Подключение библиотек

Основные уравнения, алгоритмы, зависимости и ф-и

Параметры расчета

Исходные данные

Коэф. запаса: $safety = 1.3$

Горючее: $Fuel = \text{"Керосин"}$

$turbine = \text{"ТНД"}$

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

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

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

	1
1	35.43
2	0.04
3	0.81

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Абс. скорость перед Т (м/с):

Абс. скорость после Т (м/с):

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

	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): $H_T := \dfrac{L^*_T + 0.5 c_т^2}{\eta_л} = 520.3 \cdot 10^3$

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

=

	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): $Cp_г = Cp_{газ}\left(P_г, T_г, \alpha_{ox}, Fuel\right) = 1256$

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

$$\text{iteration} = 0$$

$$k_{\text{Т}} = k_{\text{Г}}$$

$$\text{while } 1 > 0$$

$$\quad \text{iteration} = \text{iteration} + 1$$

$$\quad k_{\text{ср}} = \text{mean}\left(k_{\text{Г}}, k_{\text{Т}}\right)$$

$$\quad Cp = \frac{k_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}} - 1} \cdot R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}}, \text{Fuel}\right)$$

$$\quad P_{\text{Т}} = P^*{}_{\text{Г}} \cdot \left(1 - \frac{H_{\text{Т}}}{Cp \cdot T^*{}_{\text{Г}}}\right)^{\frac{k_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}} - 1}}$$

$$\quad T_{\text{Т}} = T^*{}_{\text{Г}} - \frac{H_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{л}}}{Cp}$$

$$\quad k'_{\text{Т}} = k_{\text{ад}}\left(Cp_{\text{газ}}\left(P_{\text{Т}}, T_{\text{Т}}, \alpha_{\text{ох}}, \text{Fuel}\right), R_{\text{газ}}\left(\alpha_{\text{ох}}, \text{Fuel}\right)\right)$$

$$\quad \text{if } \left|\text{eps}\left(\text{"rel"}, k_{\text{Т}}, k'_{\text{Т}}\right)\right| \le \text{epsilon}$$

$$\quad\quad k_{\text{Т}} = k'_{\text{Т}}$$

$$\quad\quad \text{break}$$

$$\quad k_{\text{Т}} = k'_{\text{Т}}$$

$$\left(\text{iteration} \;\; k_{\text{Т}} \;\; P_{\text{Т}} \;\; T_{\text{Т}}\right)^{T}$$

=

	1
1	2
2	1.32
3	191463.061
4	994.672

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{pmatrix} v_Г \\ v_T \end{pmatrix} = R_{газ}(\alpha_{ox}, Fuel) \cdot \begin{pmatrix} \frac{T_Г}{P_Г} \\ \frac{T_T}{P_T} \end{pmatrix} =$$

	1
1	0.440
2	1.499

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

$$\begin{pmatrix} F_Г \\ F_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{G_Г \cdot v_Г}{c_Г} \\ \frac{G_T \cdot v_T}{c_T} \end{pmatrix} =$$

	1
1	86421
2	208684

$\cdot 10^{-6}$

Основне размеры Т

$y_0 = 0.55$

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

Определение количества ступеней Т

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

	1
1	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): $\sqrt{\dfrac{\sigma\_blade\_long_Z}{safety \cdot k_n \cdot F_Г}} = 12533$

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

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

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

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

Ср. диаметр перед Т (м):
Ср. диаметр после Т (м):
$\begin{pmatrix} D_{Г.ср} \\ D_{Т.ср} \end{pmatrix} = \dfrac{2}{\omega} \cdot \begin{pmatrix} u_Г \\ u_Т \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 936.9 \\ 936.9 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}$

Длина Л первой ступени Т (м):
Длина Л последней ступени Т (м):
$\begin{pmatrix} l_Г \\ l_Т \end{pmatrix} = \dfrac{1}{\pi} \cdot \begin{pmatrix} \dfrac{F_Г}{D_{Г.ср}} \\ \dfrac{F_Т}{D_{Т.ср}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 29.36 \\ 70.90 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}$

$\dfrac{l_Г}{D_{Г.ср}} = \dfrac{1}{31}$ $\dfrac{l_Т}{D_{Т.ср}} = \dfrac{1}{13}$

Диаметр периферии после Т (м):
Диаметр корня после Т (м):
$\begin{pmatrix} D_{Т.пер} \\ D_{Т.кор} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{Т.ср} + l_Т \\ D_{Т.ср} - l_Т \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1007.8 \\ 866.0 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}$

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 предыдушего диаметра периферии")

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

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

$D^T =$ ($\cdot 10^{-3}$)

	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

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

$R^T =$ ($\cdot 10^{-3}$)

	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

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

$\bar{d}^T =$

	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

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

$h^T =$ ($\cdot 10^{-3}$)

	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

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

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

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

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

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

NaN otherwise

D

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

$u^T =$

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

$F^T =$

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

$\cdot 10^{-6}$

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

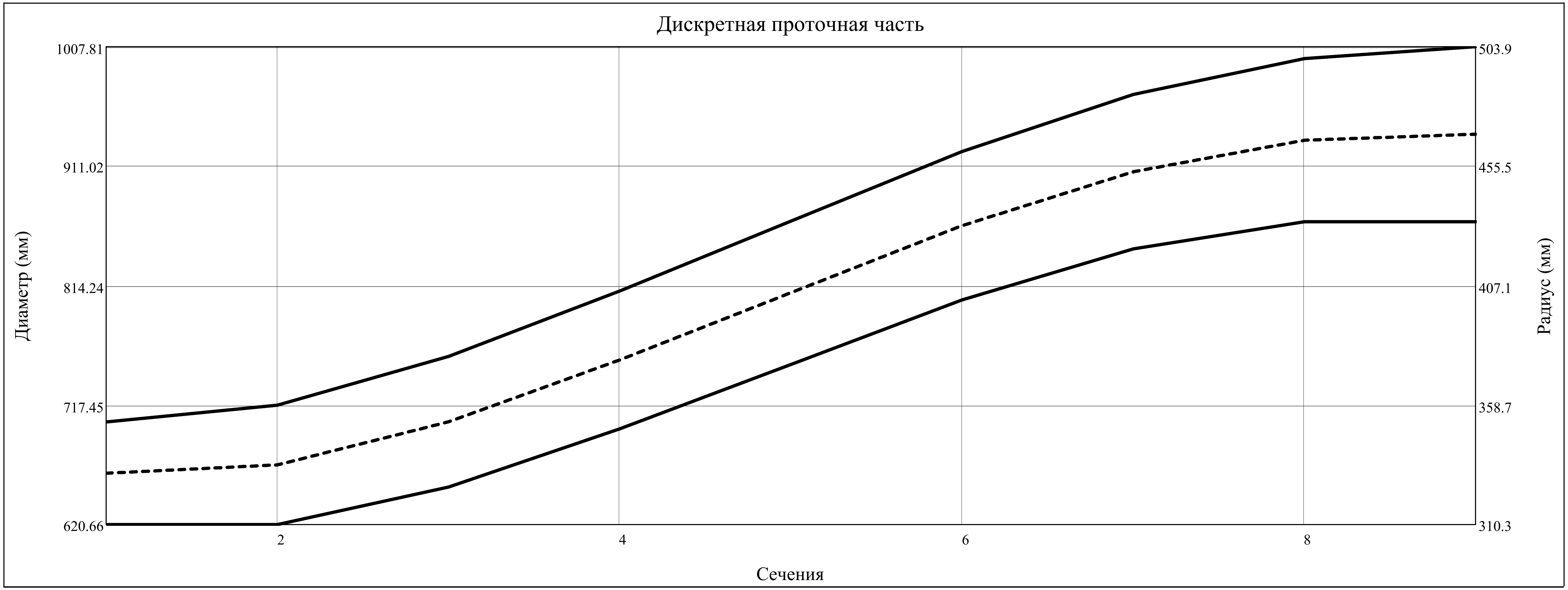
$\overline{d}^T =$

	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	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

$\cdot 10^{-3}$



$h^T =$

	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]:

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

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

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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\Delta_r{}^{T} =$

