2	3	4
1	3.566	4.029	3.486	3.224
2	3.469	2.933	2.379	2.417

$\xi_{вых}^T =$ ·%

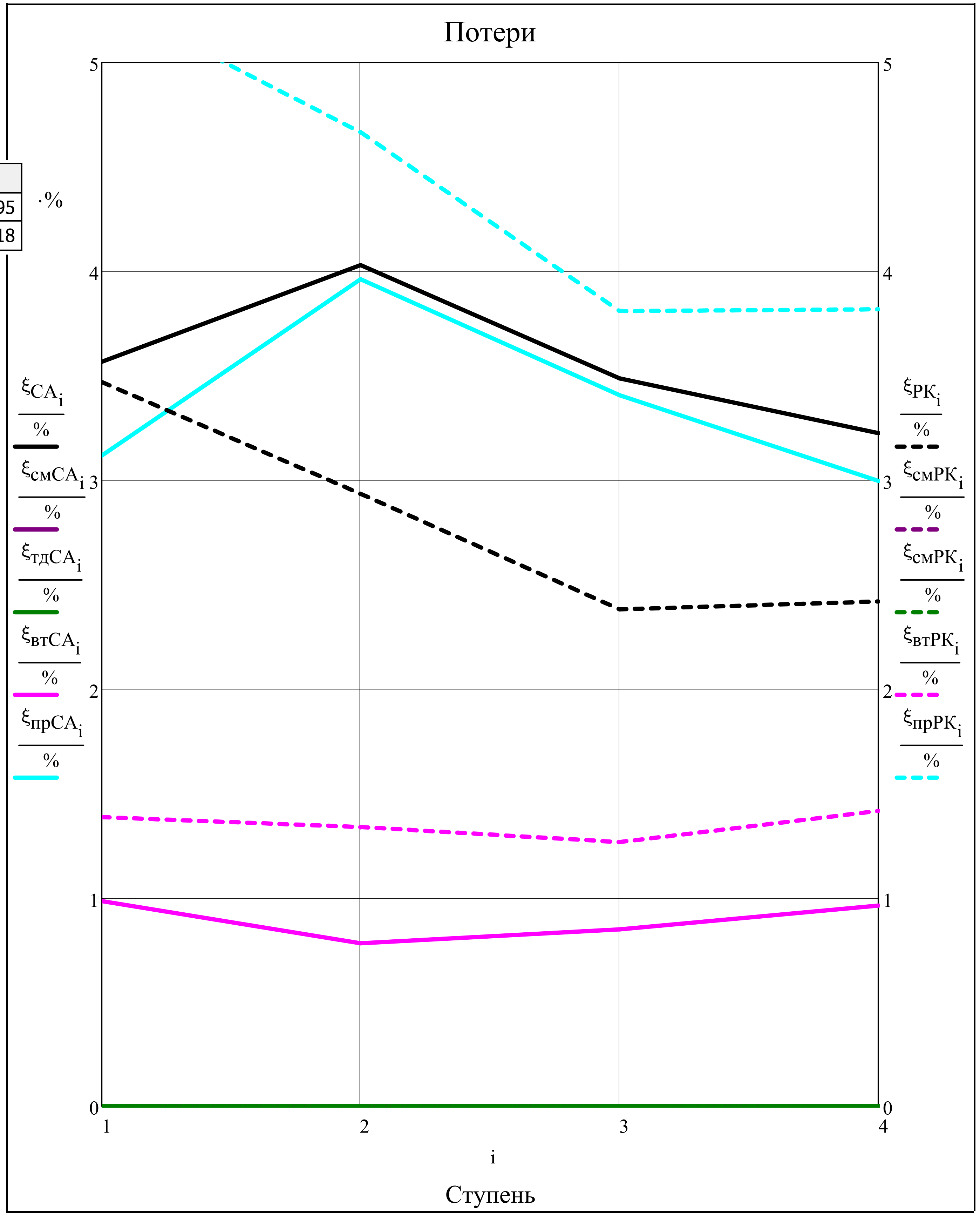
	1	2	3	4
1	16.848	14.071	14.525	18.643

$\xi_{\Delta r}^T =$ ·%

	1	2	3	4
1	1.810	1.782	1.822	1.658

$\xi_{тр.в}^T =$ ·%

	1	2	3	4
1	0.138	0.221	0.298	0.244



Параметры турбины

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

Выбор закона профилирования Л по высоте

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

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

$m^T =$

	1	2	3	4	5	6
1	-0.5000	-0.2500	0.0000	0.2500	1.0000	1.0000

Выбор закона профилирования Л по высоте

Расчет Л по высоте

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

for $i \in 1..Z$

for $a \in 2..3$

for $r \in 1..N_r$

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

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

$$c_{u_{st(i,a),r}} = \begin{cases} \text{if } m_i = \overline{\upsilon}_{stator_i}\cdot\cos\left(\alpha_{st(i,2),av(N_r)}\right)^2 \\ \quad c_{u_{st(i,a),av(N_r)}}\cdot\left(\dfrac{R_{st(i,a),av(N_r)}}{R_{st(i,a),r}}\right)^{m_i} & \text{if } (a = 2) \\ \quad \dfrac{u_{st(i,a-1),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a-1),av(N_r)}} + u_{st(i,a),av(N_r)}\cdot c_{u_{st(i,a),av(N_r)}} - u_{st(i,a-1),r}\cdot c_{u_{st(i,a-1),r}}}{u_{st(i,a),r}} & \text{if } (a = 1) \vee (a = 3) \\ \text{otherwise} \\ \quad \dfrac{A_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)} & \text{if } (a = 2) \\ \quad -\dfrac{A_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)^{m_i}} + \dfrac{B_{st(i,a),r}}{\left(R_{st(i,a),r}\right)} & \text{if } (a = 1) \vee (a = 3) \end{cases}$$

$$c_{a_{st(i,a),r}} = \begin{cases} \text{if } m_i = -1 \\ \quad \sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a),r}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] - 4\cdot A_{st(i,a),r}\cdot B_{st(i,a),r}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)} & \text{if } (a = 2) \\ \quad \sqrt{\left(c_{a_{st(i,a),av(N_r)}}\right)^2 - 2\cdot\left(A_{st(i,a),r}\right)^2\cdot\left[\left(R_{st(i,a),r}\right)^2 - \left(R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^2\right] + 4\cdot A_{st(i,a),r}\cdot B_{st(i,a),r}\cdot\ln\left(\dfrac{R_{st(i,a),r}}{R_{st(i,a),av(N_r)}}\right)} & \text{if } (a = 1) \vee (a = 3) \end{cases}$$

if $m_i = 0$

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

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

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

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

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

otherwise

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

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

$$m_i\cdot(m_i+1)\cdot\left(R_{st(i,a),r}\cdot R_{st(i,a),av(N_r)}\right)^{2\cdot m_i+1}$$

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

for $r \in 1..N_r$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$(c_{i,r})^2-(w_{i,r})^2$$

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

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

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

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

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

$P*^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	927.5	914.5	676.5	665.4	483.0	475.7	337.5	332.0	228.6
2	927.5	914.5	676.5	665.4	483.0	475.7	337.5	332.0	228.6
3	927.5	914.5	676.5	665.4	483.0	475.7	337.5	332.0	228.6

$\cdot 10^3$

$P^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	890.0	631.4	635.8	459.5	458.6	325.0	317.3	215.2	208.2
2	890.0	660.5	638.1	481.1	459.0	339.4	317.3	225.8	208.2
3	890.0	686.7	639.3	500.3	459.2	352.3	317.3	235.2	208.2

$\cdot 10^3$

$T*^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1369	1370	1281	1282	1192	1193	1102	1104	1011
2	1369	1370	1281	1282	1192	1193	1102	1104	1011
3	1369	1370	1281	1282	1192	1193	1102	1104	1011

$T^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1355	1253	1262	1172	1177	1087	1086	991	988
2	1355	1267	1263	1185	1178	1098	1086	1003	988
3	1355	1278	1264	1196	1178	1108	1086	1013	988

$T*_w{}^T =$

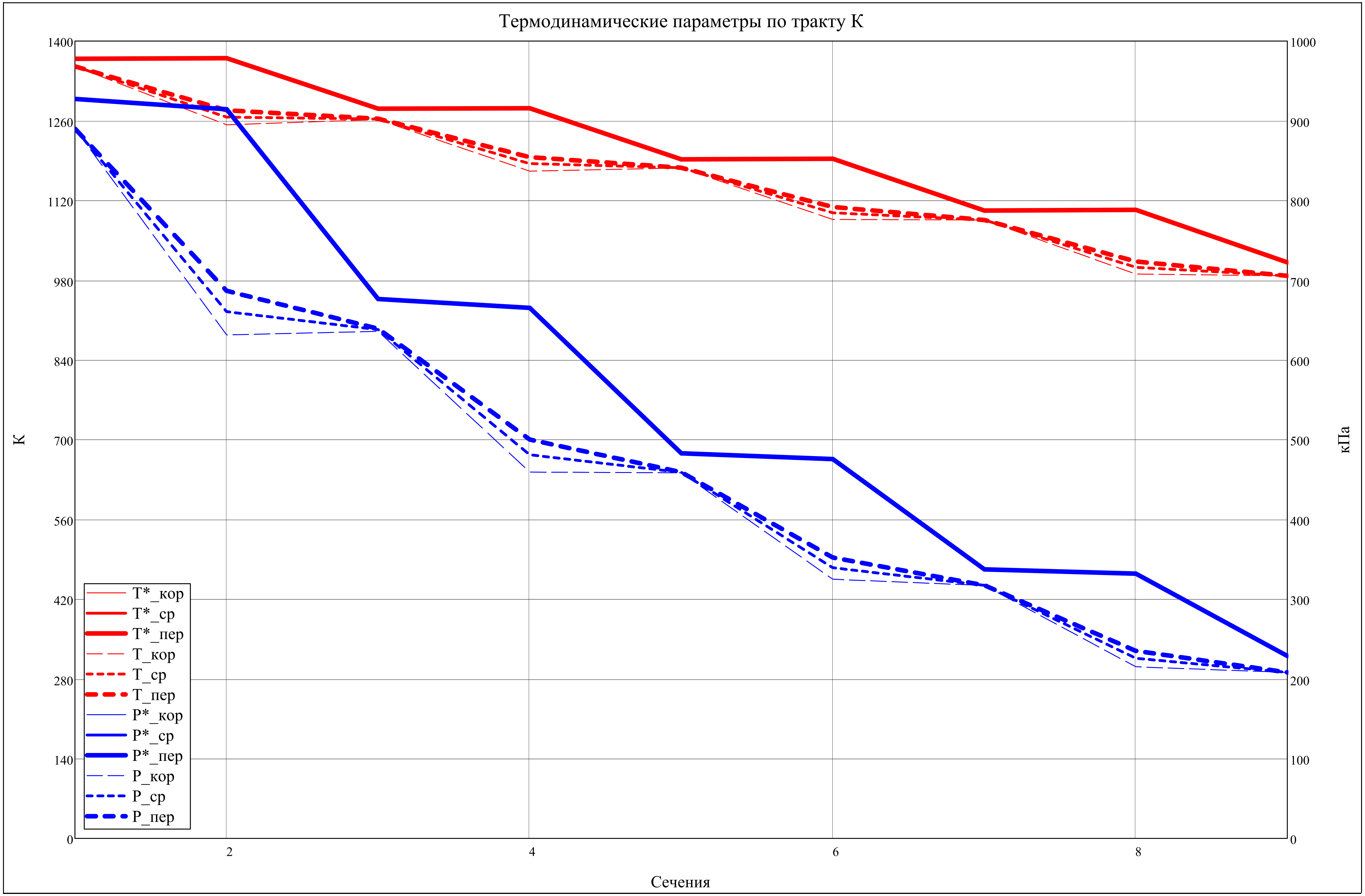
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1381.3	1313.8	1273.3	1222.9	1197.1	1130.2	1120.2	1036.6
2	1383.0	1313.1	1278.7	1222.6	1203.3	1130.7	1126.9	1038.0
3	1384.8	1312.5	1284.4	1222.5	1209.8	1131.5	1133.9	...

$\rho*^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.349	2.314	1.830	1.799	1.404	1.382	1.061	1.043	0.784
2	2.349	2.314	1.830	1.799	1.404	1.382	1.061	1.043	0.784
3	2.349	2.314	1.830	1.799	1.404	1.382	1.061	1.043	0.784

$\rho^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.276	1.747	1.747	1.360	1.350	1.037	1.013	0.753	0.731
2	2.276	1.808	1.751	1.408	1.351	1.071	1.013	0.781	0.731
3	2.276	1.862	1.754	1.450	1.352	1.102	1.013	0.805	0.731



Термодинамические параметры по тракту К
1400
1260
1120
980
840
700
560
420
280
140
0
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
К
кПа
2
4
6
8
Сечения
T*_кор
T*_ср
T*_пер
T_кор
T_ср
T_пер
P*_кор
P*_ср
P*_пер
P_кор
P_ср
P_пер

$k^T =$

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

$R_L{}^T =$

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

$R_L{}^T \geq 0.05 =$

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

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

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

$u^T =$

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

$c^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	529.2	213.2	511.7	188.5	500.3	197.2	511.5	232.4
2	180.0	497.3	207.2	480.3	186.8	472.2	197.0	483.7	232.4
3	180.0	467.8	203.7	451.5	186.0	446.4	197.0	458.7	232.4

$c_u{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	476.1	142.0	459.1	77.6	444.1	29.4	444.1	13.3
2	0.0	458.8	112.6	441.4	55.1	426.8	13.1	424.0	0.2
3	0.0	444.5	86.6	426.4	35.3	411.8	-1.1	406.3	-10.9

$c_a{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	231.2	159.0	226.1	171.8	230.5	195.0	253.8	232.0
2	180.0	191.7	173.9	189.4	178.5	202.0	196.6	232.9	232.4
3	180.0	145.6	184.4	148.3	182.6	172.4	197.0	212.9	232.1

$\Delta c_a{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	51.2	-72.2	67.1	-54.3	58.7	-35.5	58.8	-21.8
2	11.7	-17.8	15.5	-11.0	23.5	-5.4	36.3	-0.5
3	-34.4	38.7	-36.1	34.4	-10.3	24.6	15.9	19.2

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	673.1	656.4	646.6	633.7	627.5	609.7	607.5	584.4	584.3
2	673.5	656.3	648.0	633.7	629.1	609.8	609.4	584.8	586.3
3	674.0	656.1	649.5	633.6	630.8	610.0	611.2	585.3	588.3

$a_{зв}{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	717.7	690.0	693.6	668.3	671.1	644.7	645.8	616.9	617.4
2	717.7	693.8	693.9	672.0	671.1	648.2	645.8	620.6	617.4
3	717.7	697.0	694.0	675.2	671.2	651.1	645.8	623.7	617.5

$w^T =$

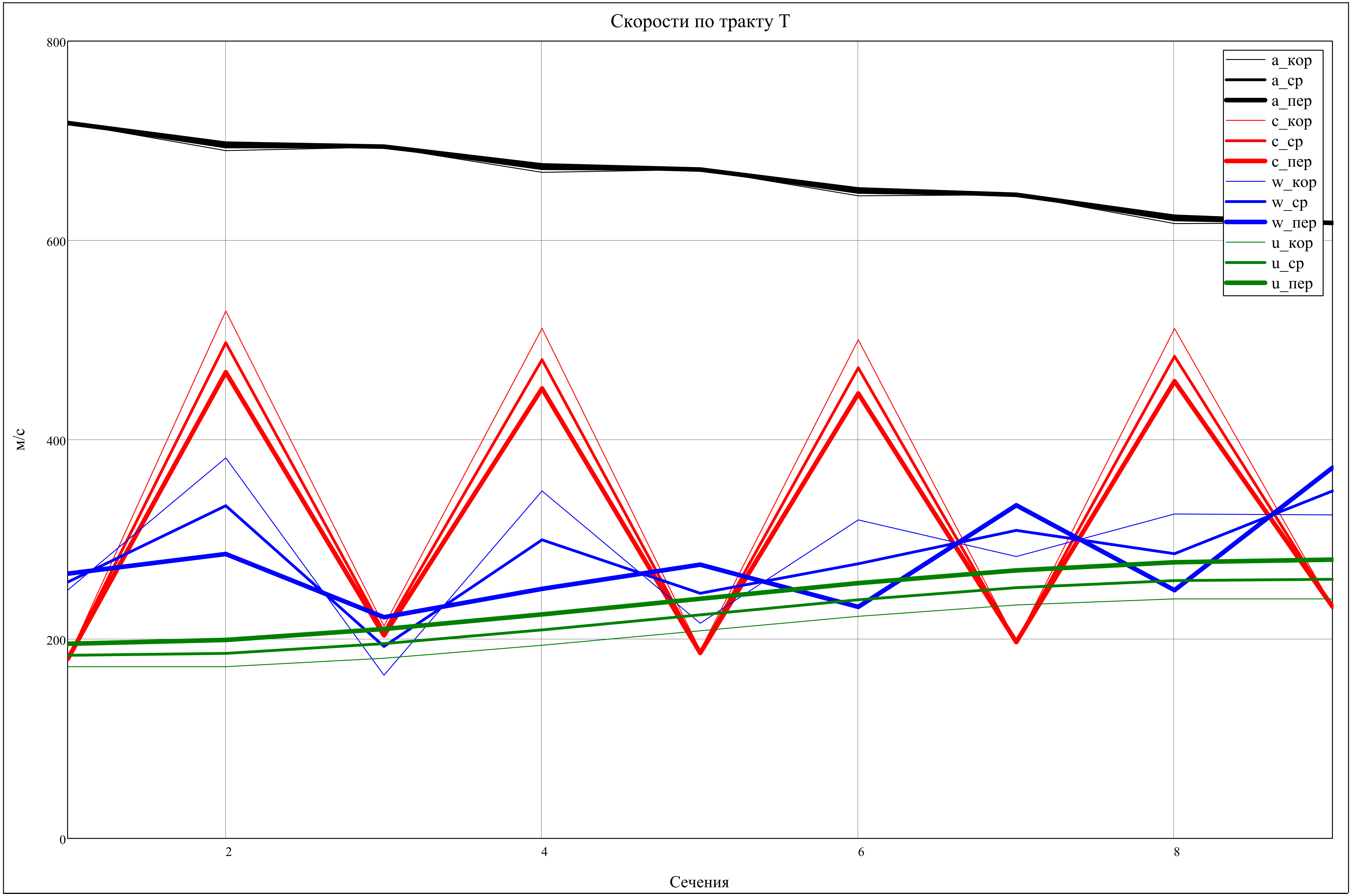
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	249.1	381.8	163.6	348.6	215.8	319.5	282.8	325.5	324.6
2	257.2	333.7	192.6	299.6	246.0	275.5	309.0	285.6	348.6
3	265.6	285.4	221.9	250.3	274.7	232.3	334.2	249.1	371.9

$w_u{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	172.2	-303.8	38.6	-265.3	130.6	-221.3	204.8	-203.8
2	183.8	-273.2	82.8	-232.1	169.3	-187.4	238.5	-165.3
3	195.3	-245.4	123.5	-201.7	205.2	-155.7	270.0	...

$w_a{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	180.0	231.2	159.0	226.1	171.8	230.5	195.0	253.8	232.0
2	180.0	191.7	173.9	189.4	178.5	202.0	196.6	232.9	232.4
3	180.0	145.6	184.4	148.3	182.6	172.4	197.0	212.9	232.1


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

$\alpha^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.00	25.90	48.23	26.23	65.69	27.43	81.44	29.75	86.72
2	90.00	22.68	57.09	23.23	72.85	25.32	86.19	28.78	89.96
3	90.00	18.14	64.85	19.18	79.08	22.71	90.31	27.66	92.70

$\cdot°$

$\beta^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	46.26	142.73	76.34	139.56	52.76	133.84	43.59	128.76
2	44.41	144.94	64.54	140.78	46.51	132.86	39.50	125.36
3	42.67	149.32	56.19	143.67	41.67	132.10	36.12	...