	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

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

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

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

$\cdot {}^\circ$

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 20 \cdot {}^\circ =$

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

$\gamma_{ПЧ}^{T} \le 25 \cdot {}^\circ =$

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

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -12 \cdot {}^\circ =$

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

$\gamma_{ПЧкор}^{T} > -15 \cdot {}^\circ =$

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

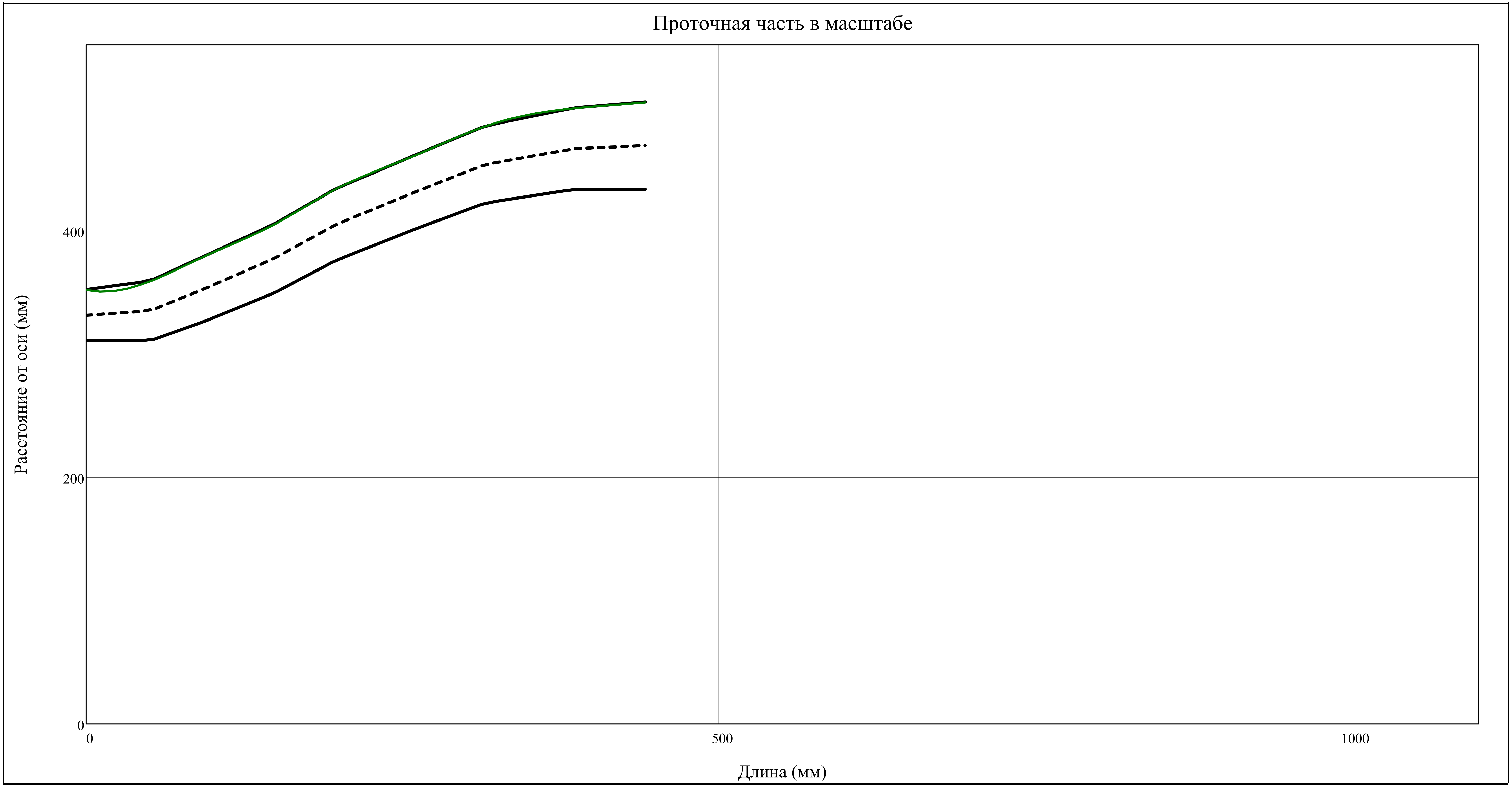
$$
\begin{pmatrix} x_{ПЧ} \\ y_{ПЧпер} \\ y_{ПЧср} \\ y_{ПЧкор} \\ y_{Лпер} \end{pmatrix} =
\left|
\begin{array}{l}
c \leftarrow 1 \\
x_{ПЧ_c} \leftarrow 0 \\
y_{ПЧпер_c} \leftarrow D_{st(c,1),N_r} \\
y_{Лпер_c} \leftarrow y_{ПЧпер_c} - \Delta_{r_c} \\
y_{ПЧср_c} \leftarrow D_{st(c,1),av(N_r)} \\
y_{ПЧкор_c}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

$$
Length := \sum_{i=1}^{Z} B_{CA_i} + \sum_{i=1}^{Z} \Delta_{a_i} + \sum_{i=1}^{Z} B_{PK_i} = 393.4\cdot 10^{-3}
$$

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

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

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



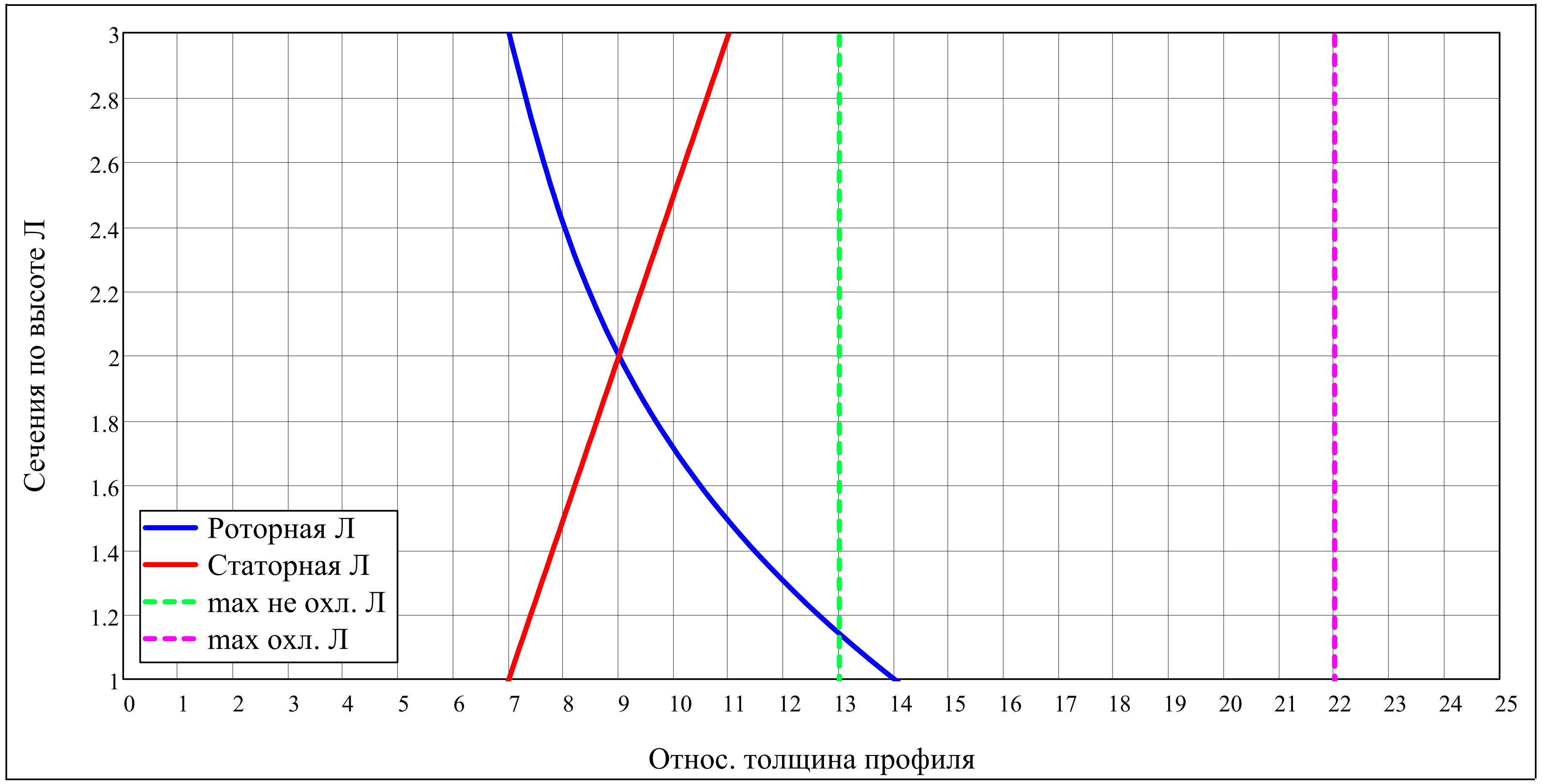
Определение проточной части ОТ

Относ. толщины и радиусы профилей

Относ. толщины Л РК и СА:

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

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



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

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

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

$\cdot\%$

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

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

$\cdot\%$

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

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

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

$\cdot\%$

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

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

$\cdot\%$

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

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

$\cdot\%$

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

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

$\cdot\%$

Относ. толщины и радиусы профилей

Вывод результатов поступенчатого расчета продольной геометрии ОТ в EXCEL:

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

Поступенчатый расчет ОТ

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

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

if $i = 1$

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

$$k_{st(i,1),r} = k_{г}$$

$$P^*_{st(i,1),r} = P^*_{г}$$

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

$$P_{st(i,1),r} = P_{г}$$

$$T^*_{st(i,1),r} = T^*_{г}$$

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

$$T_{st(i,1),r} = T_{г}$$

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

$$G_{st(i,1)} = G_{г}$$

$$c_{st(i,1),r} = c_{г}$$

$$\alpha_{st(i,1),r} = \alpha_{г}$$

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

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

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

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

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

$$\text{iteration}_{ст_i} = 0$$

while $1 > 0$

$$\text{iteration}_{ст_i} = \text{iteration}_{ст_i} + 1$$

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

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

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

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

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

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

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

$iteration_{CA_i} = 0$

while $1 > 0$

$iteration_{CA_i} = iteration_{CA_i} + 1$

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

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

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

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

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

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

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

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

while $1 > 0$

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

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

k_{CA_i}

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

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

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

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

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

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

break

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\left|\ \mathrm{ceil}\left(\frac{\pi\cdot \mathrm{mean}\left(D_{st(i,1),r},D_{st(i,2),r}\right)}{\overline{t}_{оптCA_i}\cdot chord_{stator_{i,r}}}\right)+1 \quad \text{otherwise}\right.$$

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

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

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

$$\xi_{крCA_i} = \xi_{кромка}\left(\overline{r\_outlet}_{stator_{i,r}}\cdot chord_{stator_{i,r}},t_{stator_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r}\right)$$

$$\xi_{ReCA_i} = \xi_{Re}\left(\frac{c_{st(i,2),r}\cdot chord_{stator_{i,r}}}{\mu_{газ}\left(T_{st(i,2),r},\alpha_{ox_{st(i,2)}}\right)\cdot v_{st(i,2),r}}\right)$$