$\cdot°$

$80\cdot° \le \alpha^T =$

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

[1, с.78]

Угол поворота потока:

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

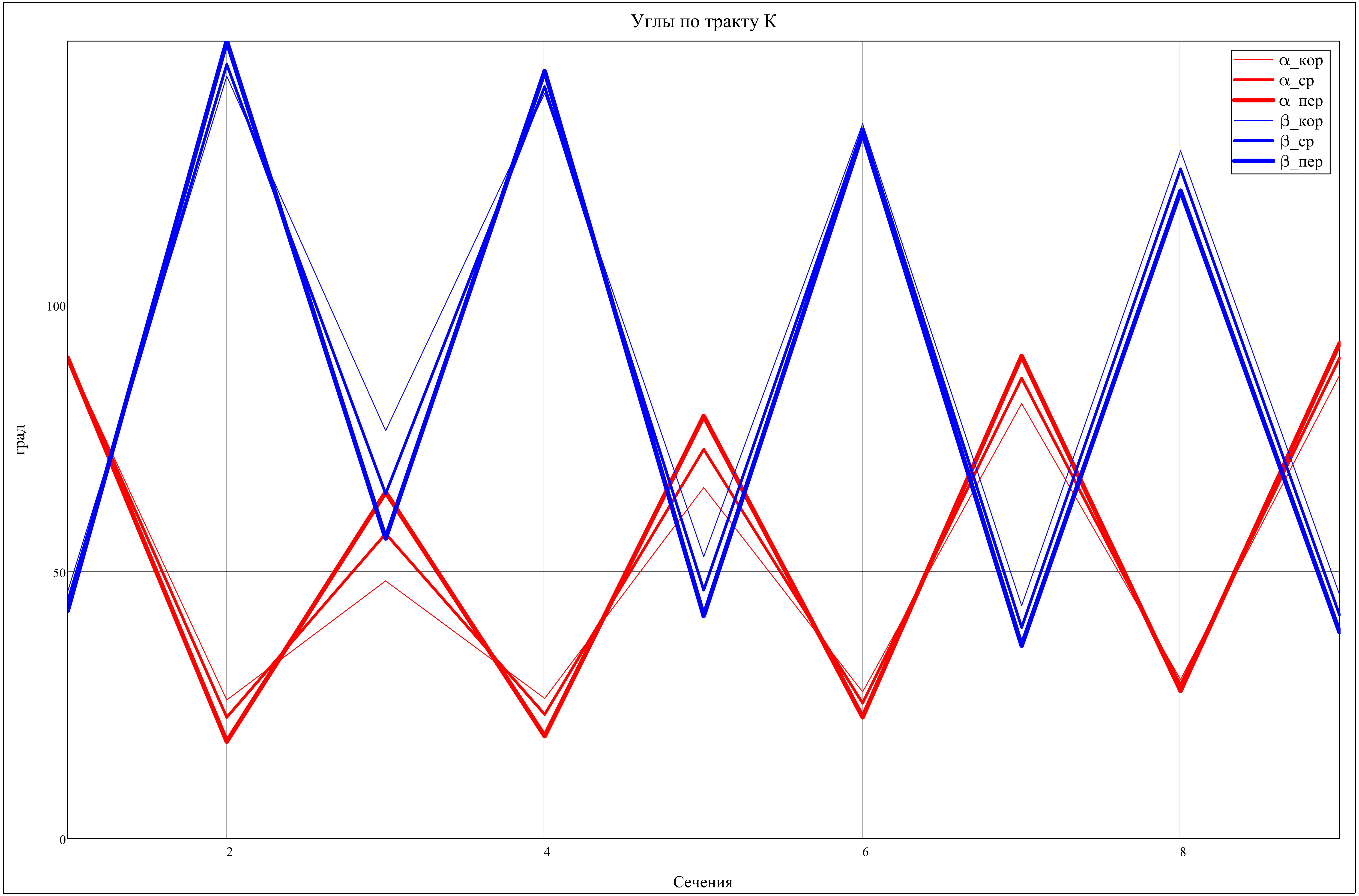
	1	2	3	4
1	64.10	22.00	38.26	51.69
2	67.32	33.86	47.53	57.40
3	71.86	45.67	56.37	62.65

$\cdot°$

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

	1	2	3	4
1	66.39	86.80	90.25	83.14
2	80.39	94.27	93.36	83.56
3	93.13	102.01	95.98	82.65

$\cdot°$



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

$\lambda_c^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.269	0.790	0.329	0.789	0.301	0.799	0.327	0.848	0.402
2	0.269	0.742	0.319	0.740	0.298	0.754	0.327	0.802	0.402
3	0.269	0.698	0.314	0.696	0.297	0.713	0.327	0.761	0.402

$\lambda_w^T =$

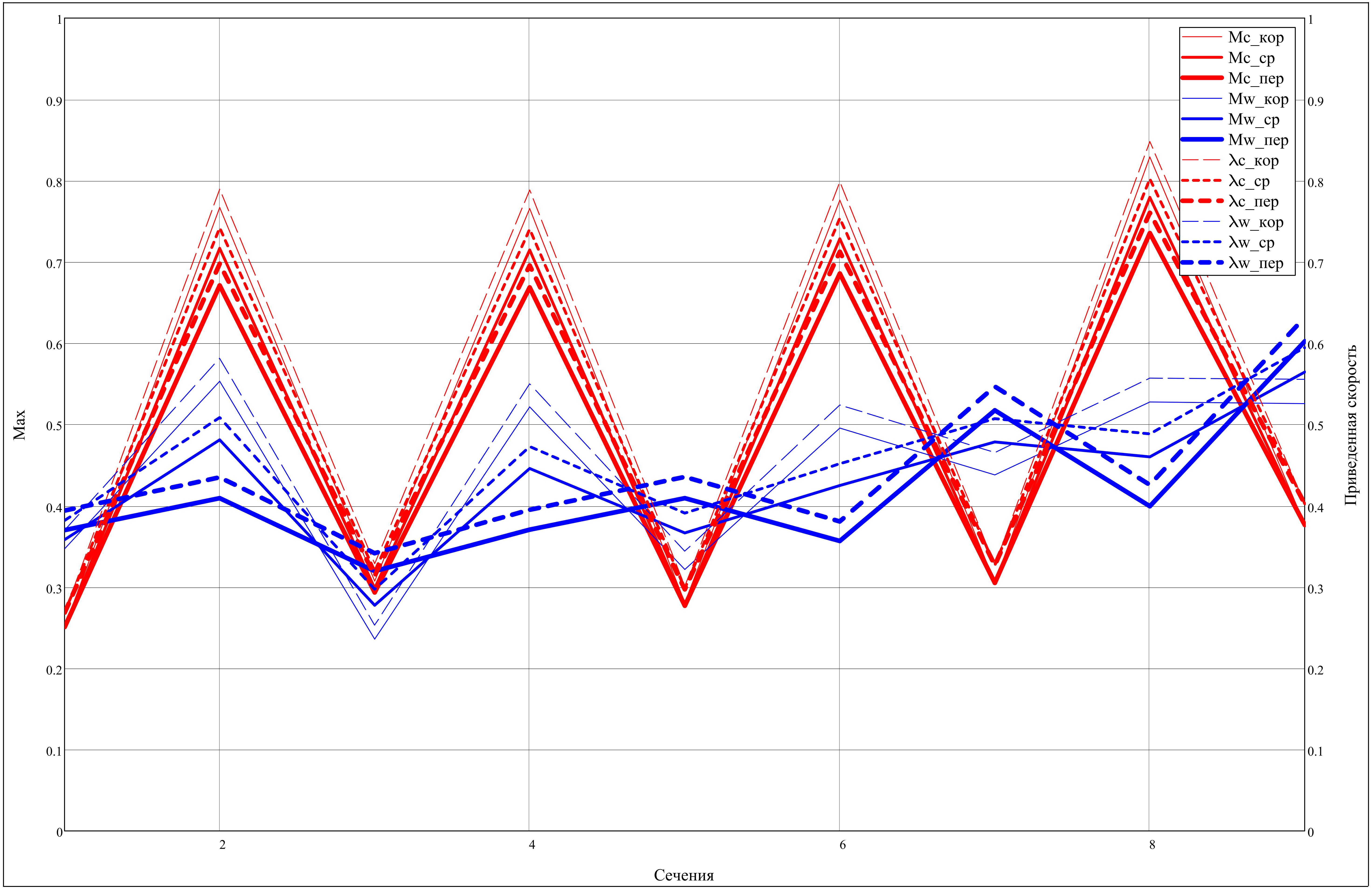
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.370	0.582	0.253	0.550	0.344	0.524	0.465	0.557	0.556
2	0.382	0.509	0.297	0.473	0.391	0.452	0.507	0.488	0.595
3	0.394	0.435	0.342	0.395	0.436	0.381	0.547	0.426	0.632

$M_c^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.251	0.767	0.307	0.766	0.281	0.776	0.305	0.829	0.376
2	0.251	0.717	0.299	0.715	0.278	0.728	0.305	0.779	0.376
3	0.251	0.671	0.293	0.669	0.277	0.686	0.305	0.735	0.376

$M_w^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.3	0.6	0.2	0.5	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5
2	0.4	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.6


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
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
2
4
6
8

Результаты расчета Л по высоте

Вывод результатов расчета параметров потока по высоте Л

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

Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

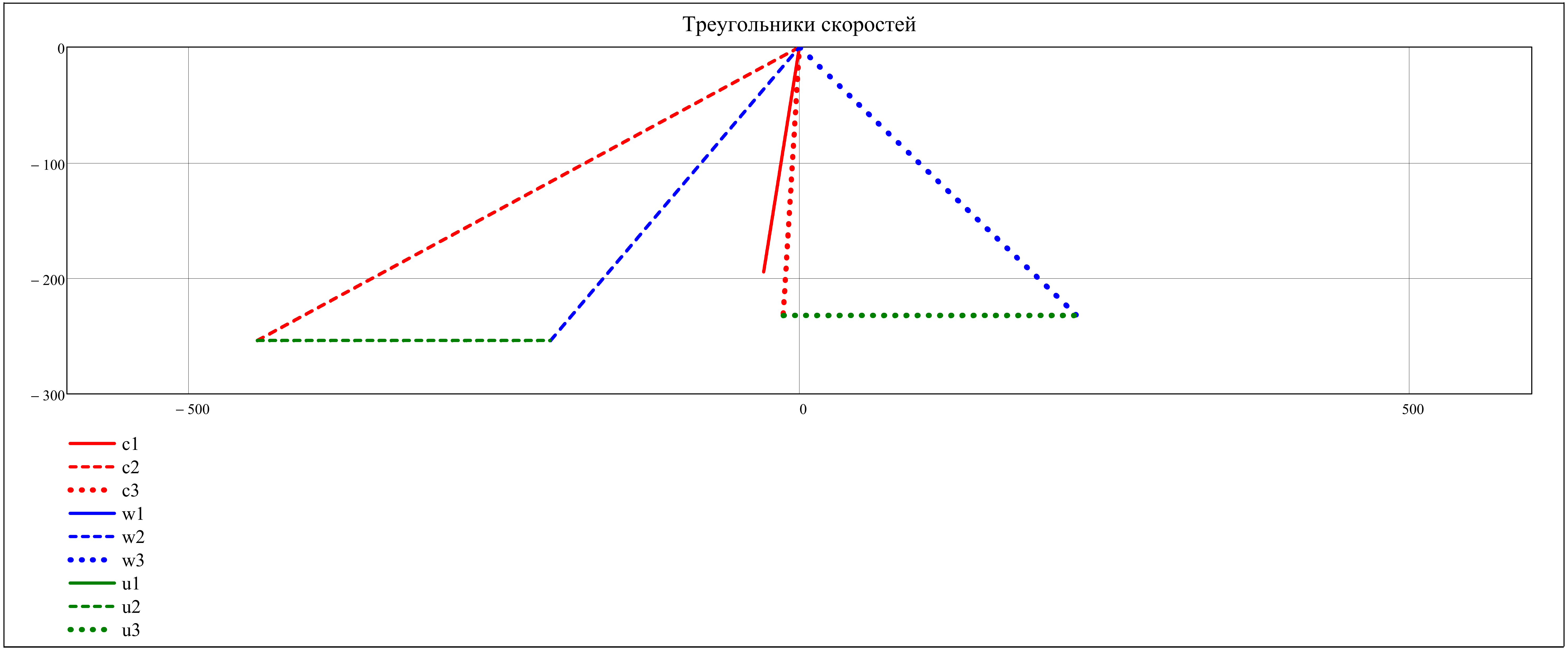
$$\Delta_w(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{ll} -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v & \text{if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) \ge 0\right) \wedge \left(-\left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right| \le v \le 0\right) \wedge (j \ne 1) \\ -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot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

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

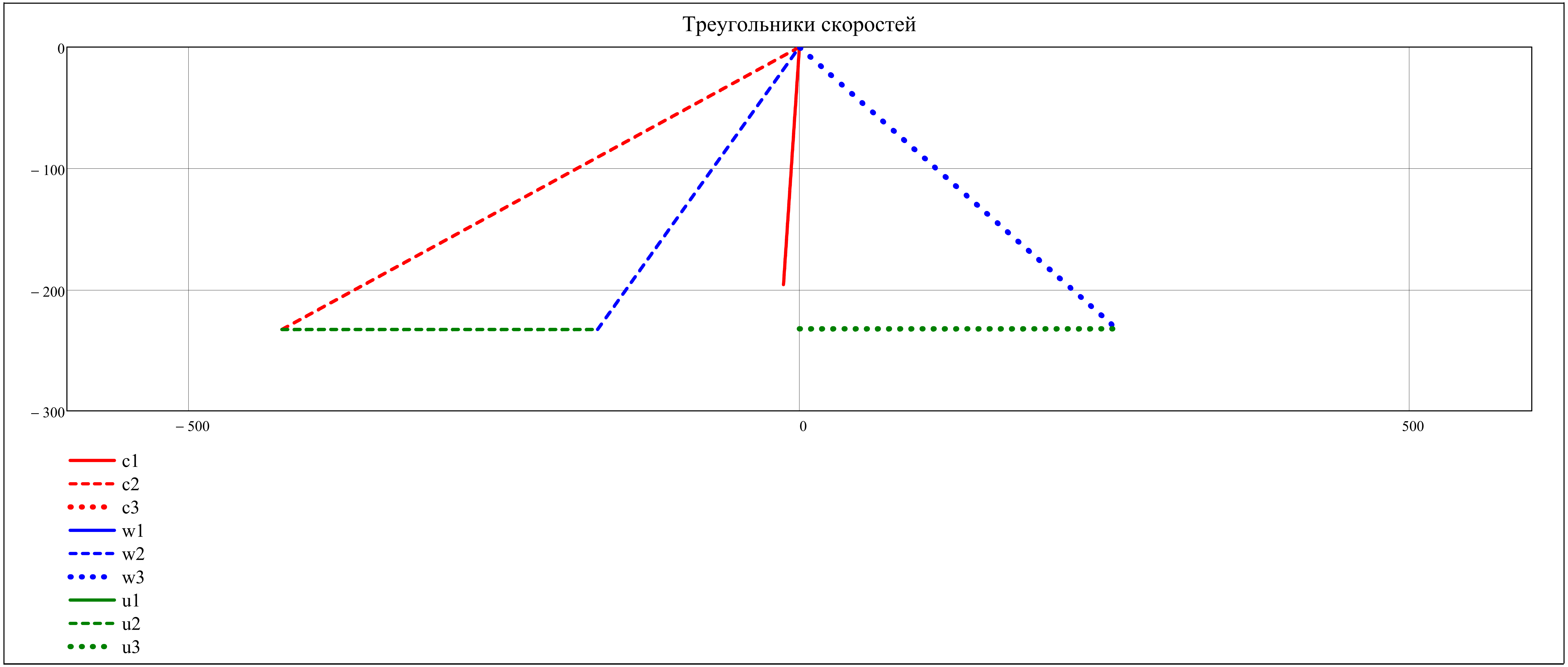
$$v_{lim} = \text{ceil}\left(\frac{\max(c,w,u)}{10^2}\right)\cdot 10^2 = 600.0$$

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

r = 1

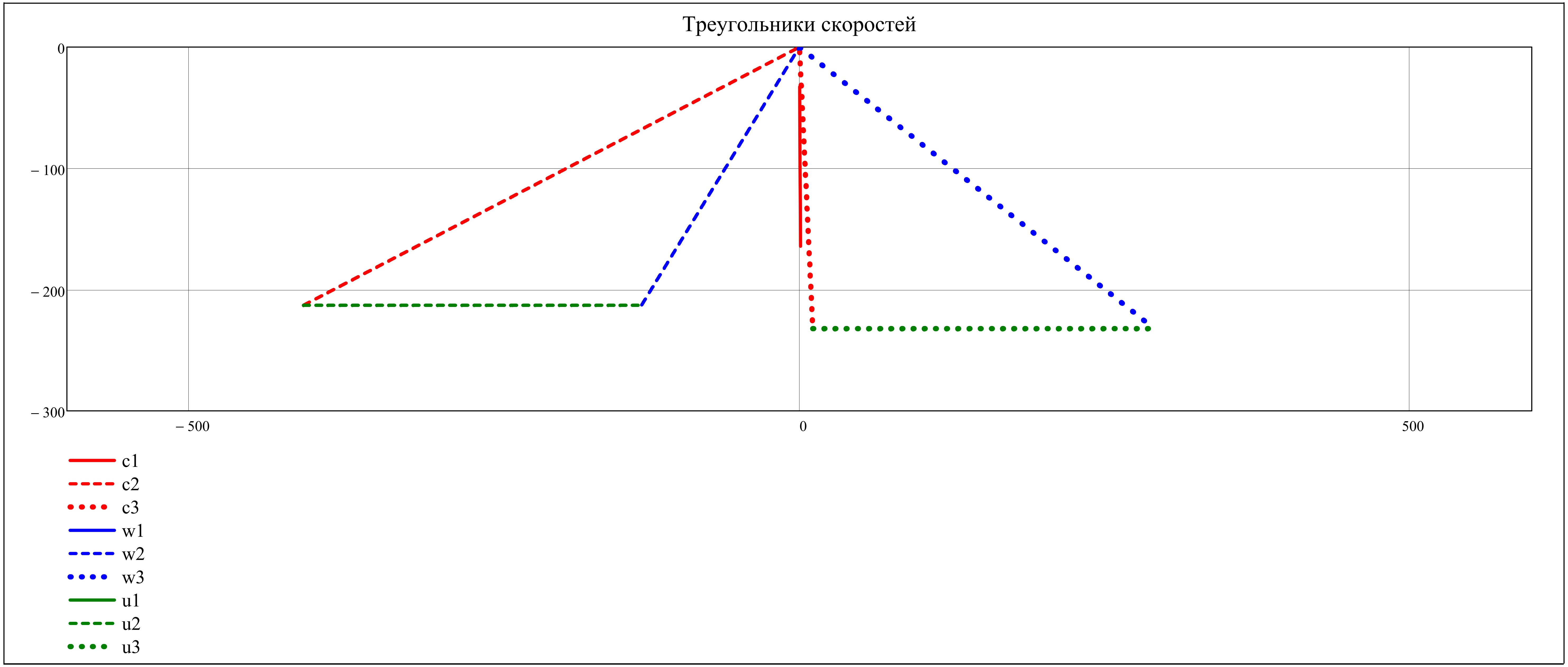

Треугольники скоростей
0
− 100
− 200
− 300
− 500
0
500
c1
c2
c3
w1
w2
w3
u1
u2
u3

$r = av(N_r)$



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

$r := N_r$



▲ Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

Расчет хорд Л по парусности

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

Длины хорд РК и СА (м):

$chord_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	58.6	50.6	60.3	69.3
2	58.6	50.6	60.3	69.3
3	58.6	50.6	60.3	69.3

$\cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	32.4	36.4	42.0	45.8
2	29.6	33.4	38.5	42.1
3	25.3	27.9	33.0	38.2

$\cdot 10^{-3}$

Расчет хорд Л по парусности

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

$\overline{x}_f = 0.45$

Расчет параметров решетки

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

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

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

Расчет параметров решетки

Результаты расчета параметров решеток

Относительные радиусы профилей ():

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

	1	2	3	4
1	4.400	4.400	4.400	4.400
2	4.400	4.400	4.400	4.400
3	4.400	4.400	4.400	4.400

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	3.900	3.900	3.900	3.900
2	3.300	3.300	3.300	3.300
3	2.100	2.100	2.100	2.100

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	2.200	2.200	2.200	2.200
2	2.200	2.200	2.200	2.200
3	2.200	2.200	2.200	2.200

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	1.300	1.300	1.300	1.300
2	1.100	1.100	1.100	1.100
3	0.700	0.700	0.700	0.700

$\cdot\%$

Относительная толщина профиля ():

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

	1	2	3	4
1	11.00	11.00	11.00	11.00
2	11.00	11.00	11.00	11.00
3	11.00	11.00	11.00	11.00

$\cdot\%$

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

	1	2	3	4
1	13.00	13.00	13.00	13.00
2	11.00	11.00	11.00	11.00
3	7.00	7.00	7.00	7.00

$\cdot\%$

Относительный шаг решетки ():

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

	1	2	3	4
1	0.6926	0.5508	0.5945	0.6251
2	0.7428	0.5952	0.6398	0.6721
3	0.7930	0.6396	0.6850	0.7192

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

	1	2	3	4
1	0.5757	0.6062	0.6355	0.6251
2	0.6801	0.7137	0.7441	0.7336
3	0.8563	0.9153	0.9288	0.8681

Относительная густота решетки ():

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

	1	2	3	4
1	1.444	1.815	1.682	1.600
2	1.346	1.680	1.563	1.488
3	1.261	1.563	1.460	1.391

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

	1	2	3	4
1	1.737	1.650	1.574	1.600
2	1.470	1.401	1.344	1.363
3	1.168	1.092	1.077	1.152

Длина хорды профиля [м]:

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

	1	2	3	4
1	58.6	50.6	60.3	69.3
2	58.6	50.6	60.3	69.3
3	58.6	50.6	60.3	69.3

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

	1	2	3	4
1	32.4	36.4	42.0	45.8
2	29.6	33.4	38.5	42.1
3	25.3	27.9	33.0	38.2

Радиусы профилей:

$r\_inlet_{stator}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	2.58	2.23	2.66	3.05
2	2.58	2.23	2.66	3.05
3	2.58	2.23	2.66	3.05

$r\_inlet_{rotor}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	1.26	1.42	1.64	1.79
2	0.98	1.10	1.27	1.39
3	0.53	0.59	0.69	0.80

$r\_outlet_{stator}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	1.29	1.11	1.33	1.52
2	1.29	1.11	1.33	1.52
3	1.29	1.11	1.33	1.52

$r\_outlet_{rotor}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	0.42	0.47	0.55	0.60
2	0.33	0.37	0.42	0.46
3	0.18	0.20	0.23	0.27

Толщина профиля [м]:

$c_{stator}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	6.45	5.57	6.64	7.62
2	6.45	5.57	6.64	7.62
3	6.45	5.57	6.64	7.62

$c_{rotor}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	4.22	4.74	5.45	5.96
2	3.26	3.67	4.24	4.63
3	1.77	1.96	2.31	2.67

Шаг решетки [м]:

$t_{stator}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

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

$t_{rotor}^{T} =$ (table) $\cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4
1	18.7	22.1	26.7	28.6
2	20.2	23.8	28.7	30.9
3	21.6	25.6	30.6	33.2

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

	1	2	3	4
1	64.10	22.00	38.26	51.69
2	67.32	33.86	47.53	57.40
3	71.86	45.67	56.37	62.65

$\cdot°$

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

	1	2	3	4
1	66.39	86.80	90.25	83.14
2	80.39	94.27	93.36	83.56
3	93.13	102.01	95.98	82.65

$\cdot°$

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

	1	2	3	4
1	134.2	124.4	130.1	136.5
2	129.9	123.9	129.5	136.7
3	123.2	120.9	127.8	136.3

$\cdot°$

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

	1	2	3	4
1	142.1	136.0	134.8	138.3
2	136.5	132.6	133.1	137.6
3	130.3	128.8	131.3	137.1

$\cdot°$

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

	1	2	3	4
1	115.9	158.0	141.7	128.3
2	112.7	146.1	132.5	122.6
3	108.1	134.3	123.6	117.4

$\cdot°$

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

	1	2	3	4
1	113.6	93.2	89.8	96.9
2	99.6	85.7	86.6	96.4
3	86.9	78.0	84.0	97.3

$\cdot°$

Результаты расчета параметров решеток

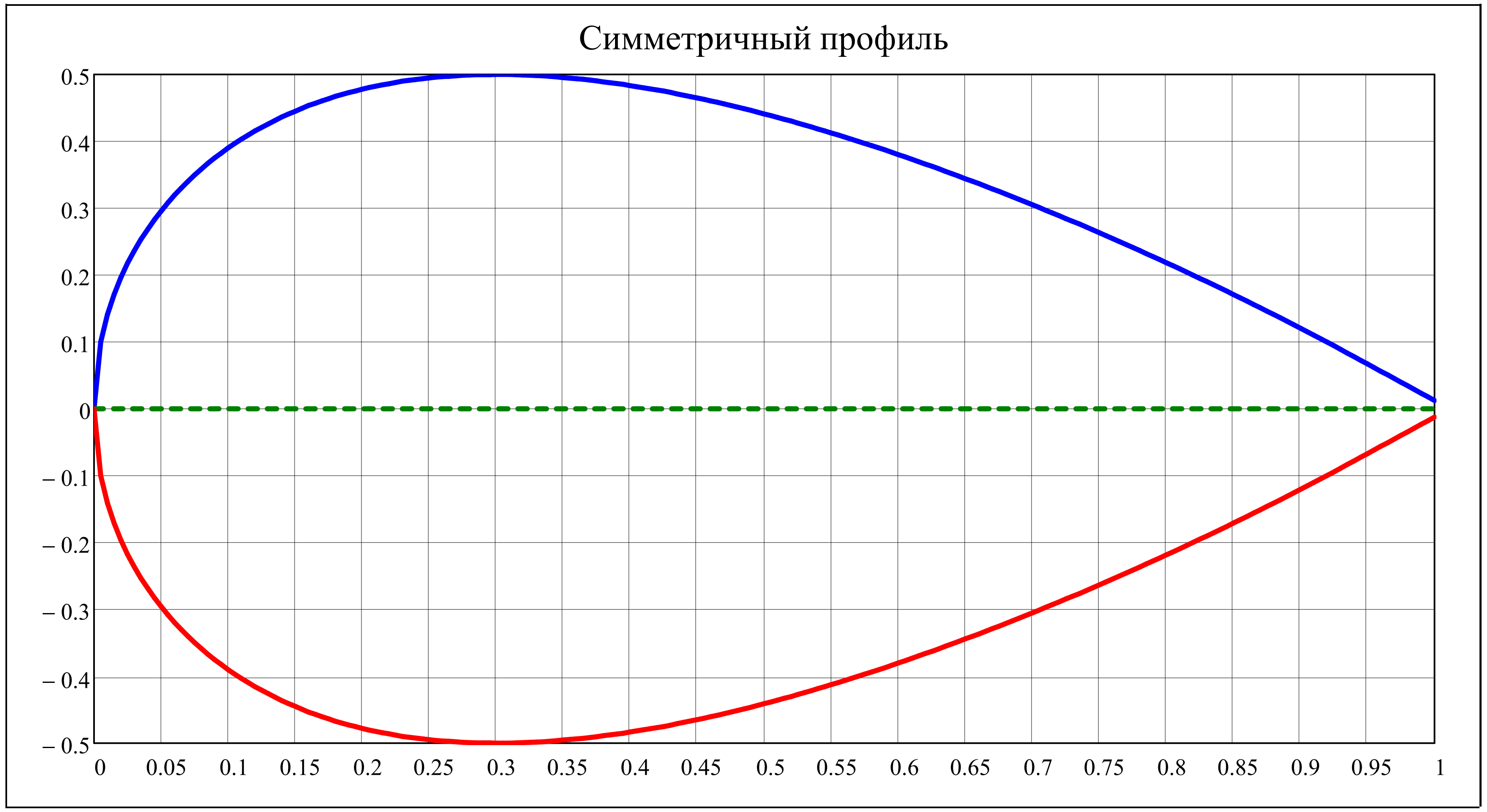
Подключение симметричного профиля

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

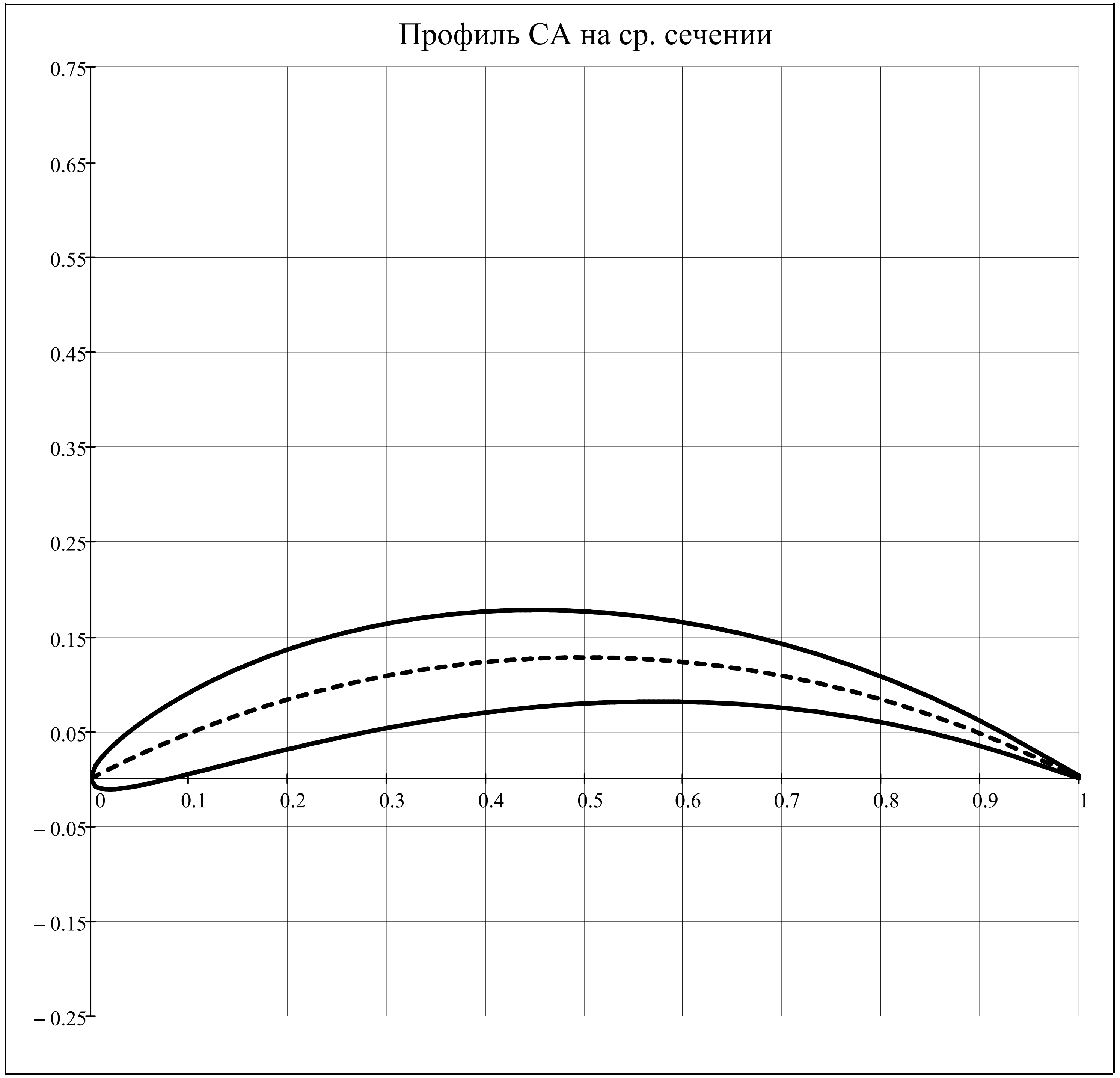
Относ. координаты профиля РК и СА:

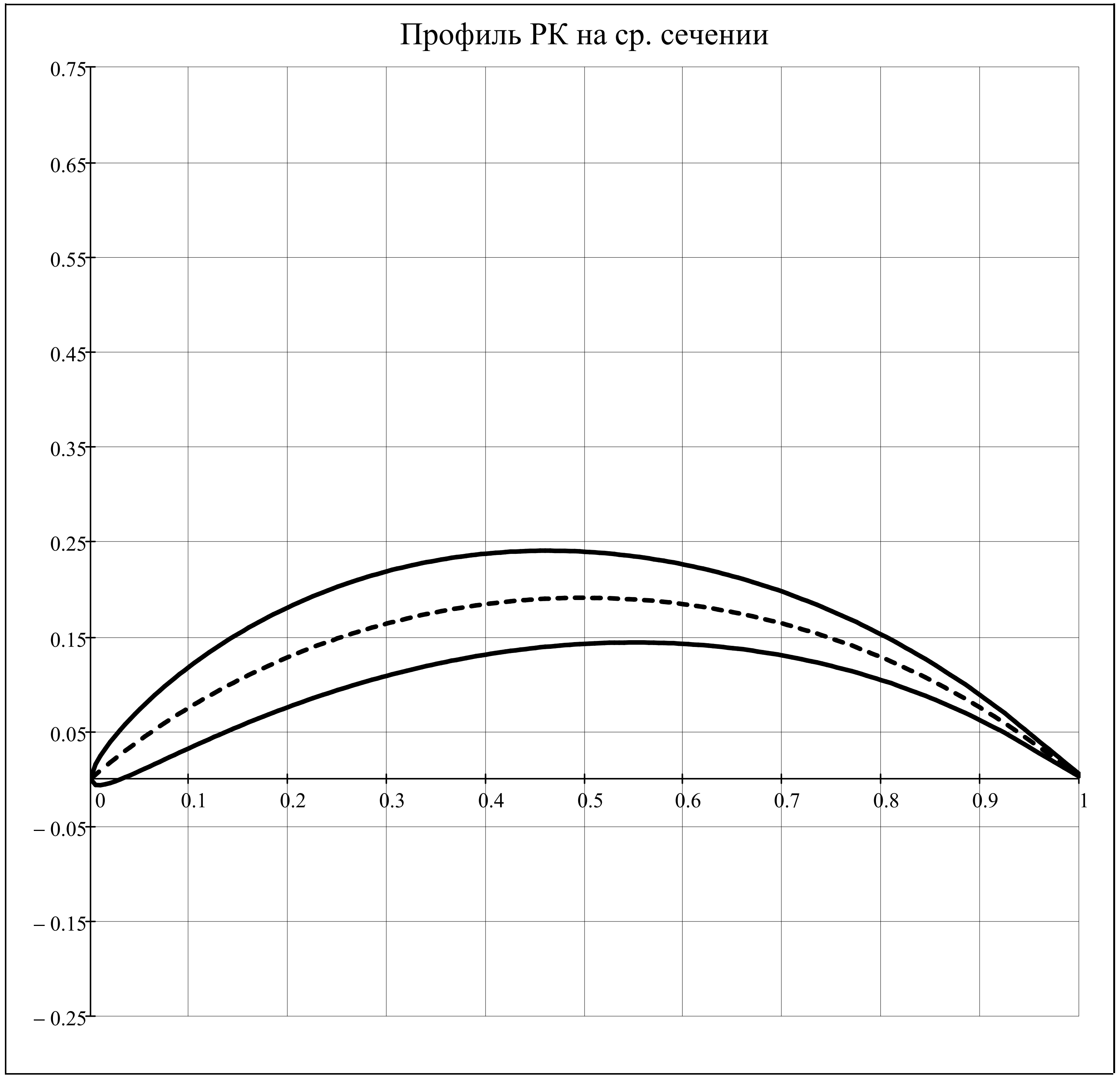
$$\mathrm{AIRFOIL}_0\left(x,\mathrm{line},\overline{f},\overline{x}_f,\overline{c}\right) = \begin{cases} \begin{cases} \mathrm{linterp}\left(X_U,Y_U,x\right) & \text{if line = "+"} \\ \dfrac{\mathrm{linterp}\left(X_U,Y_U,x\right)+\mathrm{linterp}\left(X_L,Y_L,x\right)}{2} & \text{if line = "0"} \\ \mathrm{linterp}\left(X_L,Y_L,x\right)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

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



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





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	2	3	4
1	64.56	52.34	63.63	74.60
2	64.97	53.07	64.52	75.34
3	65.58	53.97	65.48	76.07

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	36.19	42.56	49.41	53.03
2	33.76	39.33	45.25	48.34
3	29.12	32.92	38.27	42.93

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	60.35	51.07	61.02	70.56
2	60.56	51.13	61.28	70.87
3	60.88	51.36	61.66	71.26

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	33.41	38.53	44.61	48.17
2	31.13	35.90	41.33	44.46
3	27.43	30.92	36.02	40.64

$\cdot 10^{-3}$

$area_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	258.72	192.80	273.90	361.23
2	258.72	192.80	273.90	361.23
3	258.72	192.80	273.90	361.23

$\cdot 10^{-6}$

$area_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	93.47	118.07	156.50	186.58
2	66.07	83.84	111.52	133.48
3	30.58	37.34	52.08	69.88

$\cdot 10^{-6}$

$Sx_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	1665.7	355.1	1055.4	2185.0
2	1756.8	549.9	1321.3	2441.5
3	1887.1	748.6	1581.0	2681.1

$\cdot 10^{-9}$

$Sx_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	345.7	662.1	1057.2	1251.8
2	276.0	474.3	719.3	828.2
3	129.1	194.3	297.4	388.4

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	6389.6	4110.4	6960.2	10541.9
2	6389.6	4110.4	6960.2	10541.9
3	6389.6	4110.4	6960.2	10541.9

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	1276.4	1812.0	2765.3	3599.6
2	824.6	1178.8	1808.3	2367.8
3	325.4	439.2	723.4	1124.3

$\cdot 10^{-9}$

$x0_{stator}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-3}$

$x0_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	13.7	15.3	17.7	19.3
2	12.5	14.1	16.2	17.7
3	10.6	11.8	13.9	16.1

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	6.4	1.8	3.9	6.0
2	6.8	2.9	4.8	6.8
3	7.3	3.9	5.8	7.4

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	3.7	5.6	6.8	6.7
2	4.2	5.7	6.5	6.2
3	4.2	5.2	5.7	5.6

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	12406	1067	5183	15768
2	13721	2076	7721	19367
3	15720	3549	10739	23084

$\cdot 10^{-12}$

$Jy_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	206780	114833	231764	403124
2	206780	114833	231764	403124
3	206780	114833	231764	403124

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	43693	8055	28524	67776
2	46072	12470	35696	75706
3	49471	16968	42691	83109

$\cdot 10^{-12}$

$Jx0_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	1681	413	1116	2551
2	1791	508	1347	2866
3	1955	642	1613	3185

$\cdot 10^{-12}$

$Jy0_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	48976	27198	54893	95480
2	48976	27198	54893	95480
3	48976	27198	54893	95480

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy0_{stator}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	2554	485	1704	4010
2	2683	747	2119	4456
3	2865	1009	2515	4866