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

$$\xi_{прCA_i} = \xi_{трCA_i}+\xi_{крCA_i}+\xi_{ReCA_i}+\xi_{\lambda CA_i}$$

$$\xi_{втCA_i} = \xi_{вторичные}\left(\xi_{трCA_i},t_{stator_{i,r}},\alpha_{st(i,2),r},h_{st(i,2)}\right)$$

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

$$\xi_{смCA_i} = \xi_{смешение}\left(\text{"CA"},g_{охлCA_i}\right)$$

$$\text{if } \left|\mathrm{eps}\left(\text{"rel"},\sqrt{1-\xi_{смCA_i}-\xi_{тдCA_i}-\xi_{втCA_i}-\xi_{прCA_i}},\overline{\upsilon}_{stator_i}\right)\right| \le \text{epsilon}$$

$$\overline{\upsilon}_{stator_i} = \sqrt{1-\xi_{смCA_i}-\xi_{тдCA_i}-\xi_{втCA_i}-\xi_{прCA_i}}$$

break

$$\overline{\upsilon}_{stator_i} = \sqrt{1-\xi_{смCA_i}-\xi_{тдCA_i}-\xi_{втCA_i}-\xi_{прCA_i}}$$

$$H_{rotor_i} = H_{ст_i}\cdot R_{L_{i,av(N_r)}}\cdot\frac{T_{st(i,2),r}}{T_{ад_{st(i,2),r}}}$$

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

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

$$iteration_{РК_i} = 0$$

$\text{while } 1 > 0$

$$iteration_{РК_i} = iteration_{РК_i}+1$$

$$\mathrm{trace}\left(\mathrm{concat}\left(\text{"   iteration.РК = "},\mathrm{num2str}\left(iteration_{РК_i}\right)\right)\right)$$

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

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

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

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

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

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

while $1 > 0$

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

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

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

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

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

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

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

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

break

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $r \in 1 .. N_r$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $i \in 1..Z$

for $j \in 1..3$

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

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

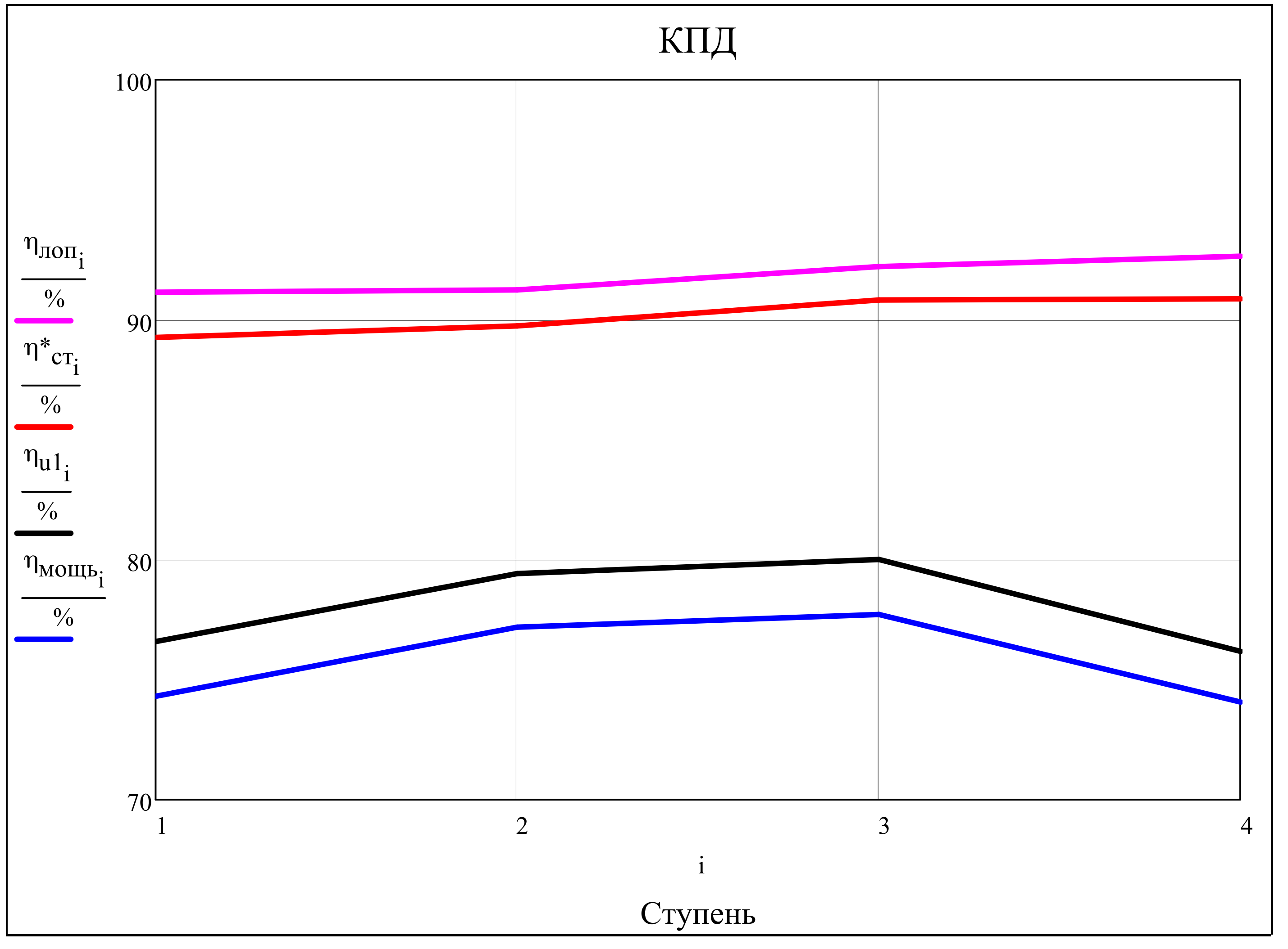
$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{stator_{i,av(N_r)}} \\ \varepsilon_{rotor_{i,av(N_r)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{st(i,2),av(N_r)} - \alpha_{st(i,1),av(N_r)} \\ \beta_{st(i,3),av(N_r)} - \beta_{st(i,2),av(N_r)} \end{pmatrix}$$

$iteration_{CA}$	$iteration_{PK}$
k	R_L
$H^*_{ст}$	$H_{ст}$
H_{stator}	H_{rotor}
$c_{ад}$	$w_{ад}$
P^*	P
T^*	T
G	v
ρ^*	ρ
α_{ox}	α_{ox}
α	β
ε_{stator}	ε_{rotor}
θ_{CA}	θ_{PK}
$g_{охлCA}$	$g_{охлPK}$
a^*_c	a^*_w
$T_{ад}$	$T_{ад}$
P^*_w	T^*_w
$a_{зв}$	$a_{зв}$
u	u
c	c
c_a	c_u

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

Поступенчатый расчет ОТ

Параметры турбины



$$\eta_{лоп}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 91.14 & 91.24 & 92.21 & 92.64 \end{array} \cdot\%$$

$$\eta^{*}{}_{ст}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 89.26 & 89.74 & 90.83 & 90.86 \end{array} \cdot\%$$

$$\mathrm{stack}\left(\eta_{u1}^{T}, \eta_{u2}^{T}\right) = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 76.58 & 79.42 & 80.00 & 76.17 \\ 2 & 76.26 & 79.19 & 79.84 & 75.97 \end{array} \cdot\%$$

$$\eta_{мощь}^{T} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 74.31 & 77.19 & 77.72 & 74.06 \end{array} \cdot\%$$

$$\eta_{мощь_i} \le \eta_{u1_i} \le \eta^{*}{}_{ст_i} \le \eta_{лоп_i} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Степень понижения полного давления Т:
Степень понижения давления Т:

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

	1
1	4.05
2	4.44

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

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

	1
1	475.6
2	565.8

$\cdot 10^3$

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

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

Лопаточный КПД Т:

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

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

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

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

Мощностной КПД Т:

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

$L_{ст}^{T} =$

	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	144.2	138.9	138.0	144.8

$\cdot 10^{3}$

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

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

$\cdot 10^{3}$

$\mathrm{submatrix}\left(R_{L}^{T}, \mathrm{av}(N_{r}), \mathrm{av}(N_{r}), 1, Z\right) =$

	1	2	3	4
1	0.1	0.2	0.2	0.2

$G^{T} =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	35.394	35.394	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	-0.354	-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

$G_{cooling} = 0.8$

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

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

	1	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	1.298	1.302	1.303	1.306	1.307	1.312	1.313	1.319	1.320

$\mathrm{submatrix}\left(P^{*T}, \mathrm{av}(N_r), \mathrm{av}(N_r), 1, 2Z+1\right) =$ $\cdot 10^{3}$

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

$\mathrm{submatrix}\left(P^{T}, \mathrm{av}(N_r), \mathrm{av}(N_r), 1, 2Z+1\right) =$ $\cdot 10^{3}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

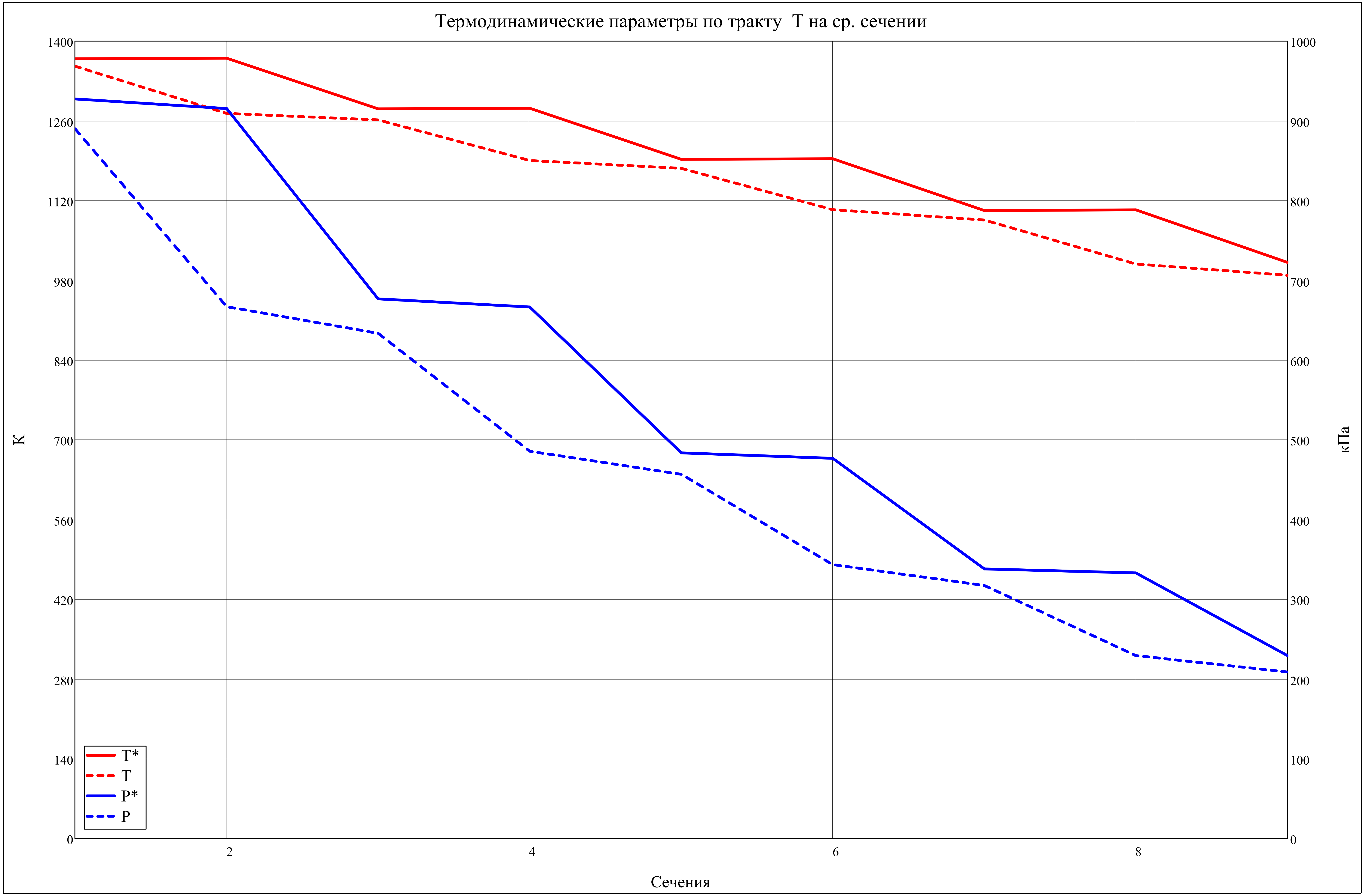
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.440	0.551	0.575	0.707	0.743	0.927	0.987	1.269	1.366

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

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

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

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



Термодинамические параметры по тракту Т на ср. сечении
1400
1260
1120
980
840
700
560
420
280
140
0
К
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
кПа
2
4
6
8
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	691.4	688.5	669.8	666.1	646.3	641.3	619.4	613.7

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

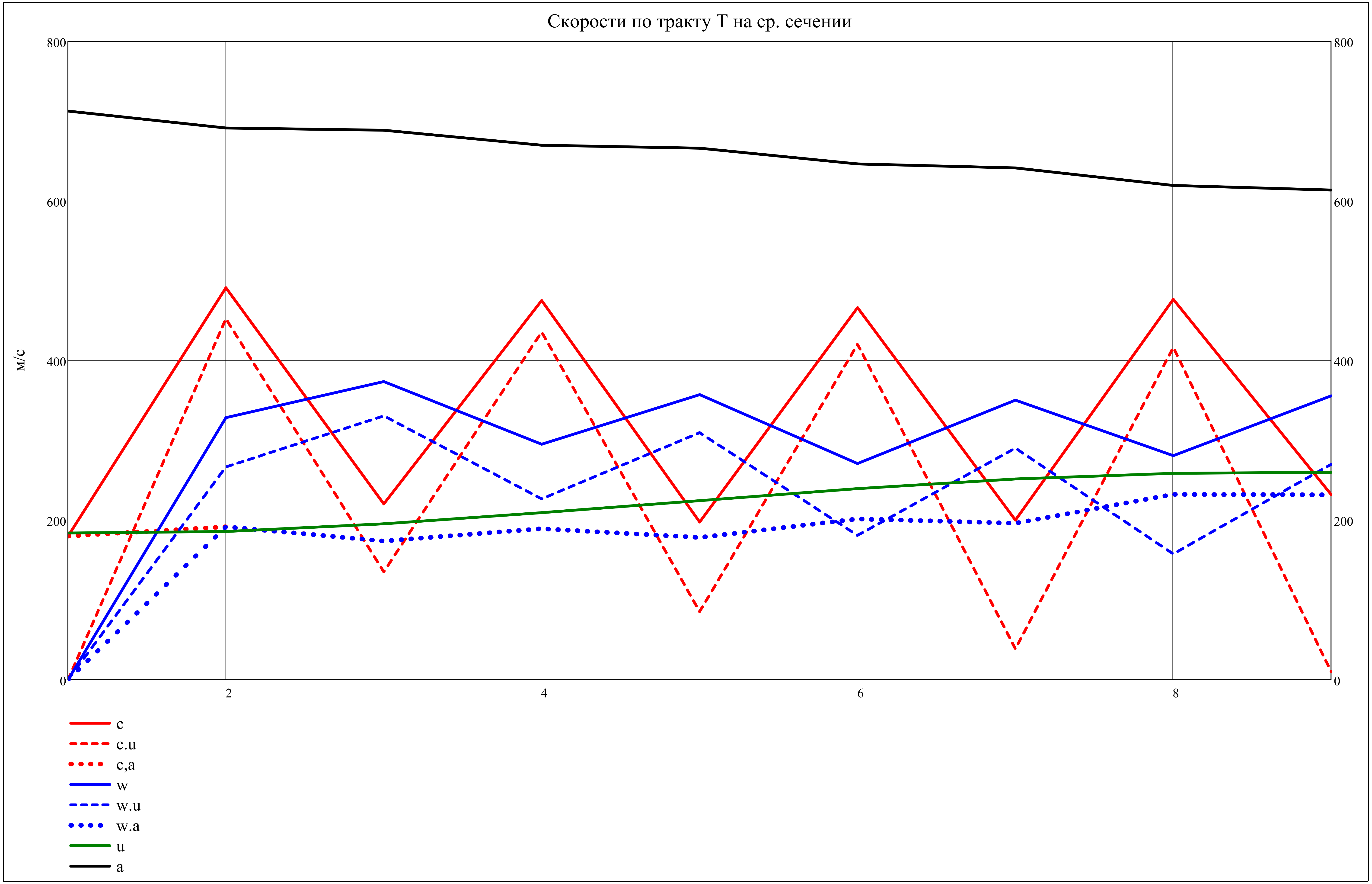
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	537.0	500.9	527.1	485.9	525.3	475.7	538.1	485.8

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

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

$u^{T} =$

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



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

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

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

$\cdot{}^\circ$

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

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

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

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

$\cdot{}^\circ$

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

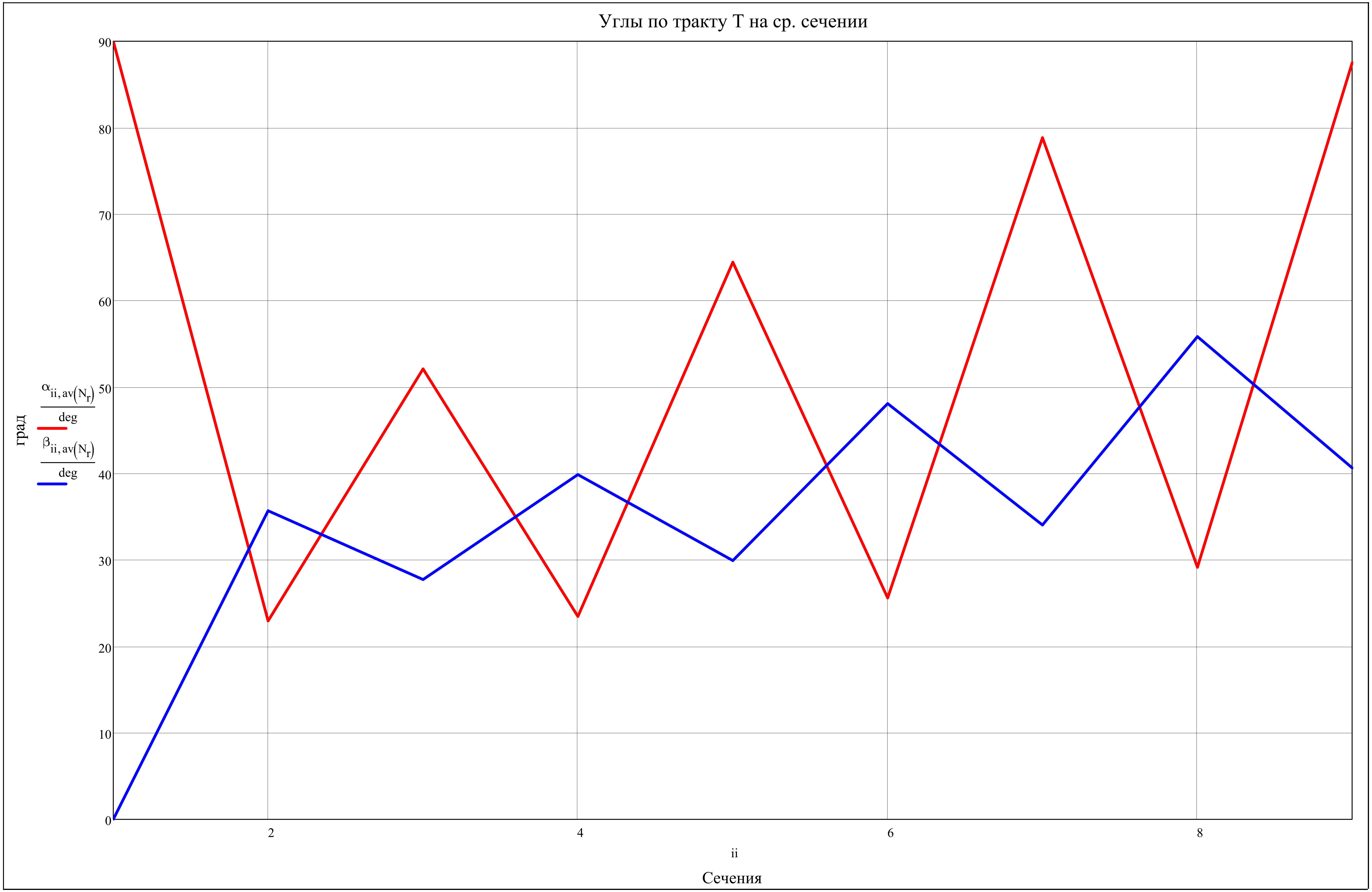
	1	2	3	4	5	6
1	-67.04	-28.63	-38.82	-49.68		