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	3.1	1.0	1.8	2.5
2	3.2	1.6	2.3	2.7
3	3.5	2.2	2.7	3.0

$\cdot \circ$

$Jx_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	1500	4209	8062	9567
2	1303	2990	5174	5785
3	600	1107	1866	2390

$\cdot 10^{-12}$

$Jy_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	22840	36441	64025	90998
2	13485	21716	38421	55040
3	4539	6769	13166	23704

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	5013	10772	19795	25610
2	3654	7064	12356	15579
3	1455	2419	4374	6627

$\cdot 10^{-12}$

$Jx0_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	221	496	921	1168
2	150	306	534	646
3	55	96	168	231

$\cdot 10^{-12}$

$Jy0_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	5410	8631	15164	21553
2	3194	5143	9100	13036
3	1075	1603	3118	5614

$\cdot 10^{-12}$

$Jxy0_{rotor}{}^{T} =$

	1	2	3	4
1	292	610	1115	1460
2	209	395	692	887
3	82	133	244	378

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	3.2	4.3	4.4	4.1
2	3.9	4.6	4.6	4.1
3	4.5	5.0	4.7	4.0

$\cdot \circ$

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

	1	2	3	4
1	1544	404	1063	2378
2	1639	487	1263	2652
3	1781	604	1495	2929

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	205	451	834	1064
2	135	274	479	583
3	48	84	148	205

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	49113.3	27206.9	54947.2	95652.3
2	49127.8	27219.0	54977.0	95693.5
3	49149.7	27236.4	55011.7	95735.4

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	5426	8676	15251	21657
2	3208	5175	9155	13099
3	1081	1615	3138	5641

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	50657	27611	56010	98030
2	50767	27706	56240	98346
3	50931	27841	56507	98664

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	5631	9127	16085	22721
2	3343	5450	9634	13682
3	1130	1699	3286	5846

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	1465.9	940.2	1593.7	2416.2
2	1466.3	940.9	1594.8	2417.3
3	1466.7	941.7	1595.9	2418.3

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	294.3	418.1	638.0	830.5
2	189.3	270.6	415.2	543.7
3	74.2	100.1	164.9	256.3

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	2479.0	1376.7	2778.6	4832.9
2	2479.0	1376.7	2778.6	4832.9
3	2479.0	1376.7	2778.6	4832.9

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	382.4	610.2	1072.1	1523.7
2	161.7	260.3	460.6	659.9
3	22.0	32.9	63.9	115.1

$\cdot 10^{-12}$

$CPx_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	20.527	17.720	21.121	24.255
2	20.527	17.720	21.121	24.255
3	20.527	17.720	21.121	24.255

$\cdot 10^{-3}$

$CPx_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	11.350	12.756	14.686	16.035
2	10.373	11.685	13.477	14.744
3	8.846	9.776	11.545	13.373

$\cdot 10^{-3}$

$CPy_{stator}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-3}$

$CPy_{rotor}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-3}$

Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Вывод результатов расчета геометрических хар-к сечений Л

Профилирование решеток

Абс. координаты профиля:

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

Профилирование решеток

Рассматриваемая ступень:

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

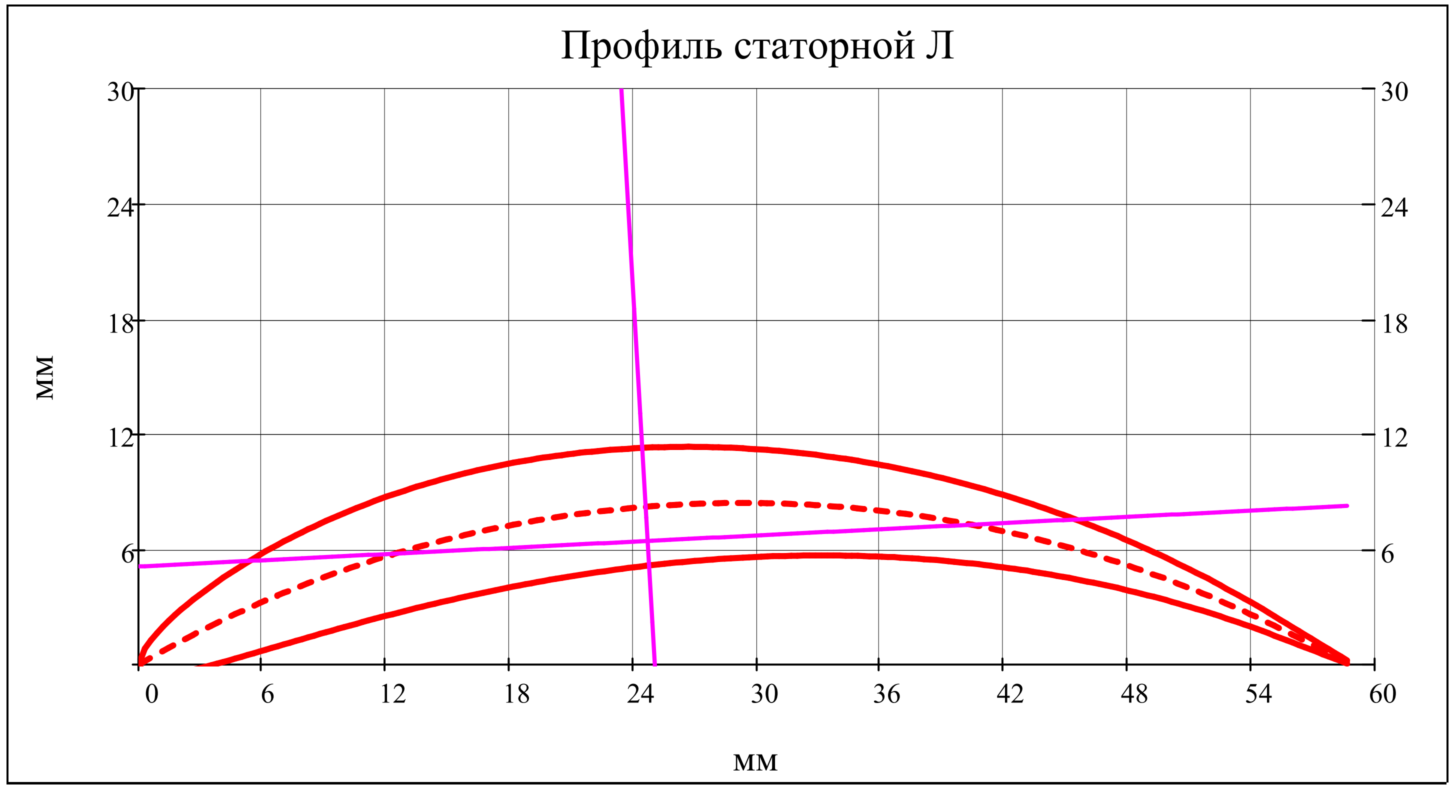
Построение профилей Л РК и НА

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

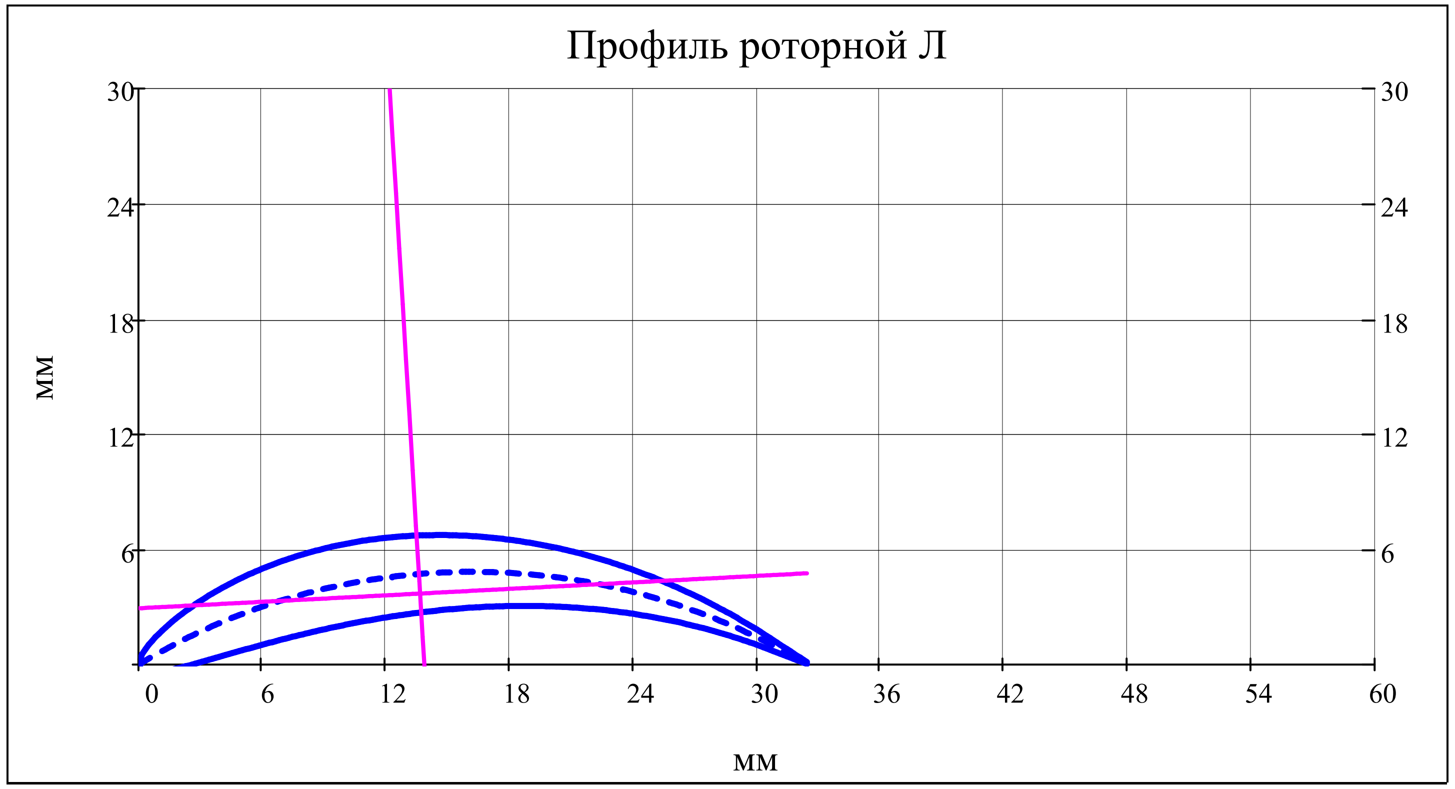
$$b_{lim} = \frac{\operatorname{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right)\cdot 10^2\right)}{10^2} = 60.0\cdot 10^{-3}$$