$\cdot{}^\circ$

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

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

$\cdot{}^\circ$


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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.2695	0.7348	0.3407	0.7340	0.3165	0.7458	0.3328	0.7922	0.4025

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0000	0.5011	0.5697	0.4664	0.5638	0.4445	0.5742	0.4802	0.6084

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.2526	0.7105	0.3200	0.7093	0.2967	0.7213	0.3118	0.7697	0.3780

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

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

$\cdot^\circ$

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

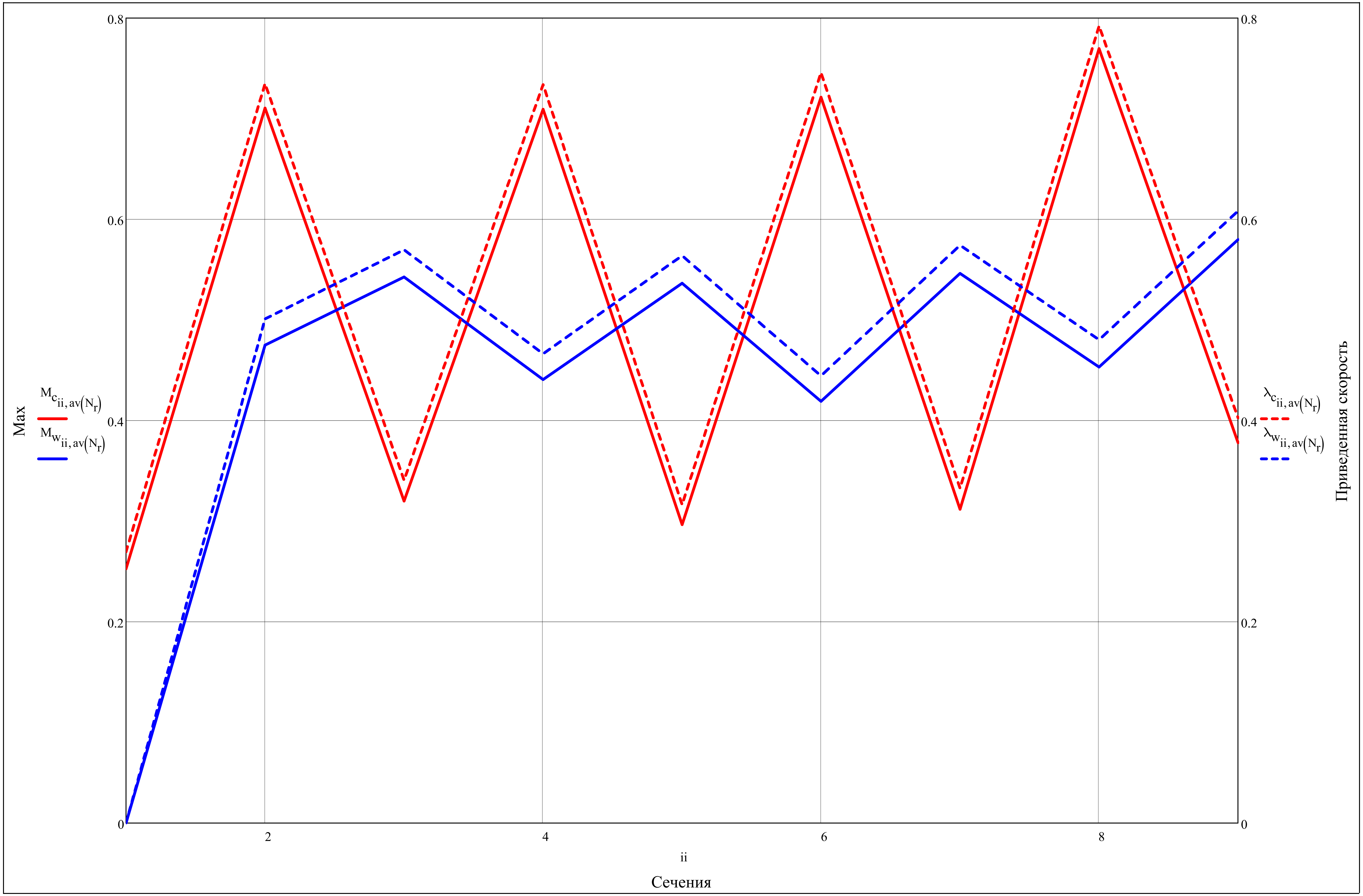
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

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

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0000	0.4749	0.5426	0.4407	0.5364	0.4191	0.5463	0.4533	0.5798

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

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



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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

	1	2	3	4
1	58.7	50.6	60.4	69.4

$\cdot 10^{-3}$

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

	1	2	3	4
1	34.3	39.5	44.6	46.2

$\cdot 10^{-3}$

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

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

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

0.743
0.595
0.639
0.671

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

1
0
0
0

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

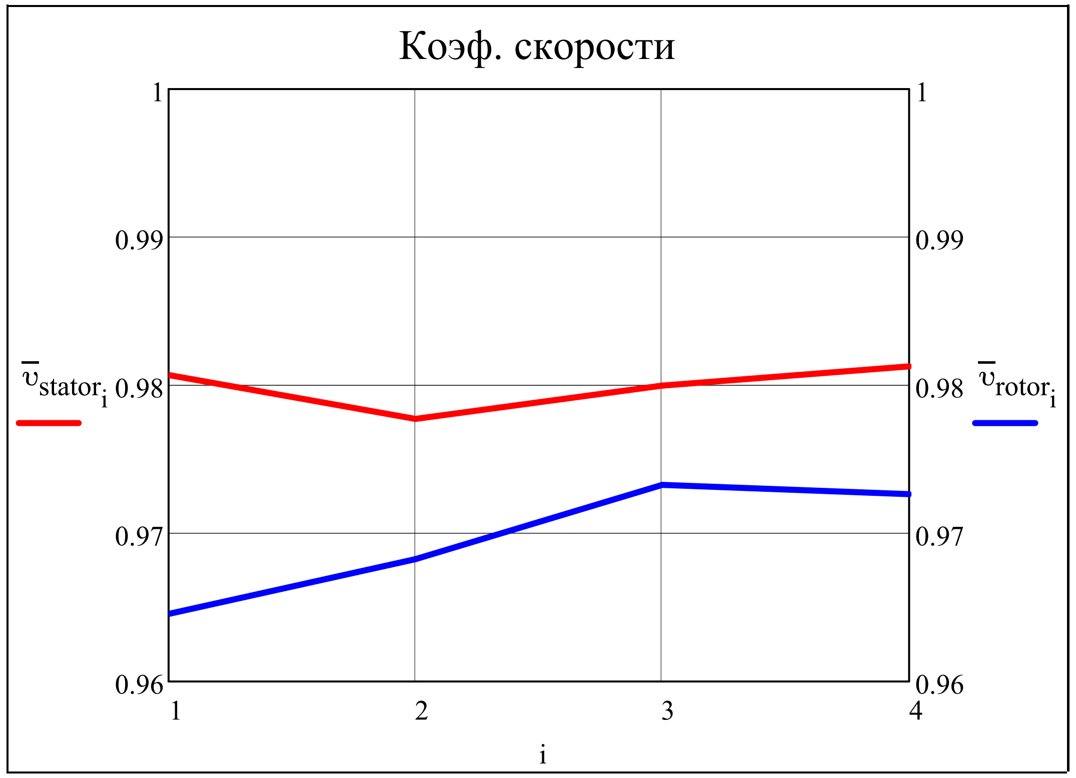
0.622
0.640
0.684
0.714

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

0
0
0
1

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

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



$\mathrm{stack}\left(\xi_{трCA}^{T}, \xi_{трPK}^{T}\right) =$

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

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{крCA}^{T}, \xi_{крPK}^{T}\right) =$

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

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{прCA}^{T}, \xi_{прPK}^{T}\right) =$

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

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{ReCA}^{T}, \xi_{RePK}^{T}\right) =$

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

$\cdot\%$

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

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

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{втCA}^{T}, \xi_{втPK}^{T}\right) =$

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

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{тдCA}^{T}, \xi_{тдPK}^{T}\right) =$

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

$\cdot\%$

$\mathrm{stack}\left(\xi_{смCA}^{T}, \xi_{смPK}^{T}\right) =$

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

$\cdot\%$

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

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

$\cdot\%$

$\xi_{вых}^{T} =$

	1	2	3	4
1	16.829	14.054	14.491	18.579

$\cdot\%$

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

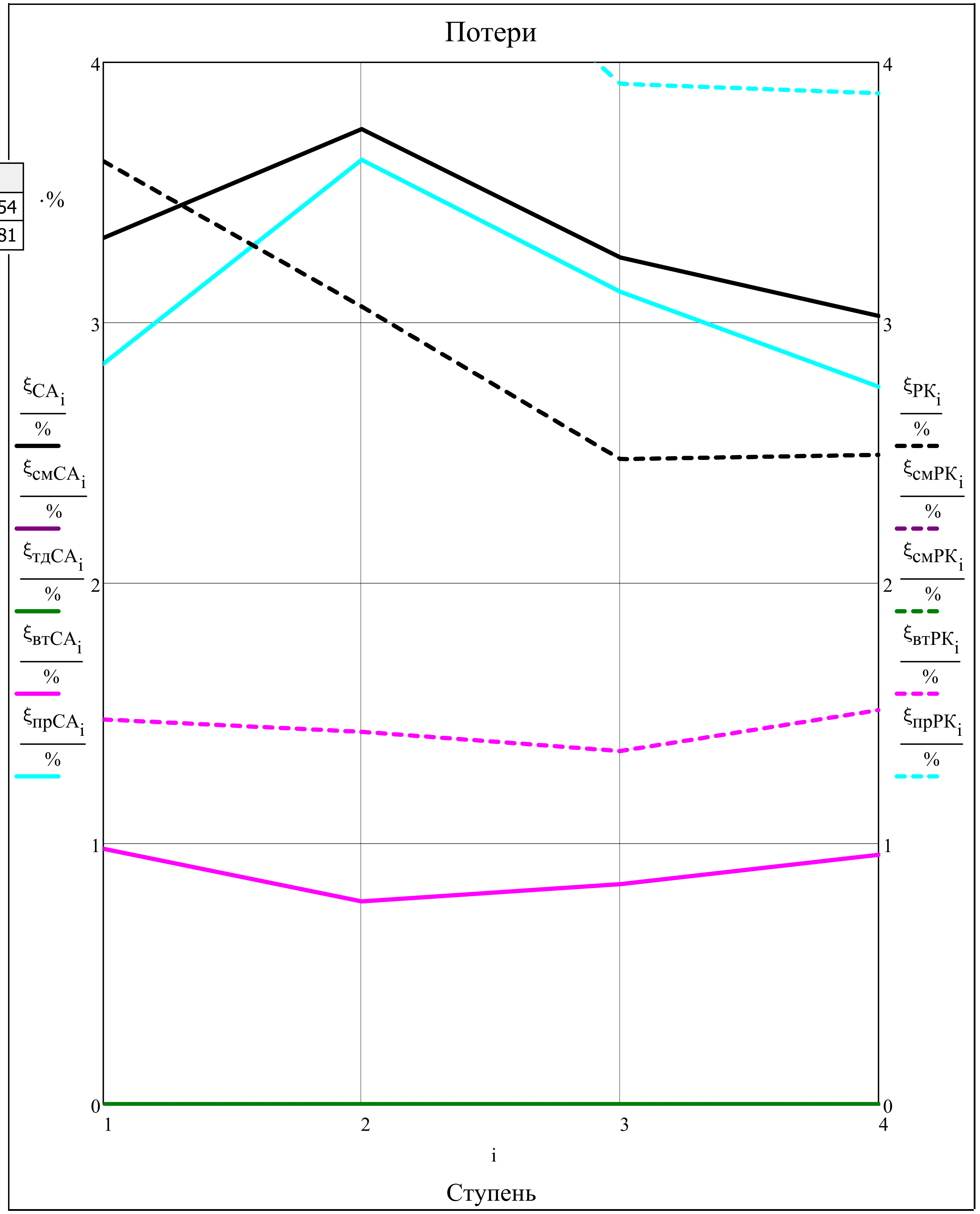
	1	2	3	4
1	1.813	1.786	1.826	1.662

$\cdot\%$

$\xi_{тр.в}^{T} =$

	1	2	3	4
1	0.138	0.222	0.300	0.245

$\cdot\%$



Параметры турбины

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

Выбор закона профилирования Л по высоте

$$m = \begin{pmatrix} \left| \begin{array}{l} \overline{\upsilon}_{\text{stator}_1} \cdot \cos\left(\alpha_{\text{st}(1,2),\text{av}}\left(N_r\right)\right)^2 \ \ \text{if } Z = 1 \\ -0.5 \ \ \text{otherwise} \end{array} \right. \\ -0.25 \\ 0 \\ 0.25 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

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

$m^T =$

	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 $r \in 1..N_r$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $r \in 1..N_r$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

for $i \in 1..Z$

for $r \in 1..N_r$

$$\begin{pmatrix} \Delta c_{a} \ldots \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c_{a} \ldots - c_{a} \ldots \end{pmatrix}$$

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

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

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

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

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

Расчет Л по высоте

Результаты расчета Л по высоте

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

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

$P^{T} =$ (values $\cdot 10^3$)

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

$T^{*T} =$

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

$T^{T} =$

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

$T^{*}_{w}{}^{T} =$

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

$\rho^{*T} =$

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

$\rho^{T} =$

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

$k^{T} =$

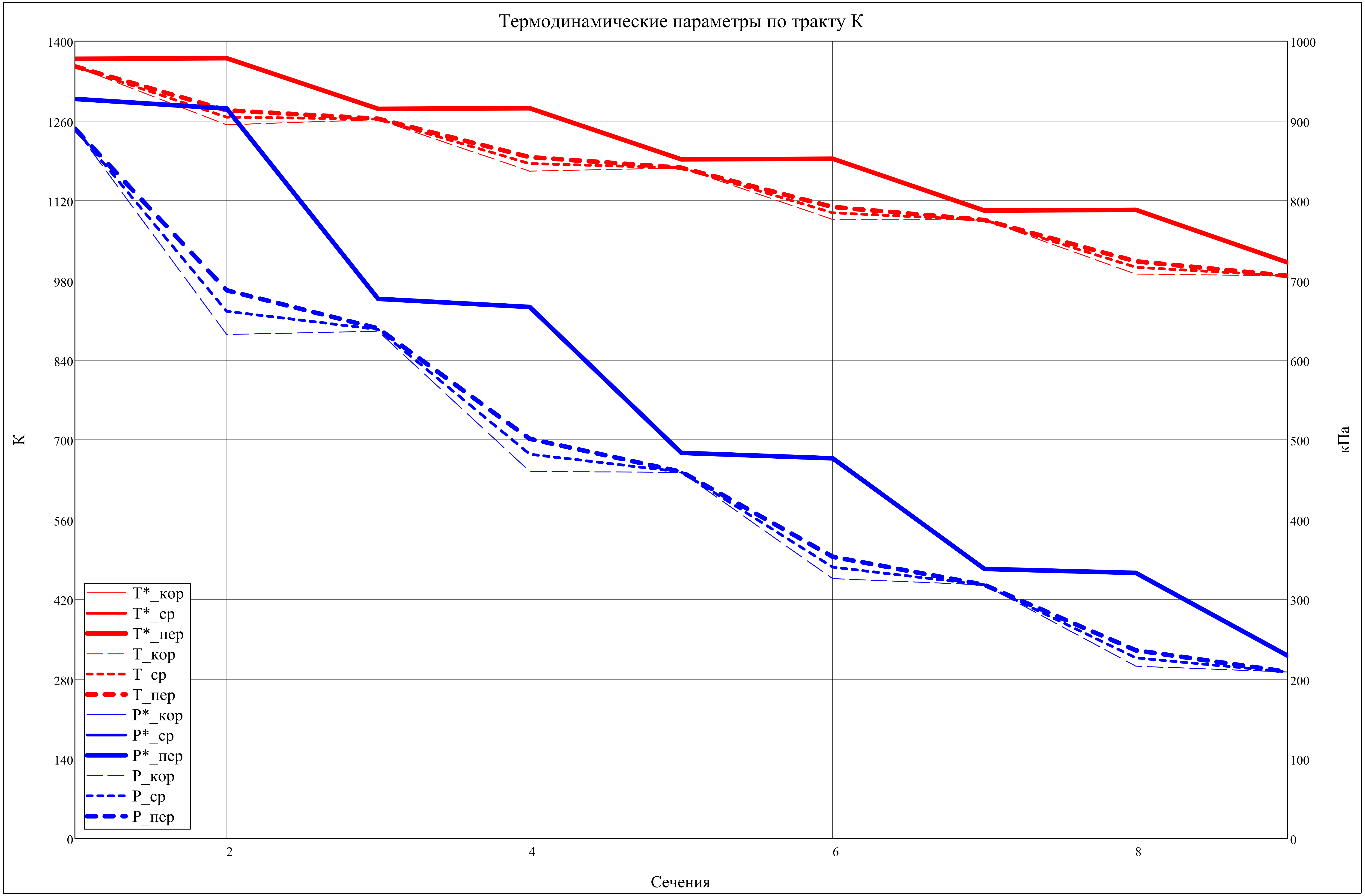
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.317	1.317	1.321	1.321	1.326	1.326	1.331	1.331	1.338
2	1.317	1.317	1.321	1.321	1.326	1.326	1.331	1.331	1.338
3	1.317	1.317	1.321	1.321	1.326	1.326	1.331	1.331	1.338