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

$r = 1$

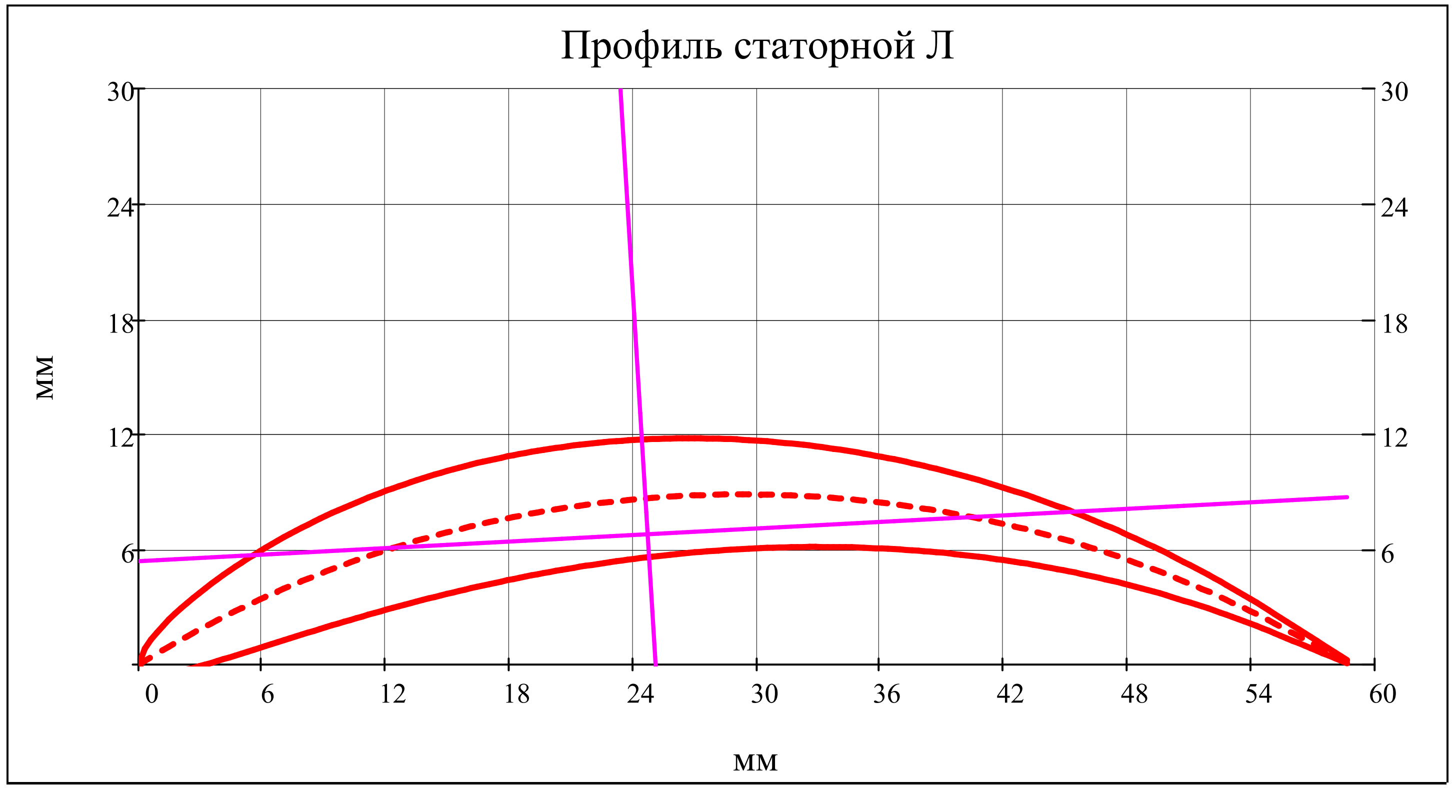


Профиль статорной Л
30
24
18
12
6
0
6
12
18
24
30
36
42
48
54
60
мм
мм

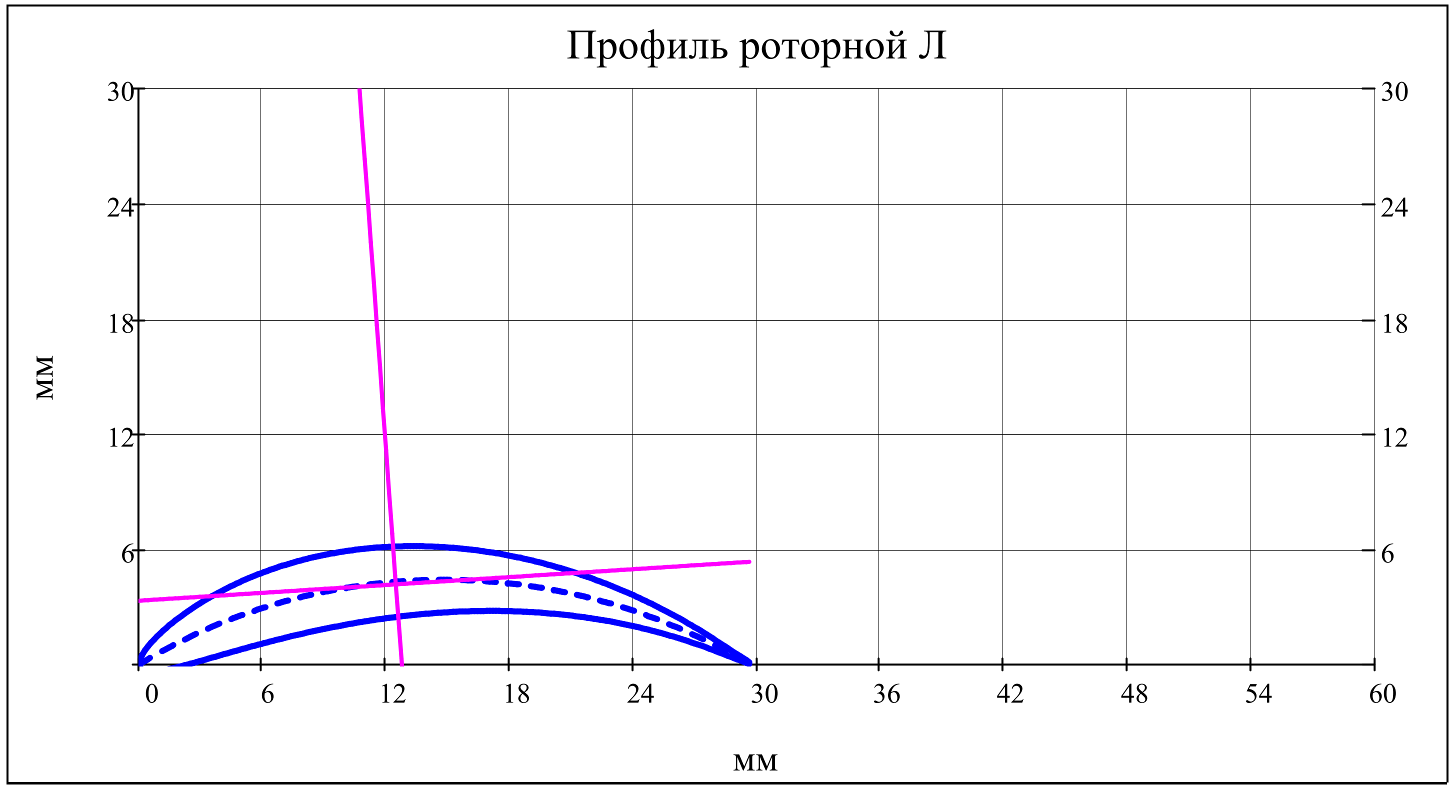


Профиль роторной Л
30
24
18
12
6
0
6
12
18
24
30
36
42
48
54
60
мм
мм

$r = av(N_r)$

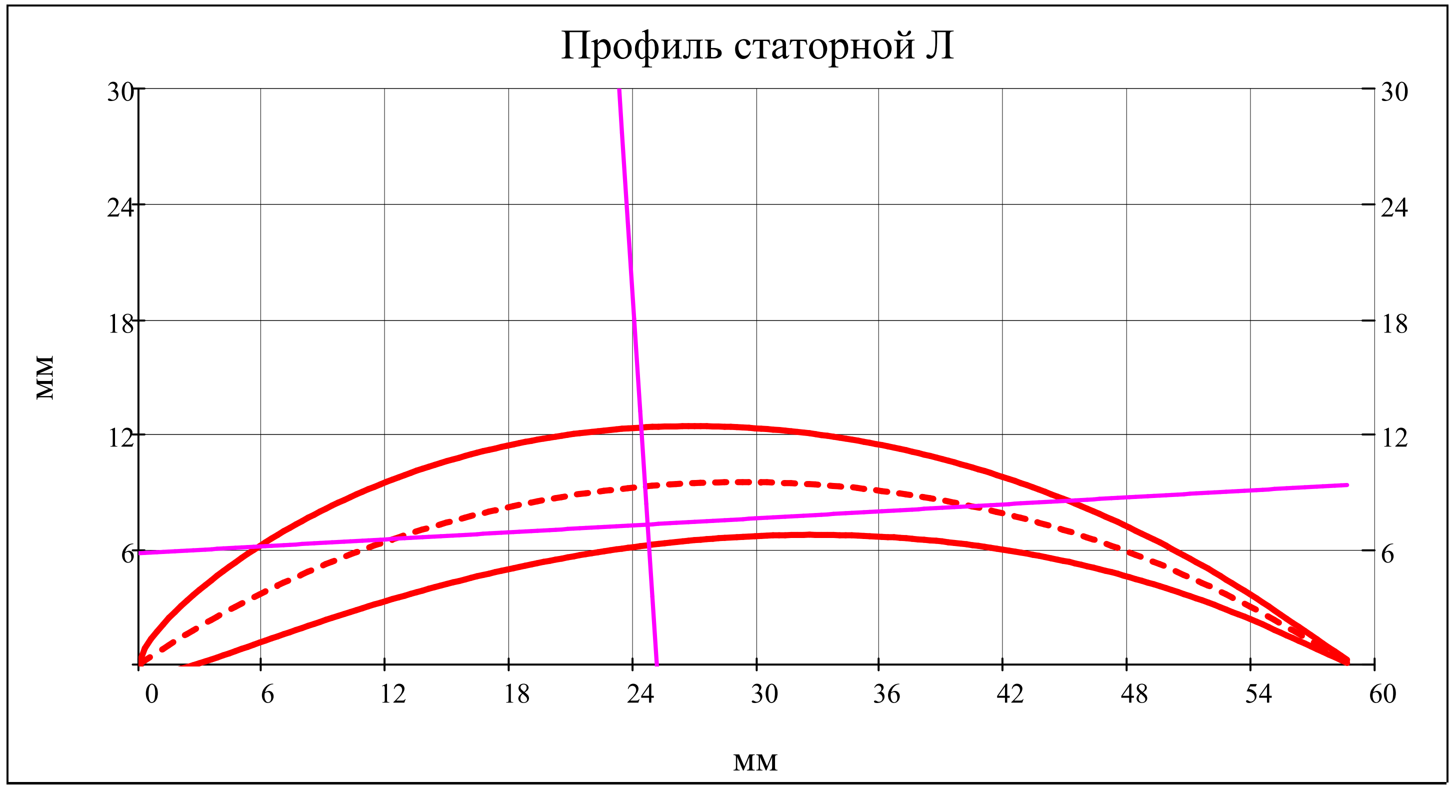


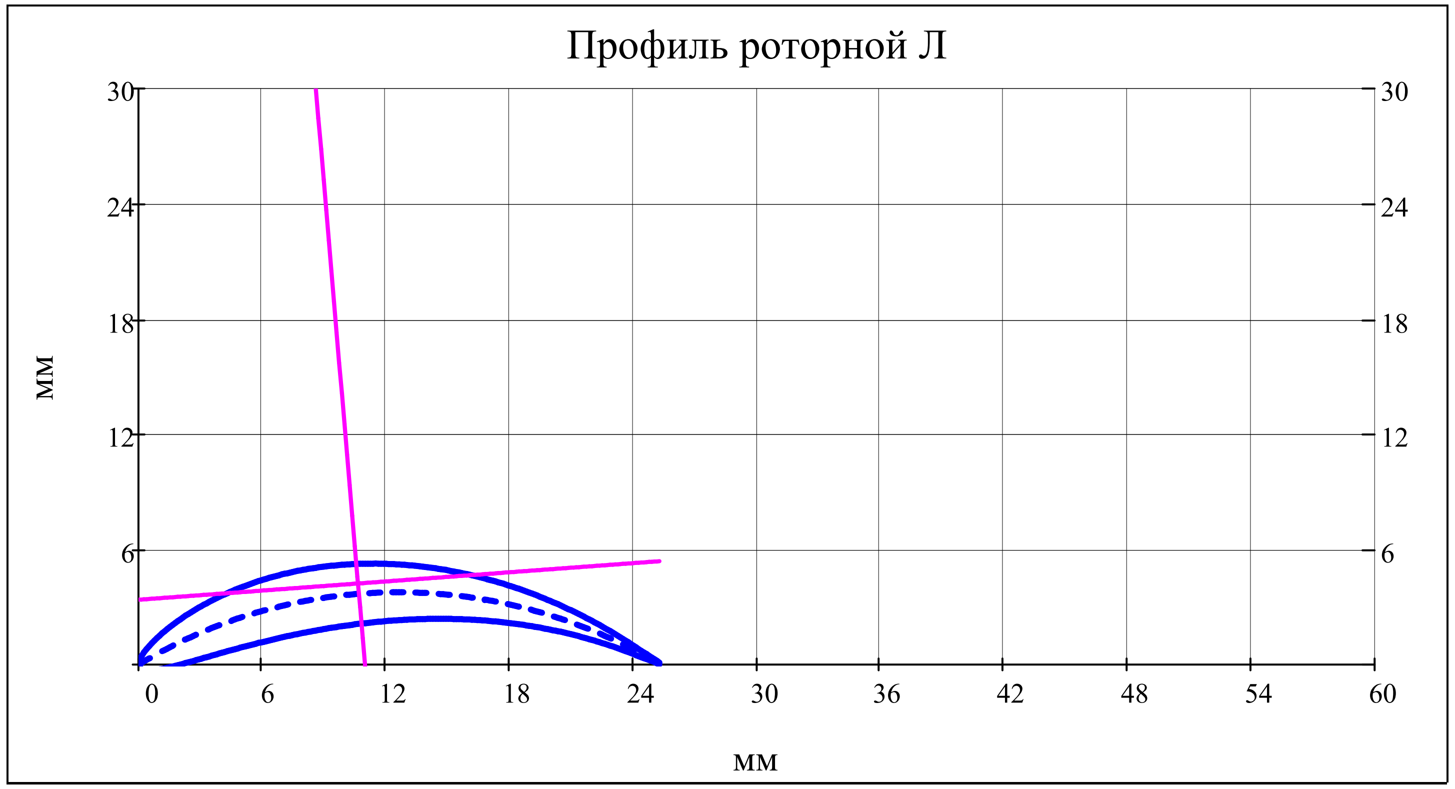
Профиль статорной Л
30
24
18
12
6
0
6
12
18
24
30
36
42
48
54
60
мм
мм



Профиль роторной Л
30
24
18
12
6
0
6
12
18
24
30
36
42
48
54
60
мм
мм

$r = N_r$





Построение профилей Л РК и НА

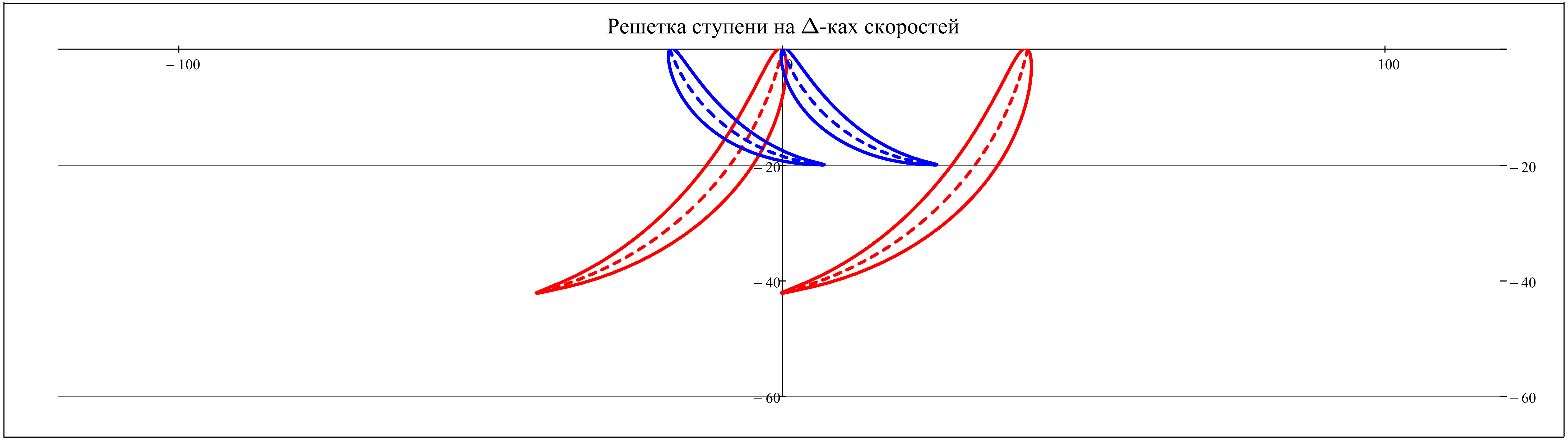
Вывод координат для построения профиля Л

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

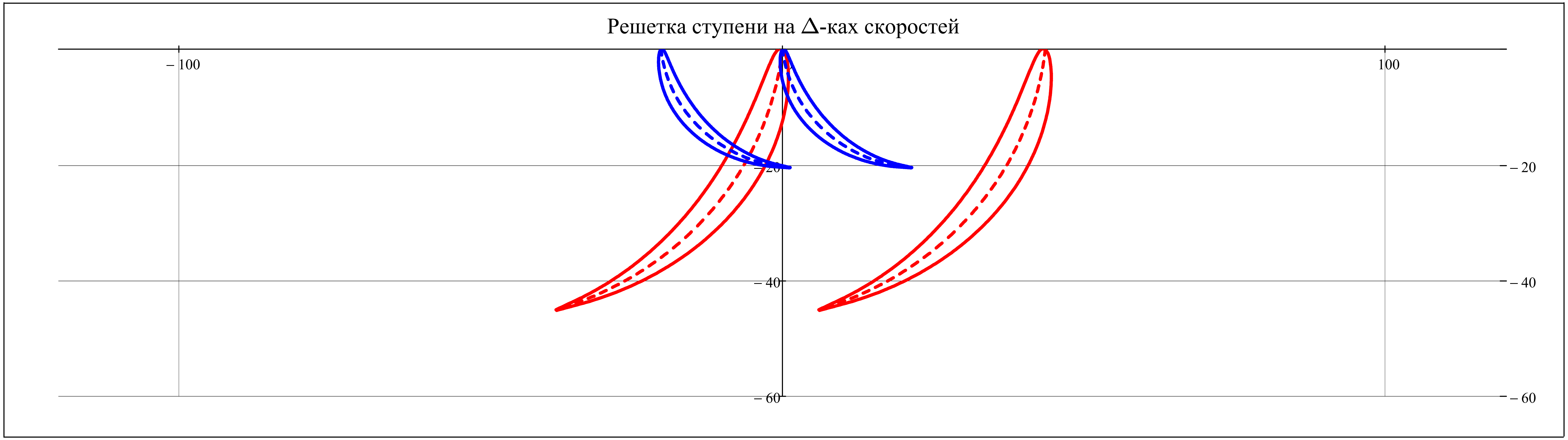
$$b_{lim} = \frac{\text{ceil}\left(\max\left(chord_{rotor_{j,N_r}}, chord_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 60.0 \cdot 10^{-3}$$

Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

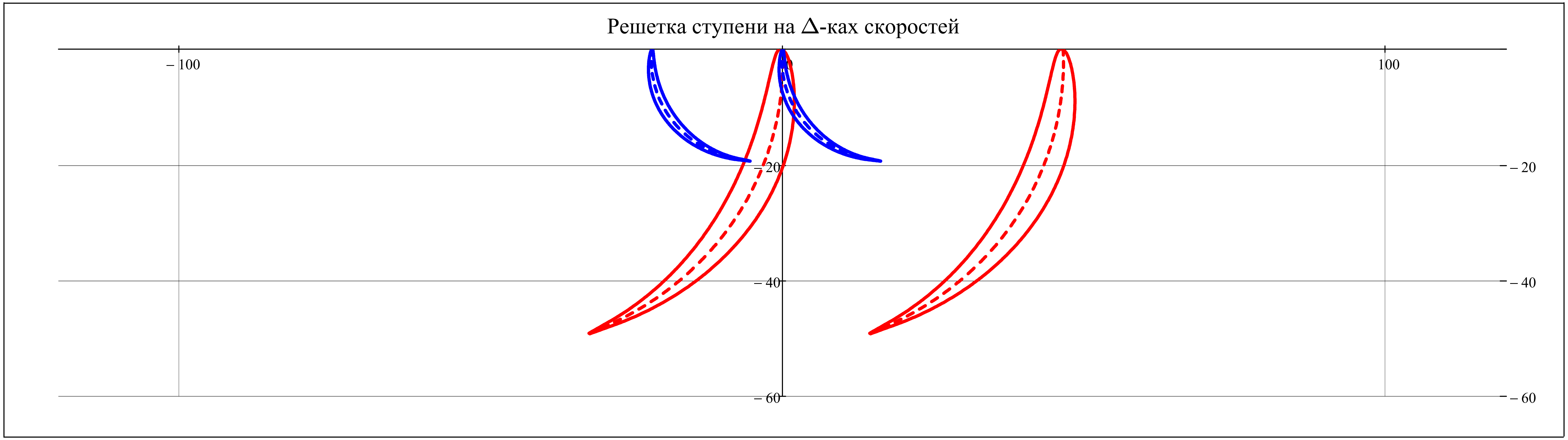
$r = 1$



$r = av(N_r)$



$r = N_r$



▲ Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

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

Рассматриваемая ступень:

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

Поперечная часть ступени

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

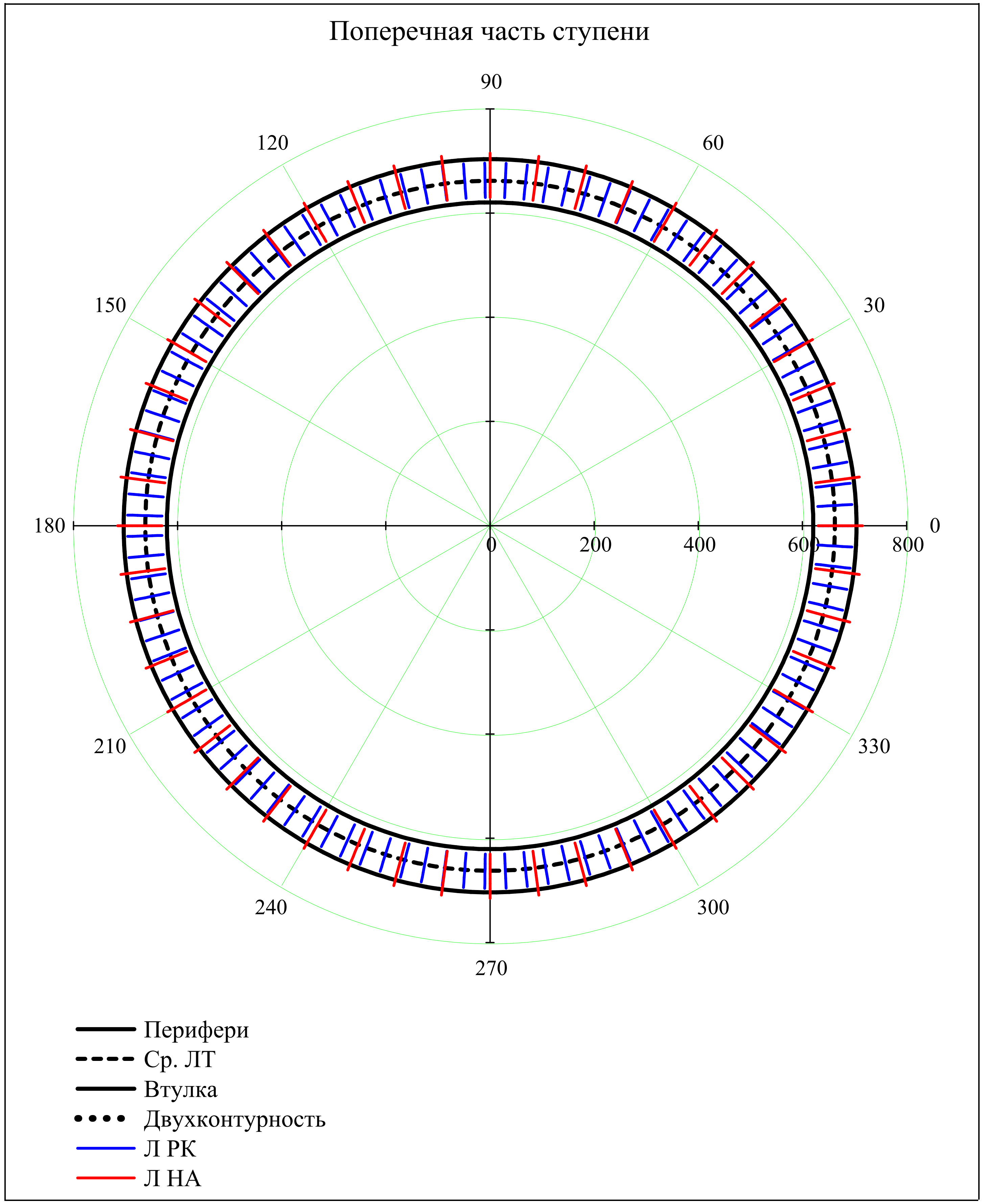
$$i_{rotor} := 1 .. Z_{rotor_j}$$

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

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

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

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



Поперечная часть ступени

Расчет собственных частот колебаний Л

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3485	1505	1722	1835	1562	1561	1543	1248
2	21843	9432	10793	11499	9787	9782	9669	7819
3	61166	26413	30223	32200	27406	27392	27076	21896
4	119951	51798	59268	63146	53745	53718	53097	42939
5	198206	85591	97935	104342	88808	88764	87737	70952
6	296010	127826	146260	155829	132630	132564	131031	105963

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3812	3180	2918	2674	3368	2976	2766	2488
2	11436	9541	8754	8023	10104	8928	8299	7463
3	19060	15902	14591	13372	16841	14881	13832	12439
4	26685	22263	20427	18721	23577	20833	19365	17414
5	34309	28624	26263	24069	30313	26785	24898	22390
6	41933	34985	32099	29418	37050	32738	30431	27365

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	7624	6361	5836	5349	6736	5952	5533	4975
2	15248	12722	11672	10697	13473	11905	11066	9951
3	22873	19083	17509	16046	20209	17857	16599	14926
4	30497	25444	23345	21395	26945	23809	22132	19902
5	38121	31805	29181	26744	33682	29762	27665	24877
6	45745	38166	35017	32092	40418	35714	33197	29853

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

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

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

Определение координат точек профиля Л, наиболее удаленных от НЛ

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

	1	2	3	4
1	-0.771	-0.359	-0.336	-0.674
2	-0.397	-0.347	-0.341	-0.363
3	0.146	0.170	0.163	0.135

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

	1	2	3	4
1	3.038	3.324	3.372	3.279
2	2.669	2.844	2.834	2.713
3	1.934	2.027	1.964	1.819

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

	1	2	3	4
1	18.423	18.198	18.139	18.190
2	16.738	16.589	16.580	16.658
3	14.203	14.117	14.152	14.251

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

	1	2	3	4
1	-5.143	-6.725	-7.040	-6.584
2	-5.576	-6.572	-6.555	-5.938
3	-5.408	-5.963	-5.647	-4.892

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

	1	2	3	4
1	-5.101	26.620	19.884	16.746
2	13.579	27.702	31.315	19.244
3	-9.445	-16.428	-13.947	27.195

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

	1	2	3	4
1	25.008	6.901	7.009	7.208
2	31.802	19.883	13.873	8.592
3	6.651	7.953	21.140	12.770

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

	1	2	3	4
1	-8.197	-21.916	-21.919	-21.412
2	1.424	-15.550	-17.773	-20.198
3	29.069	29.084	6.733	-16.908

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

	1	2	3	4
1	-33.559	-9.119	-10.986	-12.486
2	-25.574	-18.863	-17.146	-14.602
3	-18.963	-18.084	-33.741	-18.499