$R_L{}^{T} =$

	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



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

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

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

$u^T =$

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

$c^T =$

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

$c_u{}^T =$

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

$c_a{}^T =$

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

$\Delta c_a{}^T =$

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

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

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

$a_{зв}{}^T =$

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

$w^T =$

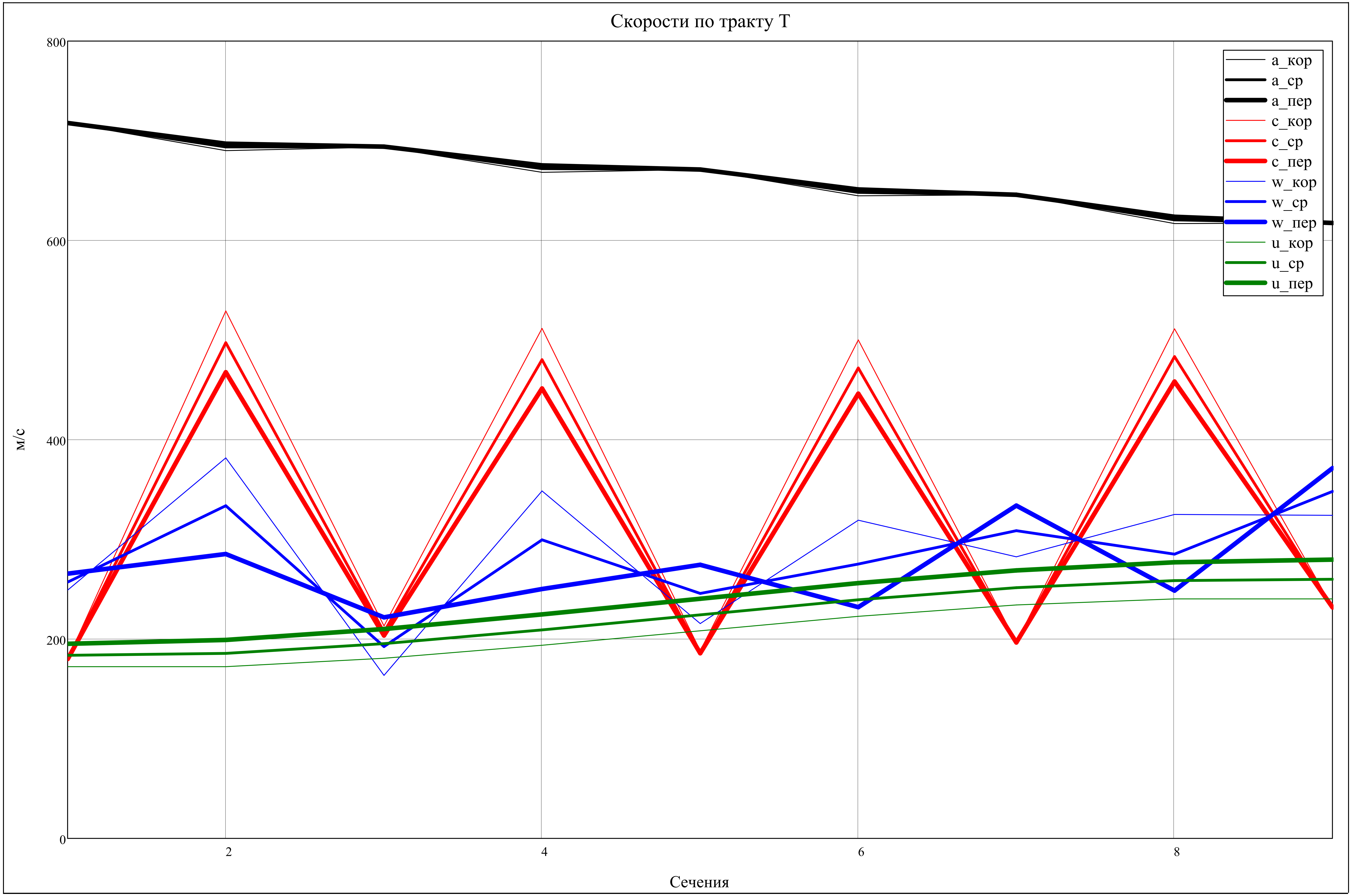
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	249.1	381.8	163.5	348.6	215.6	319.3	282.5	325.1	324.1
2	257.2	333.7	192.5	299.5	245.8	275.2	308.8	285.1	348.1
3	265.6	285.4	221.8	250.2	274.5	232.0	334.0	248.5	371.5

$w_u{}^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	172.2	-303.9	38.6	-265.4	130.5	-221.3	204.8	-203.8	227.0
2	183.8	-273.2	82.7	-232.2	169.2	-187.4	238.4	-165.3	259.8
3	195.3	-245.5	123.4	-201.7	205.2	-155.7	269.9	-129.3	290.6

$w_a{}^T =$

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


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

$\alpha^T =$

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

$\cdot°$

$\beta^T =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	46.26	142.75	76.35	139.59	52.74	133.88	43.53	128.83	45.55
2	44.41	144.96	64.55	140.83	46.49	132.92	39.45	125.44	41.73
3	42.67	149.35	56.19	143.74	41.64	132.18	36.07	121.36	38.54

$\cdot°$

$80\cdot° \le \alpha^T =$

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

[1, c.78]

Угол поворота потока:

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

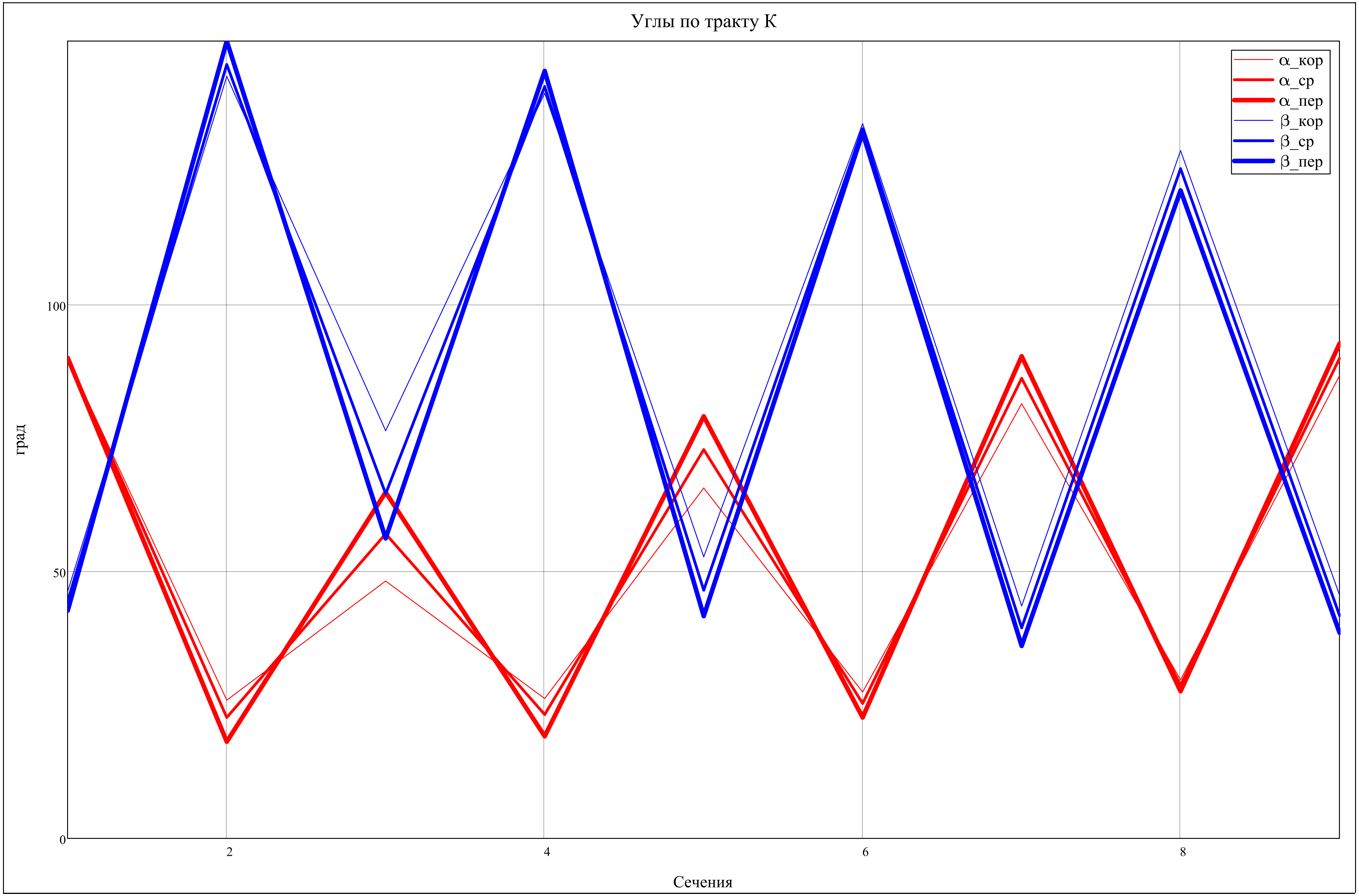
	1	2	3	4
1	64.11	21.99	38.24	51.72
2	67.34	33.86	47.53	57.46
3	71.88	45.69	56.39	62.72