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

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

$$\sigma\_p_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & -47.11 & -36.12 & -23.18 & -14.88 \\ 2 & -22.35 & -18.72 & -11.72 & -6.22 \\ 3 & -3.87 & -4.94 & -2.06 & -0.06 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_p_{stator}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0.00 & 0.70 & 0.36 & 0.03 \\ 2 & 1.39 & 7.96 & 5.00 & 1.63 \\ 3 & -9.13 & -17.30 & -6.49 & 6.71 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_p_{rotor}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

$$\sigma\_p_{stator}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

$$\sigma\_n_{rotor}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 85.83 & 77.66 & 51.55 & 32.33 \\ 2 & 49.10 & 45.13 & 28.47 & 14.57 \\ 3 & 11.15 & 14.91 & 6.14 & 0.16 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_n_{stator}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0.00 & -0.74 & -0.48 & -0.05 \\ 2 & -0.20 & -5.82 & -4.17 & -2.24 \\ 3 & 26.68 & 35.35 & 5.99 & -6.41 \end{array} \cdot 10^{6}$$

$$\sigma\_n_{rotor}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

$$\sigma\_n_{stator}^{T} \le 70 \cdot 10^{6} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

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

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

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

	1	2	3	4
1	116.67	117.88	101.19	89.04
2	68.23	69.97	59.02	47.69
3	17.89	24.36	16.54	3.18

$\cdot 10^6$

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

	1	2	3	4
1	0.00	0.73	0.44	0.10
2	2.14	8.01	5.08	1.77
3	26.89	35.40	6.22	6.85

$\cdot 10^6$

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

$safety_{rotor}{}^T =$

	1	2	3	4
1	1.03	1.02	1.19	1.35
2	1.76	1.71	2.03	2.52
3	6.71	4.93	7.26	37.69

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

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

$safety_{stator}{}^T =$

	1	2
1	0000000000000000000000000000000	
2	56.01	
3	4.46	

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

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

Рассматриваемая ступень:

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

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

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

	1	2	3
1	422.0	453.2	484.5
2	433.0	466.0	499.1
3	433.0	468.5	503.9

$\cdot 10^{-3}$

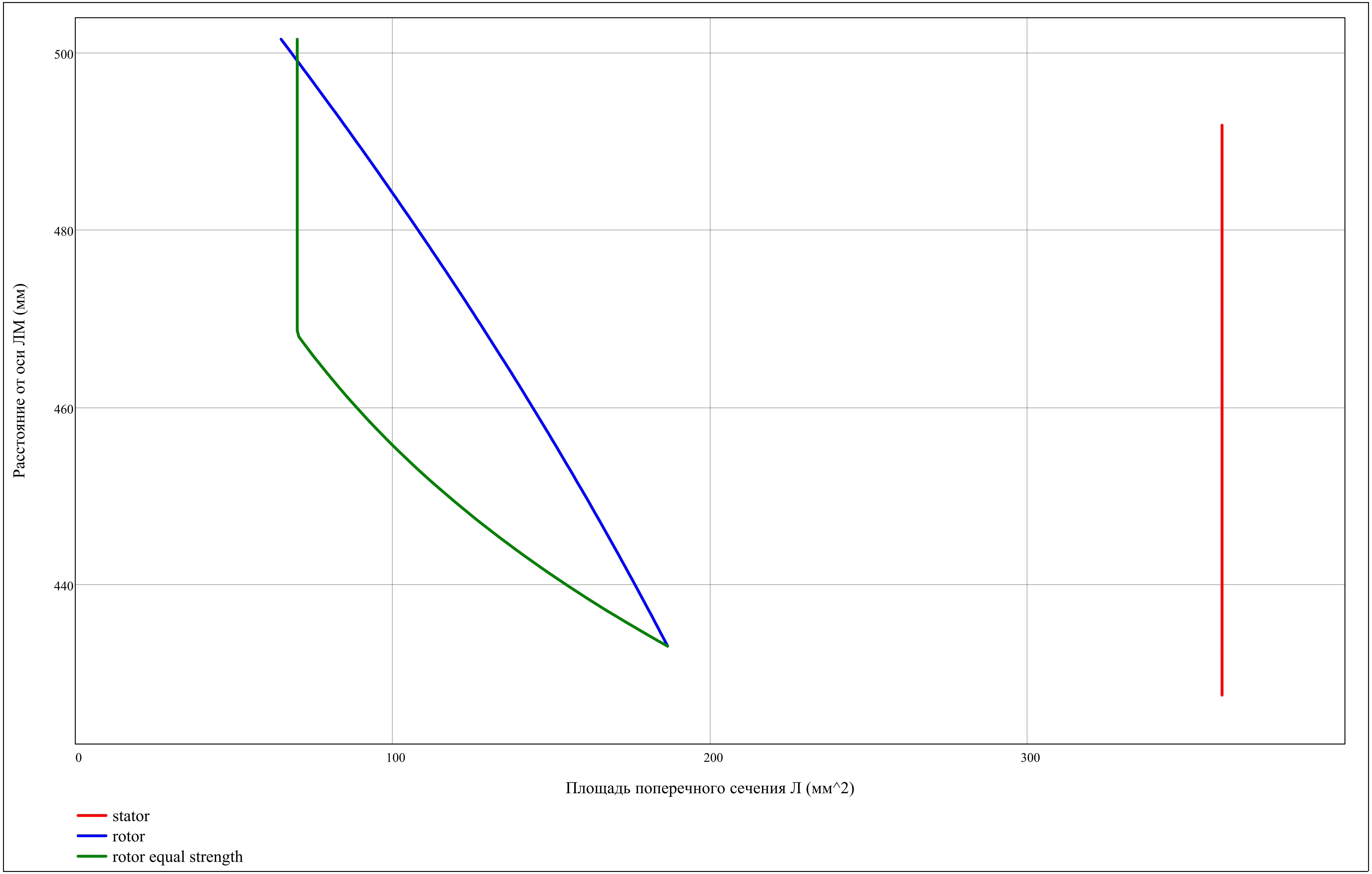
Дискретизация по высоте Л:

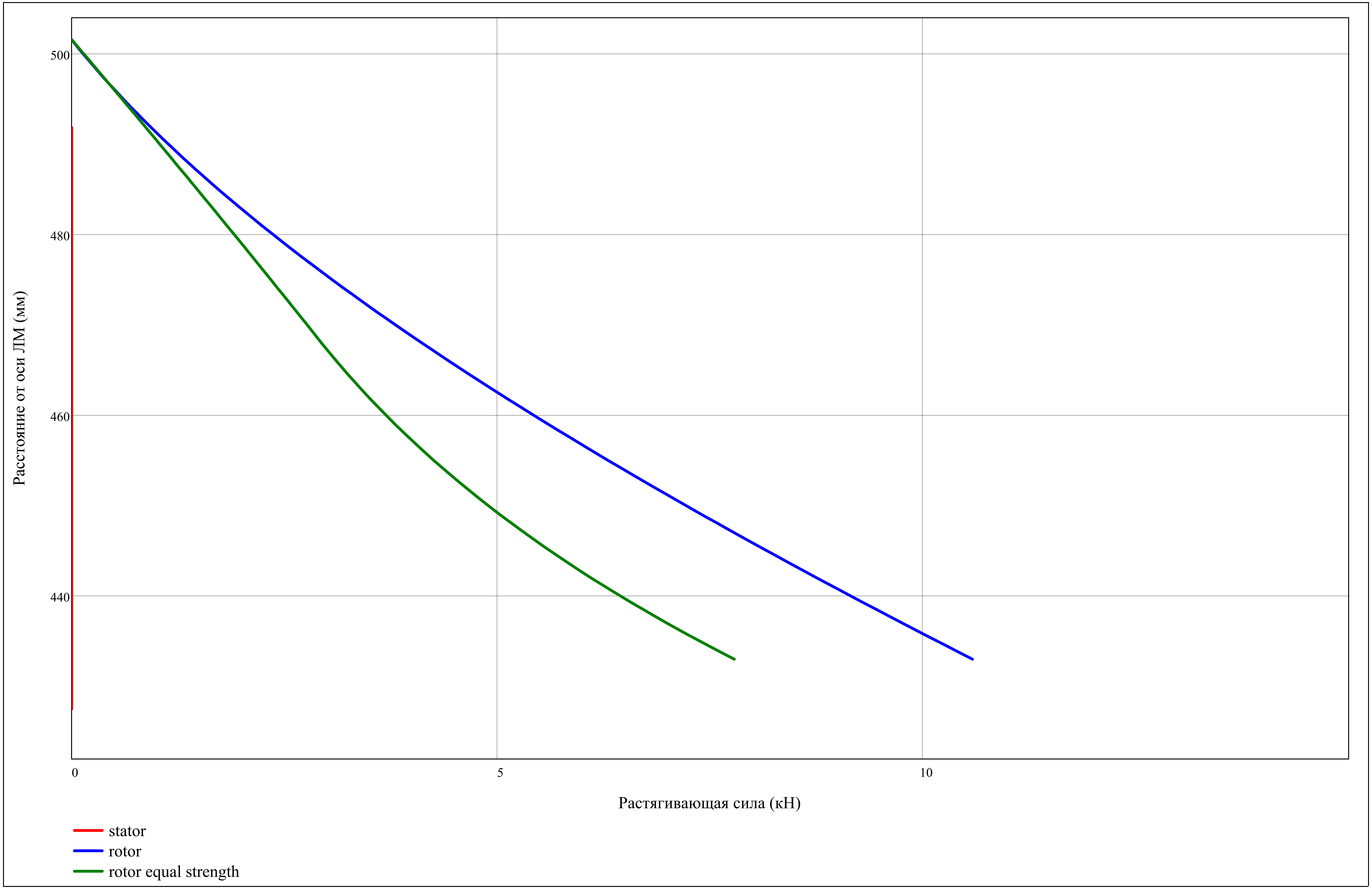
$$z = \min(Rj), \min(Rj) + \frac{\max(Rj) - \min(Rj)}{100} .. \max(Rj)$$

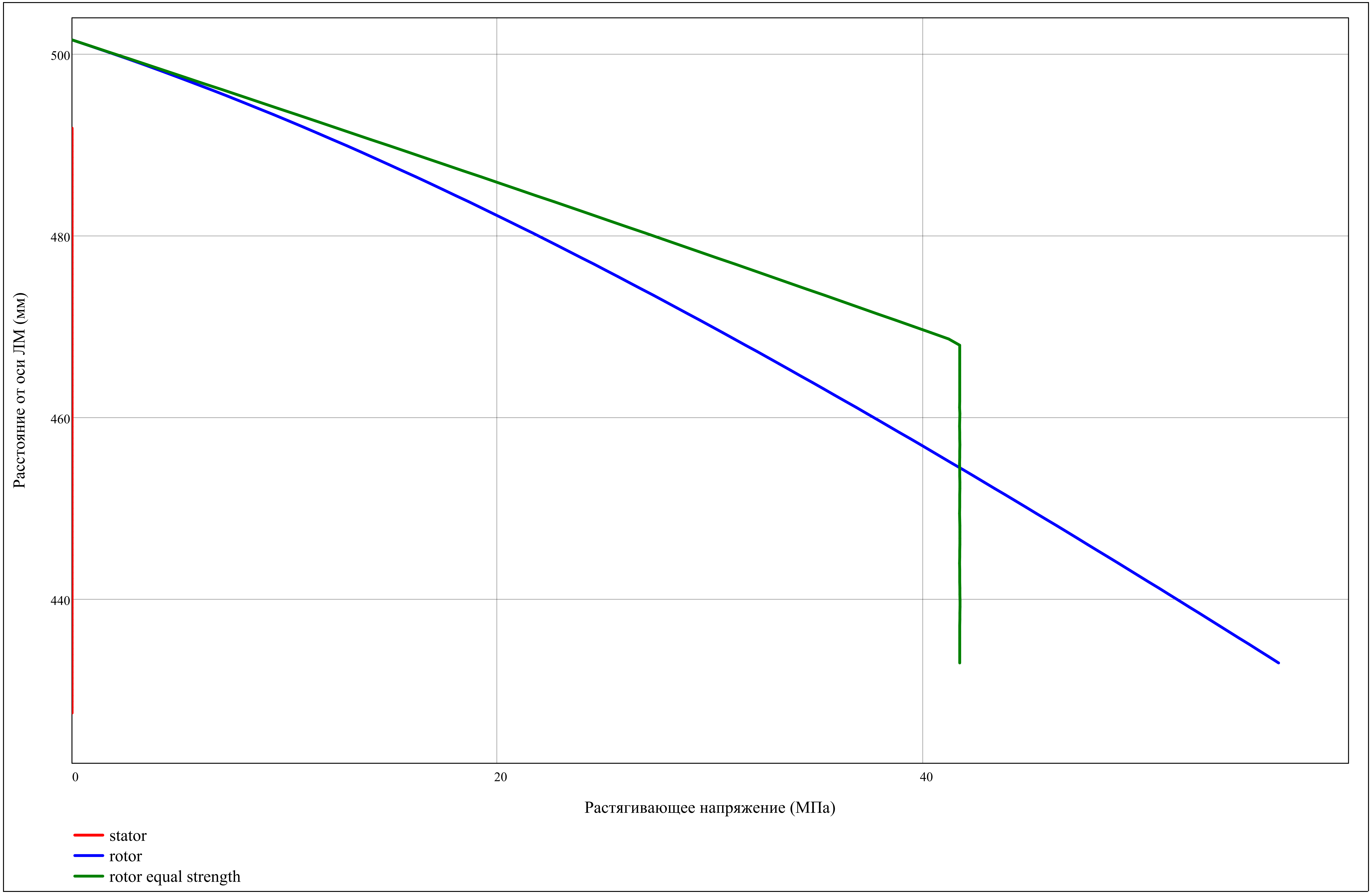
$$z_{rotor} = \left| \begin{array}{l} \text{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right), \text{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right) + \dfrac{\text{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) - \text{mean}\left(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}\right)}{100} .. \text{mean}\left(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}\right) \quad \text{if } type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

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

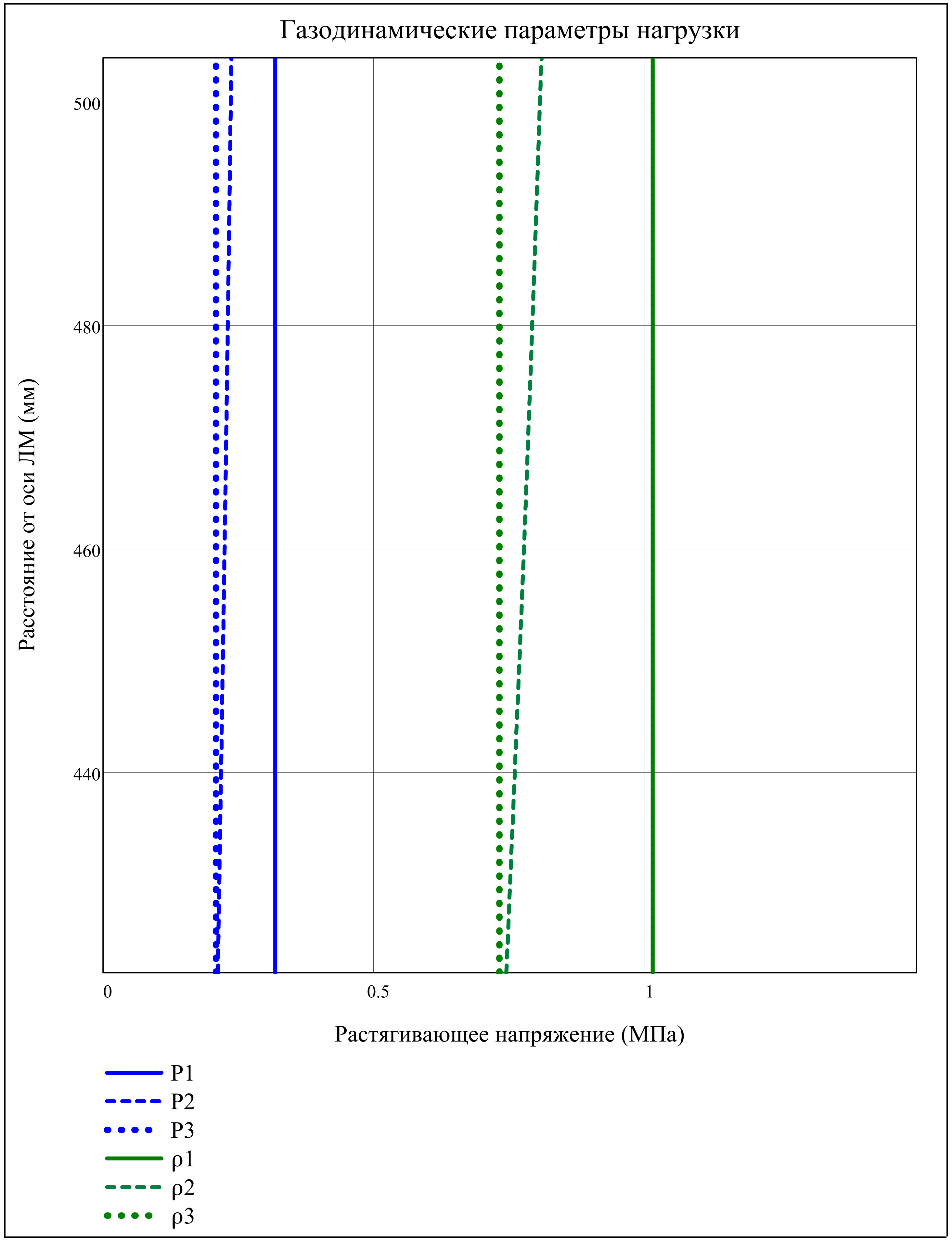
Результаты расчета на прочность Л

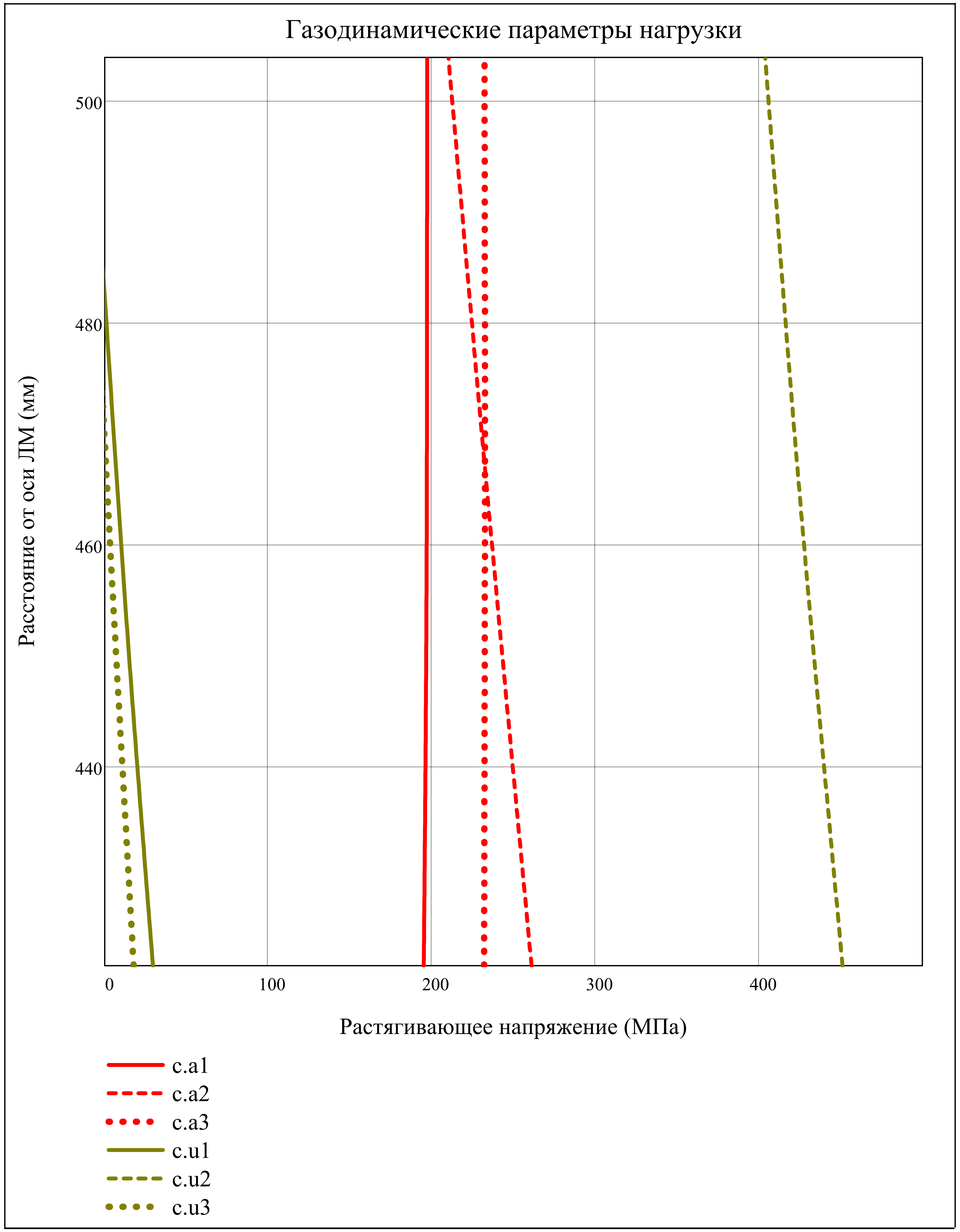

500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
100
200
300
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength

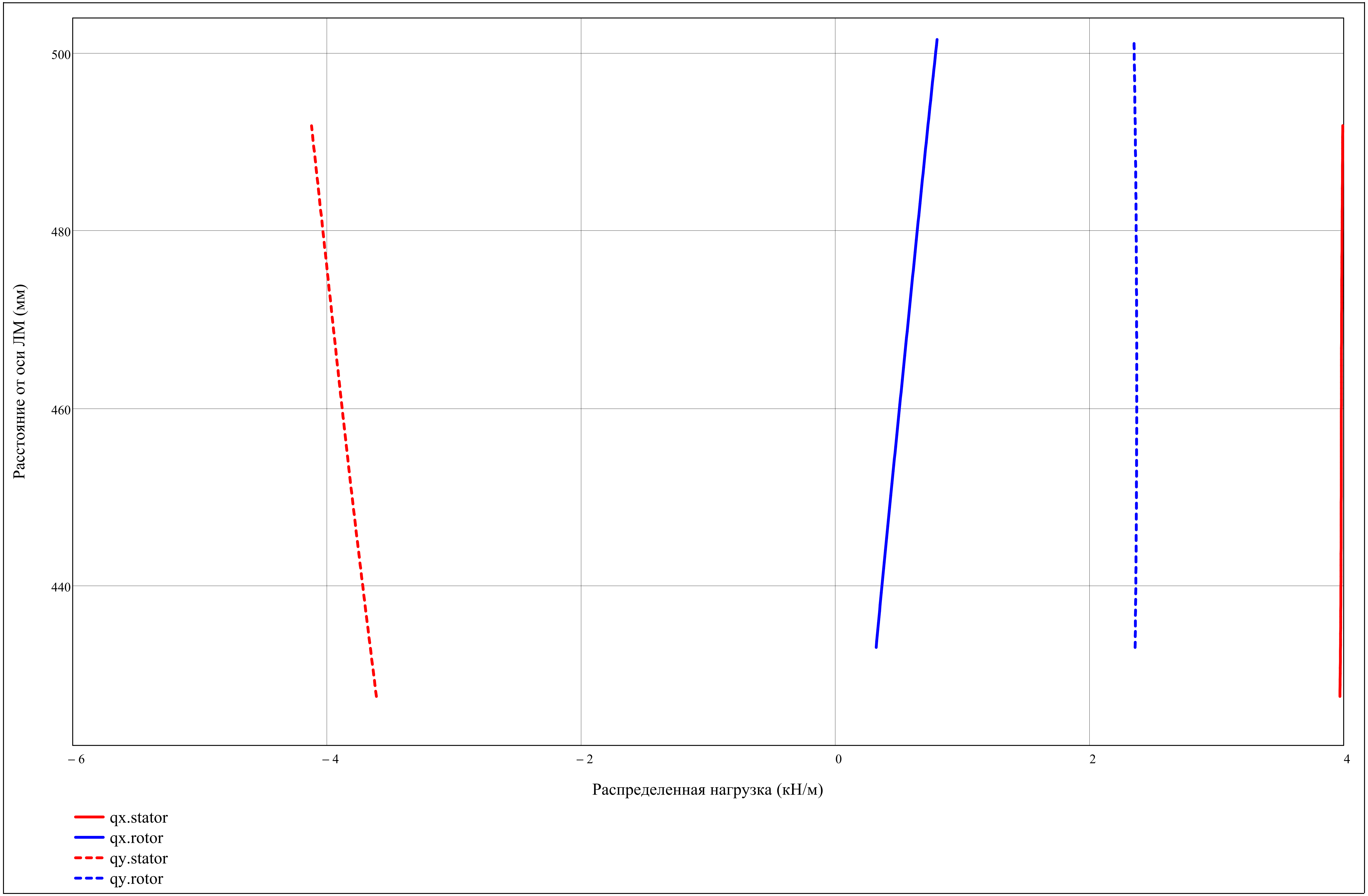

500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
5
10
Растягивающая сила (кН)
stator
rotor
rotor equal strength

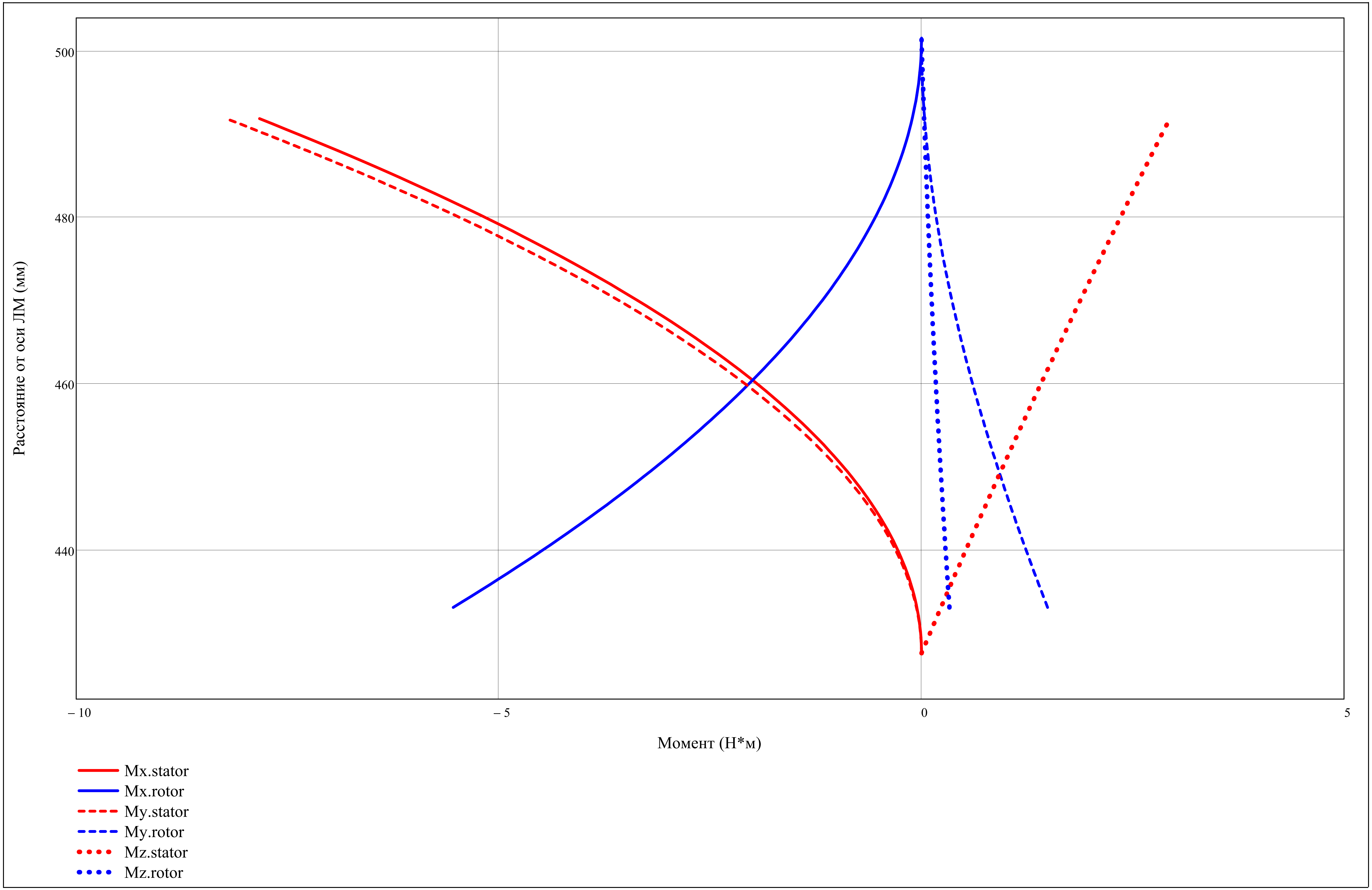


Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
0
20
40
Растягивающее напряжение (МПа)
stator
rotor
rotor equal strength

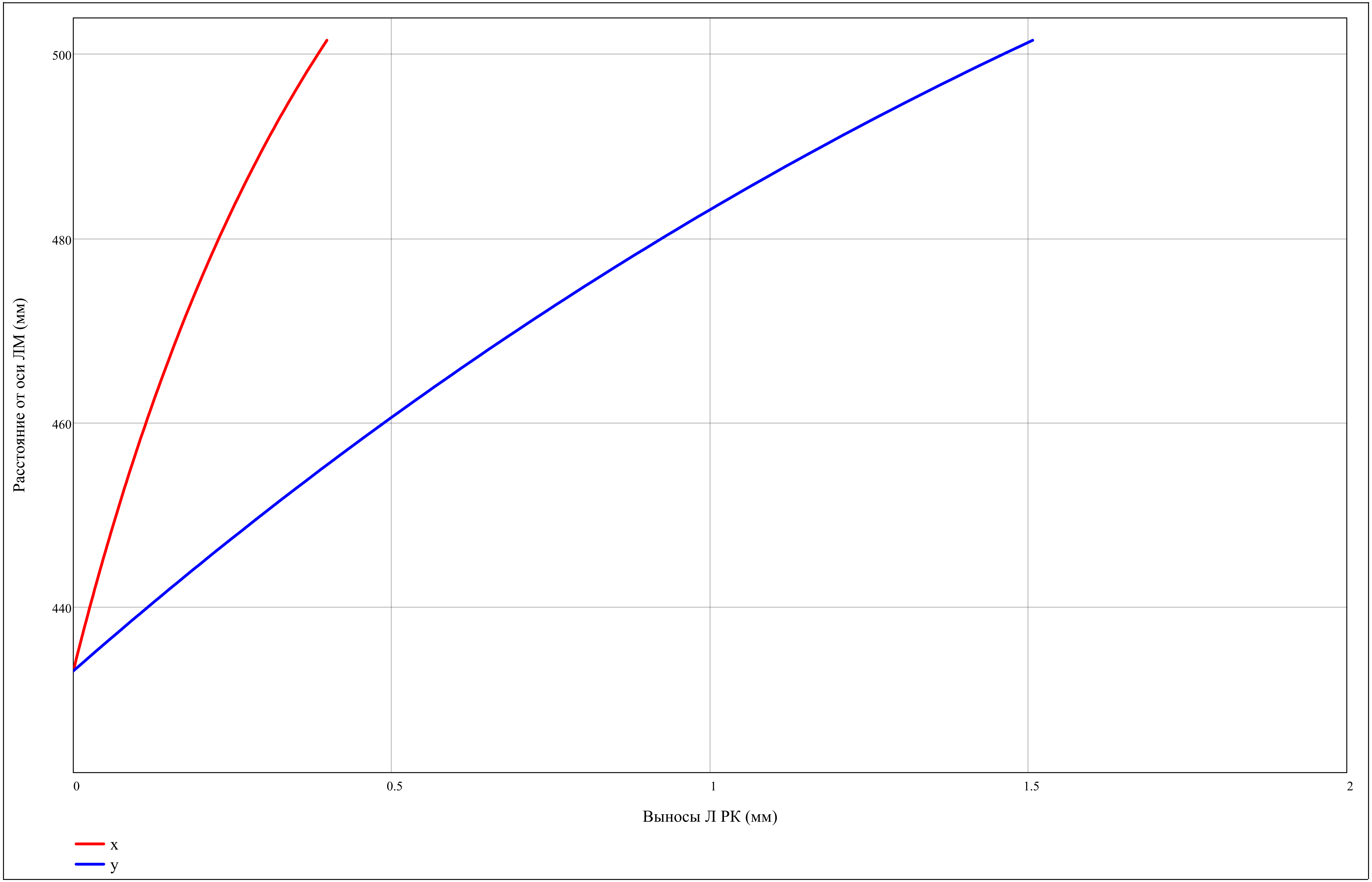

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
0
0.5
1
Растягивающее напряжение (МПа)
P1
P2
P3
ρ1
ρ2
ρ3

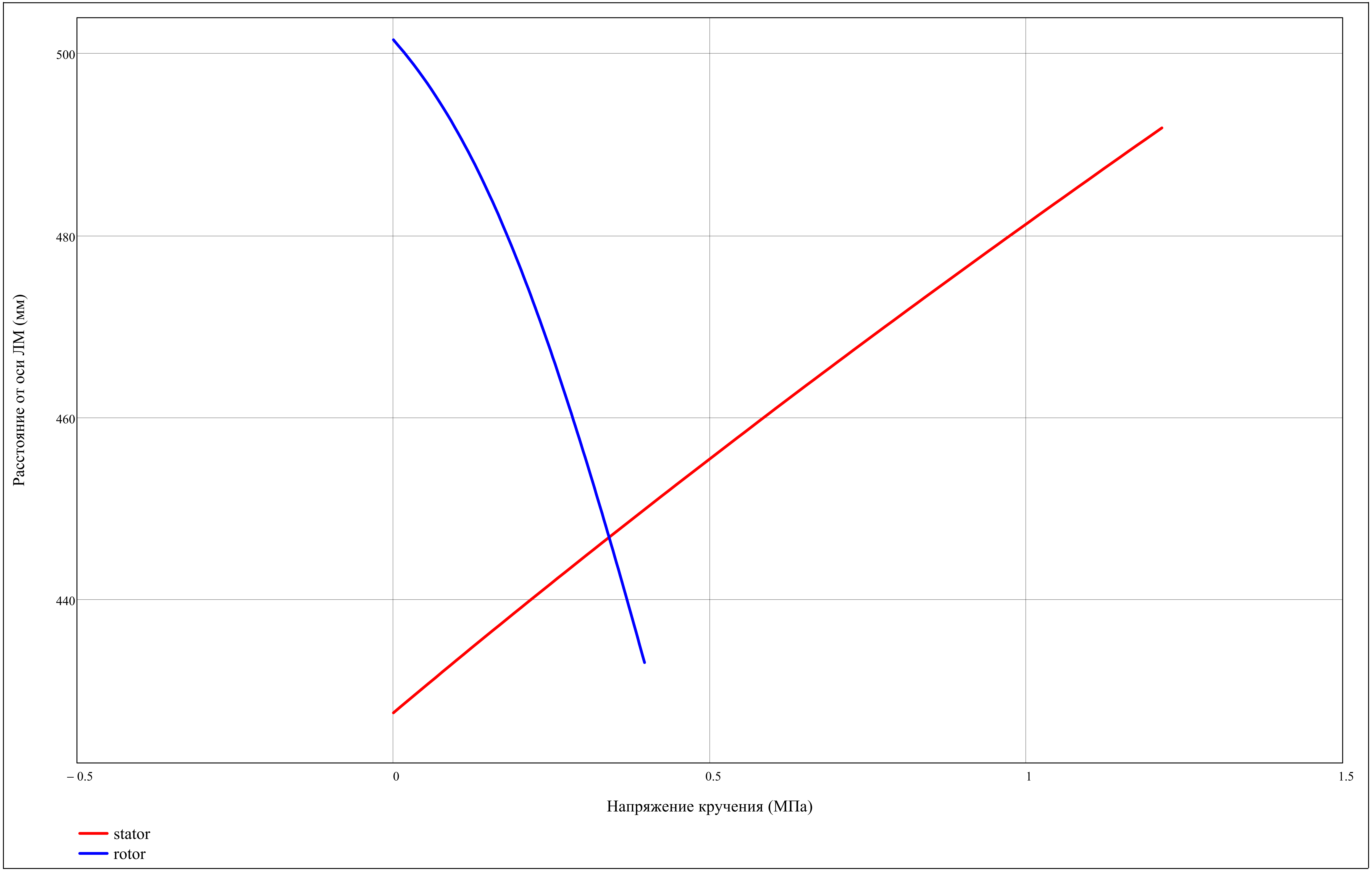

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
0
100
200
300
400
Растягивающее напряжение (МПа)
c.a1
c.a2
c.a3
c.u1
c.u2
c.u3


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

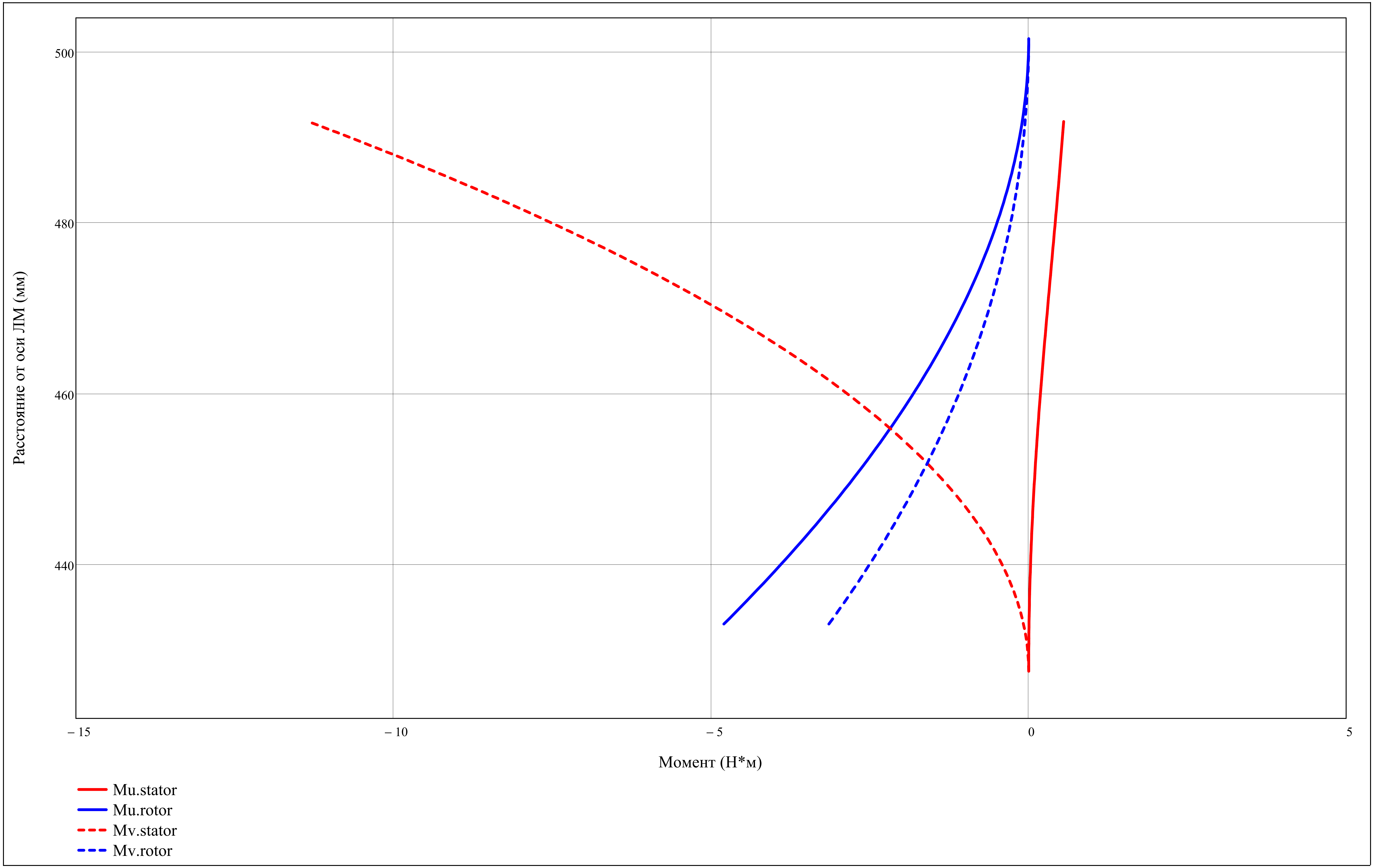


500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 10
– 5
0
5
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor

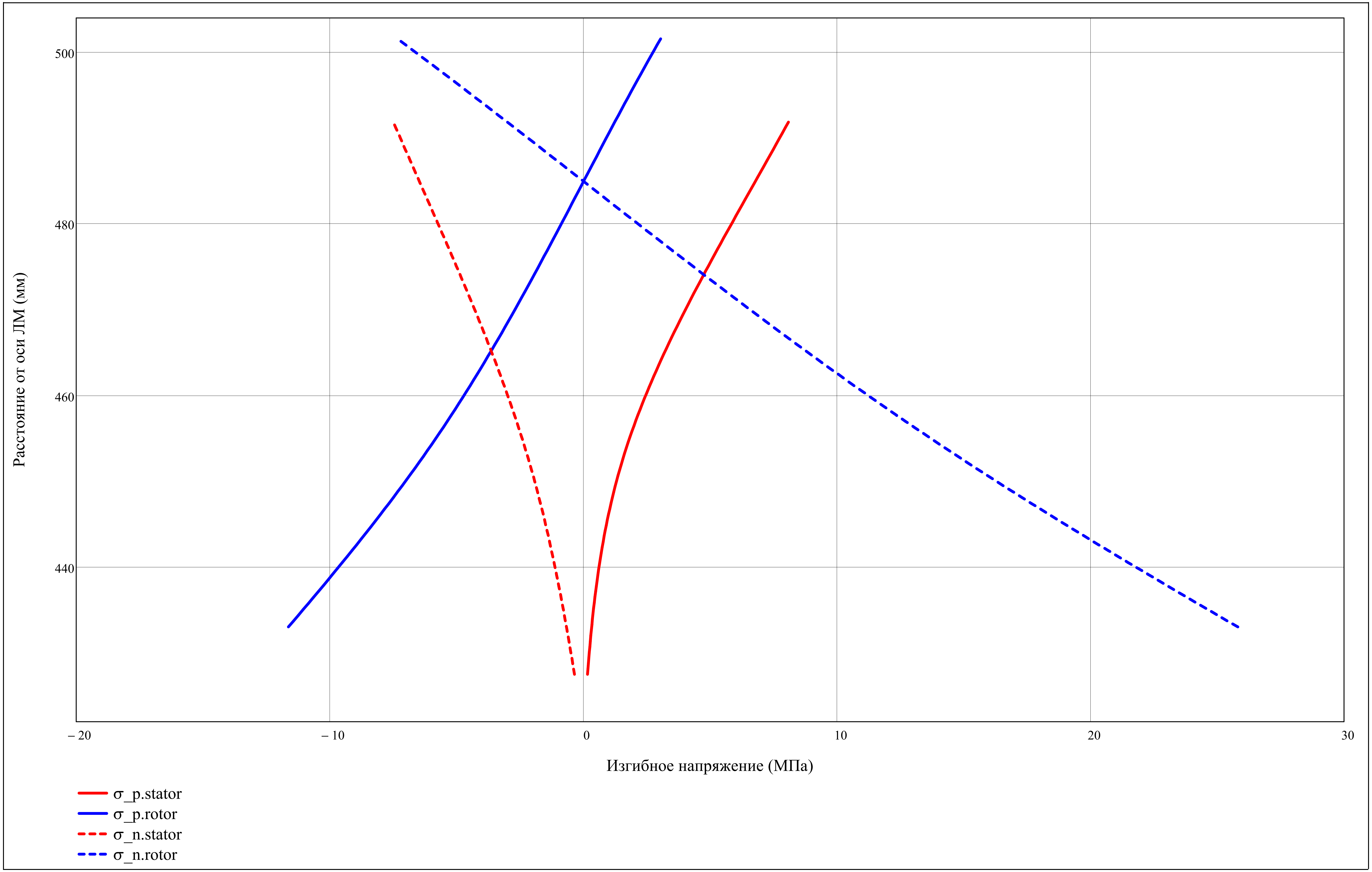

500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
0.5
1
1.5
2
Выносы Л РК (мм)
x
y

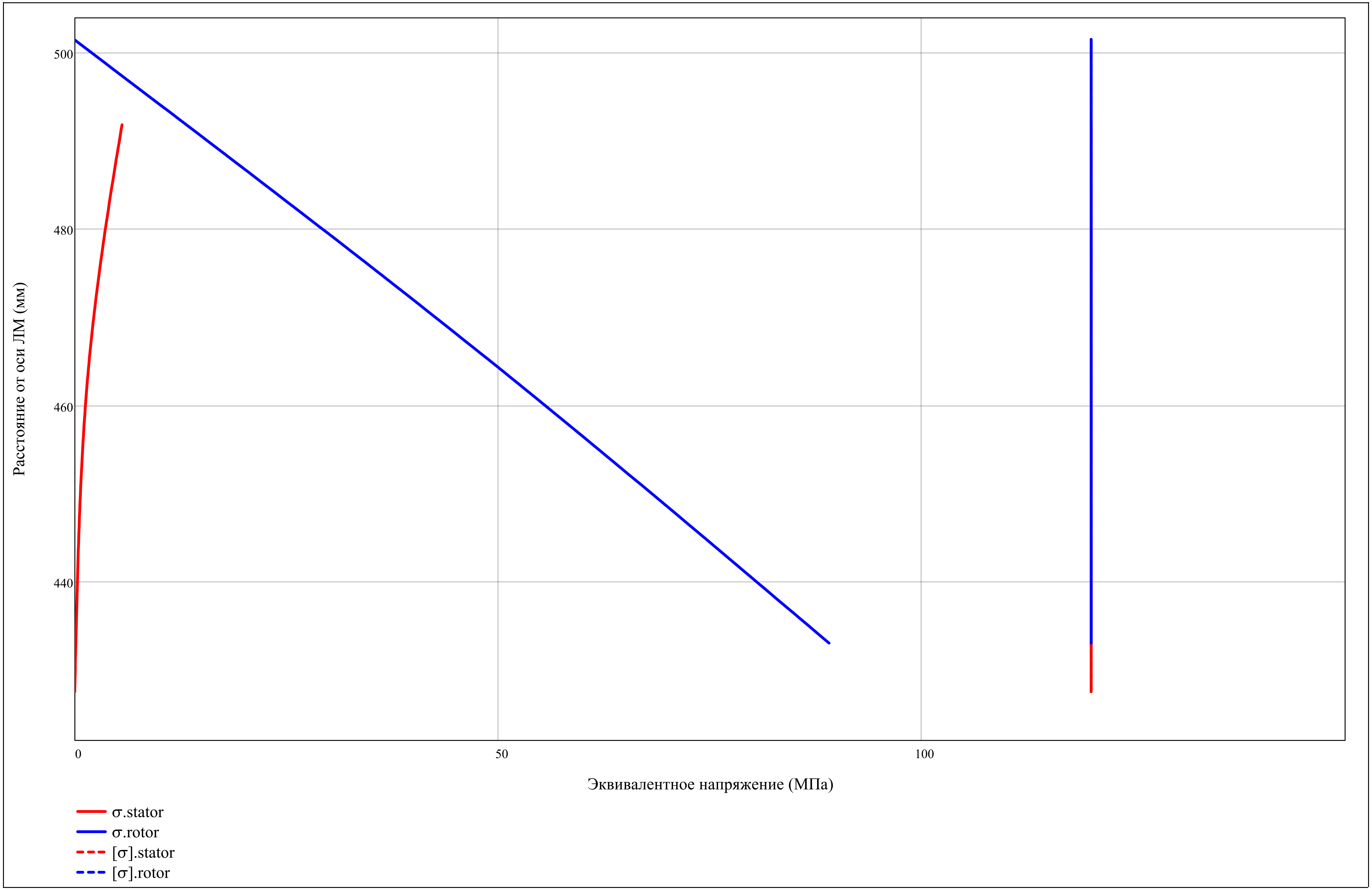


500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 0.5
0
0.5
1
1.5
Напряжение кручения (МПа)
stator
rotor



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


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



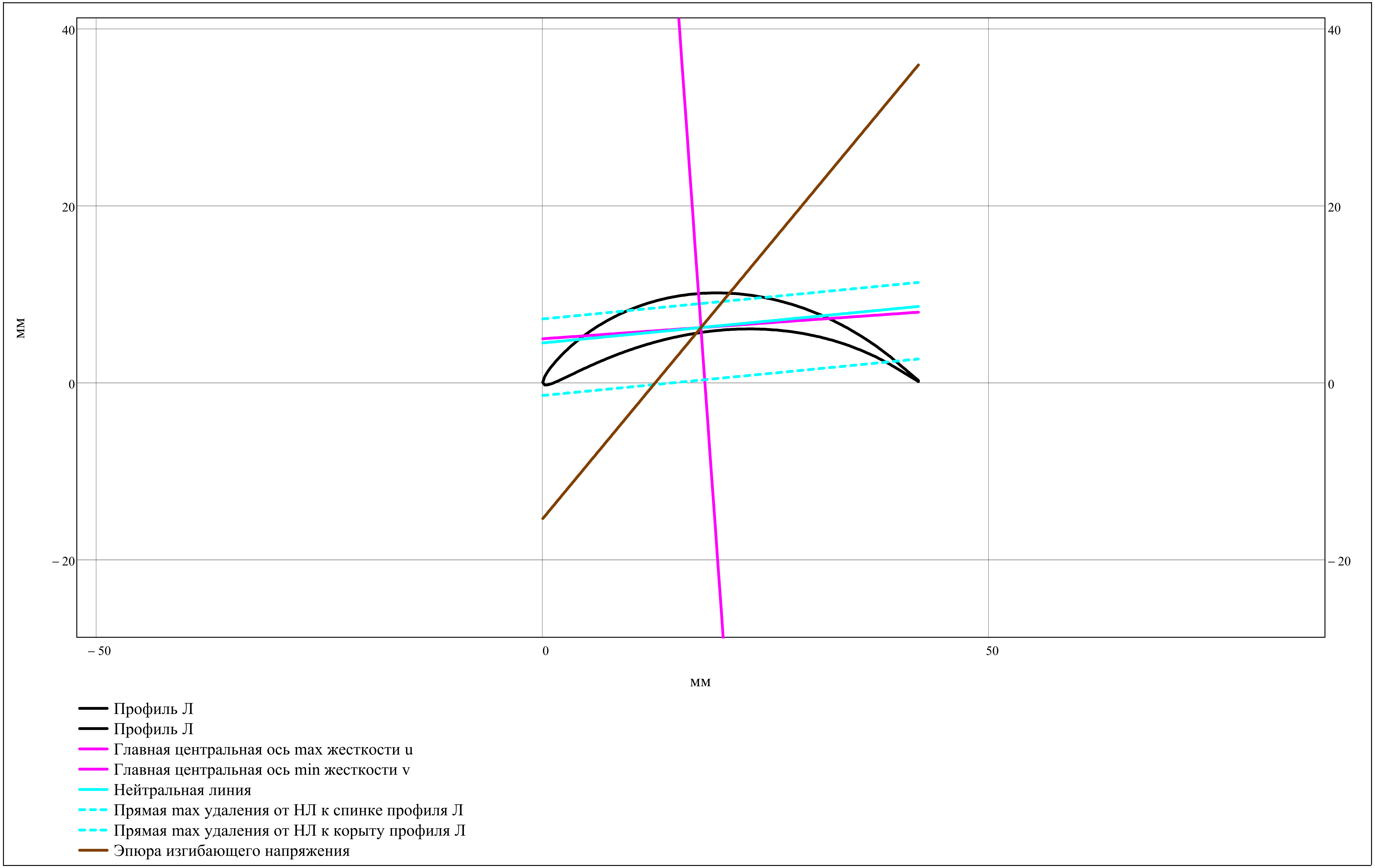
500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
50
100
Эквивалентное напряжение (МПа)
σ.stator
σ.rotor
[σ].stator
[σ].rotor

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

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 2.713 \\ 2 & -5.938 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} x0_{rotor_{j,r}} \\ y0_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} x0_{stator_{j,r}} \\ y0_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 17.739 \\ 2 & 6.205 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$chord = \left| \begin{array}{ll} chord_{rotor_{j,r}} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ chord_{stator_{j,r}} & \text{if } blade = \text{"stator"} \end{array} \right. = 42.1 \cdot 10^{-3}$$



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):

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

	1	2
1	-0.36	2.71
2	16.66	-5.94
3	19.24	8.59
4	-20.20	-14.60

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2
1	-6.2	1.6
2	14.6	-2.2

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	1.8
2	47.7

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	67.704
2	2.517

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

$\rho\_disk^T =$

	1	2	3	4
1	8320	8320	8320	8320

$\sigma\_disk\_long^T =$

	1	2	3	4
1	680	680	680	680

$\cdot 10^6$

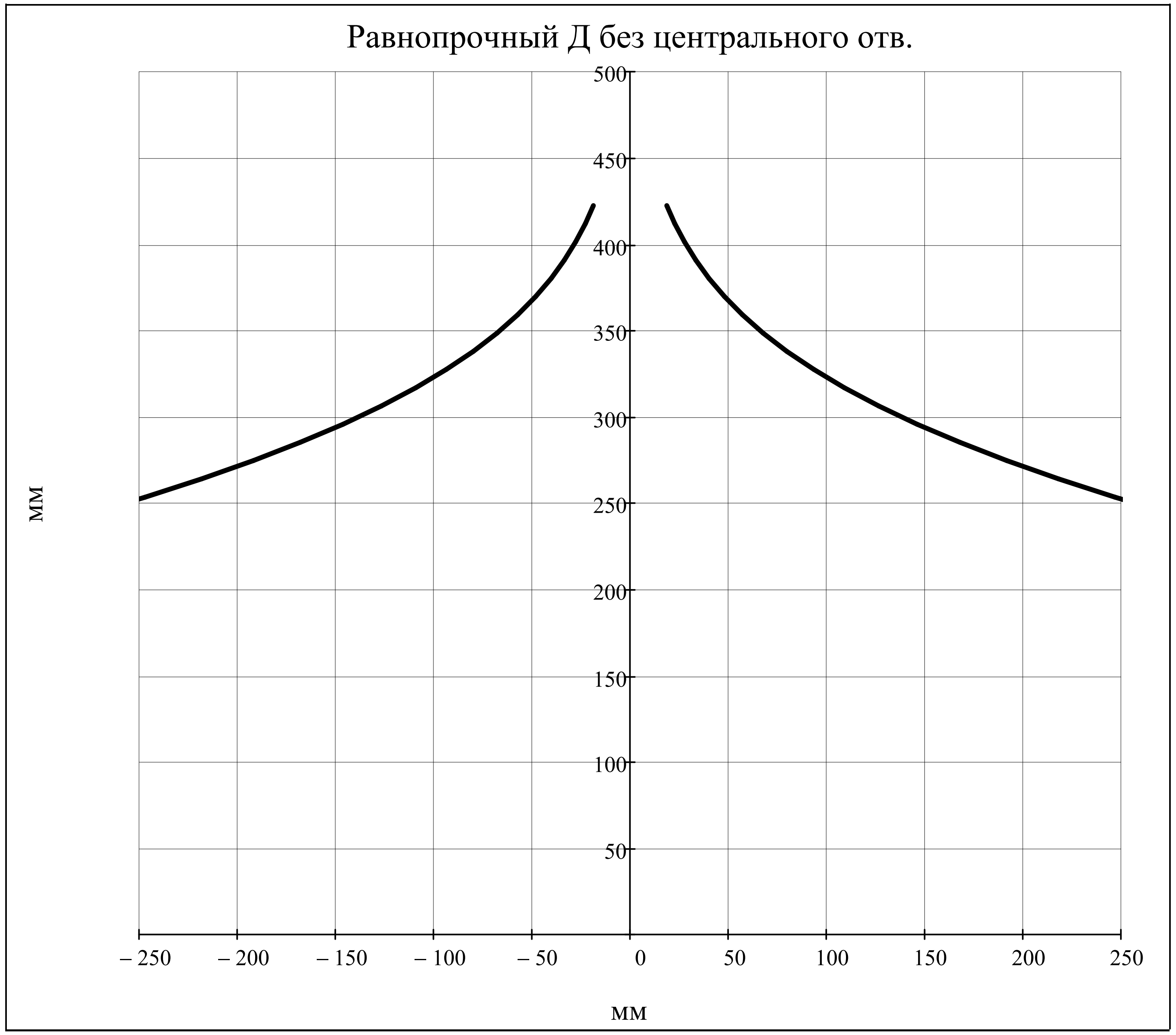
Выбор материала Д

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

Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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



Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

Рассматриваемая ступень:

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

Приведенная скорость по профилю Л

Общие параметры охлаждения

Конвективное охлаждение

Результаты конвективного охлаждения

Конвективно-пленочное охлаждение

Результат конвективно-пленочного охлаждения

$D^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

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						

$\cdot 10^{-3}$

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

$\bar{d}^T =$

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

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

	1	2	3
1	0	0	1

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

$h^T =$

	1	2	3
1	28.50	28.50	44.88

$\cdot 10^{-3}$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 197.2 \\ 511.5 \\ 232.4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 195.0 \\ 253.8 \\ 232.0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 282.8 \\ 325.5 \\ 324.6 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 81.44 \\ 29.75 \\ 86.72 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 234.2 \\ 240.3 \\ 240.3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 43.59 \\ 128.76 \\ 45.62 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 51.69 \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 83.14 \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 197.0 \\ 483.7 \\ 232.4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 196.6 \\ 232.9 \\ 232.4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 309.0 \\ 285.6 \\ 348.6 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 86.19 \\ 28.78 \\ 89.96 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 251.6 \\ 258.7 \\ 260.0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 39.50 \\ 125.36 \\ 41.81 \end{pmatrix} \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 57.4 \cdot ^\circ$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 83.56 \cdot ^\circ$$

$$\begin{pmatrix} c_{st(j,1),r} \\ c_{st(j,2),r} \\ c_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 197.0 \\ 458.7 \\ 232.4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{a_{st(j,1),r}} \\ c_{a_{st(j,2),r}} \\ c_{a_{st(j,3),r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 197.0 \\ 212.9 \\ 232.1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} w_{st(j,1),r} \\ w_{st(j,2),r} \\ w_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 334.2 \\ 249.1 \\ 371.9 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{st(j,1),r} \\ \alpha_{st(j,2),r} \\ \alpha_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.31 \\ 27.66 \\ 92.70 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\begin{pmatrix} u_{st(j,1),r} \\ u_{st(j,2),r} \\ u_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 268.9 \\ 277.0 \\ 279.7 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta_{st(j,1),r} \\ \beta_{st(j,2),r} \\ \beta_{st(j,3),r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 36.12 \\ 121.27 \\ 38.62 \end{pmatrix} \cdot ^{\circ}$$

$$\varepsilon_{stator_{j,r}} = 62.65 \cdot ^{\circ}$$

$$\varepsilon_{rotor_{j,r}} = 82.65 \cdot ^{\circ}$$

=