$\cdot°$

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

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

$\cdot°$



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

λ_c^T =

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

λ_w^T =

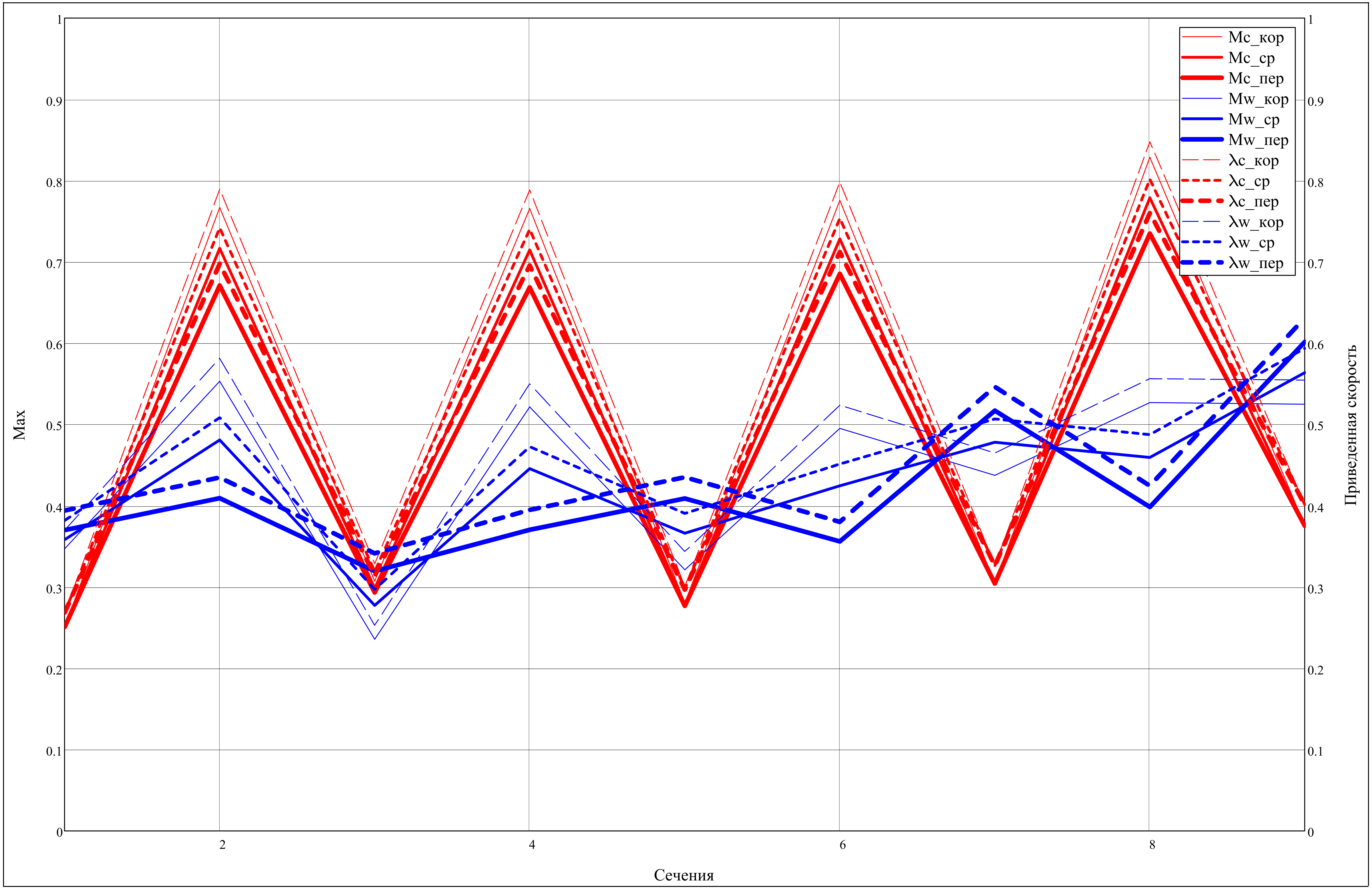
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.370	0.582	0.253	0.550	0.344	0.524	0.465	0.556	0.555
2	0.382	0.509	0.297	0.473	0.391	0.451	0.507	0.488	0.594
3	0.394	0.435	0.341	0.395	0.435	0.380	0.546	0.425	0.631

M_c^T =

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

M_w^T =

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



Результаты расчета Л по высоте

Вывод результатов расчета параметров потока по высоте Л

Рассматриваемая ступень:

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

Построение треугольников скоростей в 3х сечениях

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

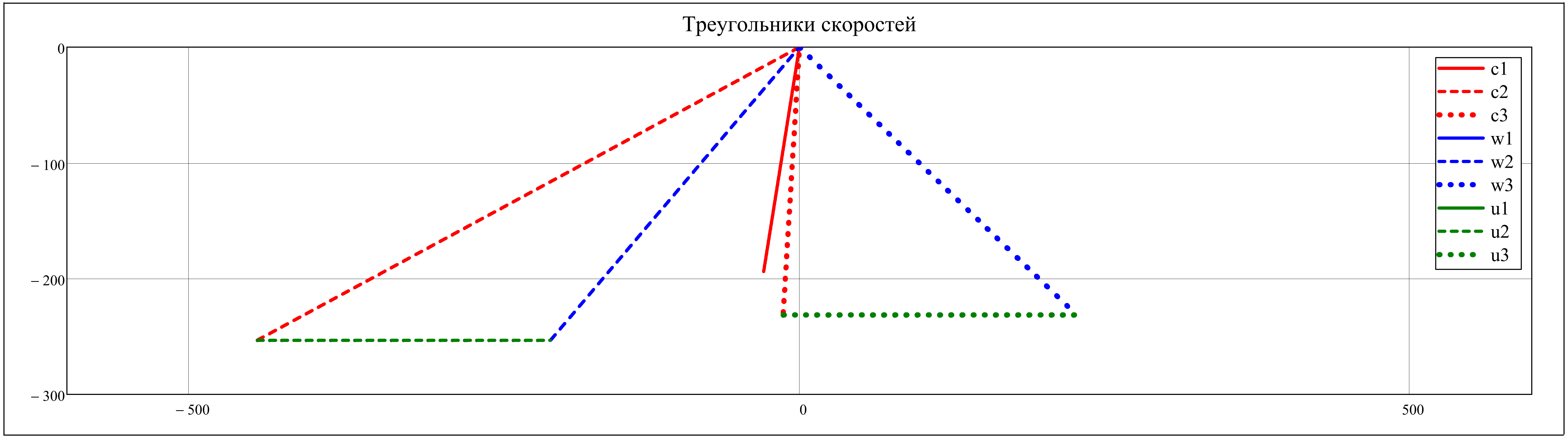
$$\Delta_w(v,i,j,r) = \left| \begin{array}{l} -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot v \ \text{ if } \left(-\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right) \ge 0\right) \wedge \left(-\left|w_{st(i,j),r}\cdot\cos\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\right| \le v \le 0\right) \wedge (j \ne 1) \\ -\tan\left(\beta_{st(i,j),r}\right)\cdot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

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

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

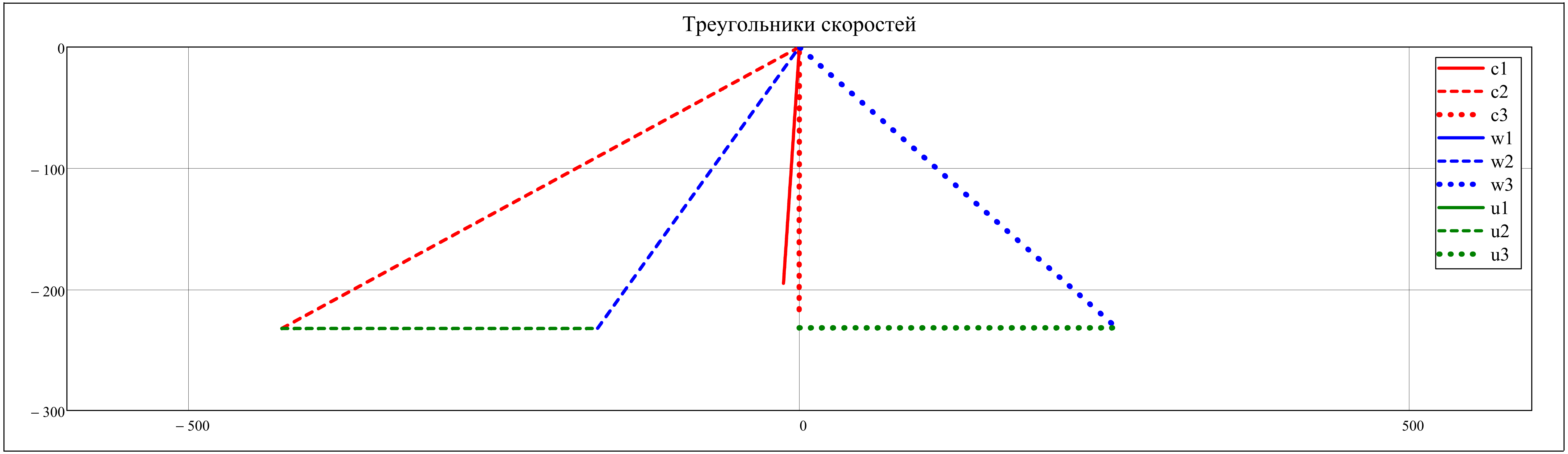
$$v = -\max(c,w,u), -\max(c,w,u) + \frac{\max(c,w,u)}{3000} \,..\, \max(c,w,u)$$

r = 1



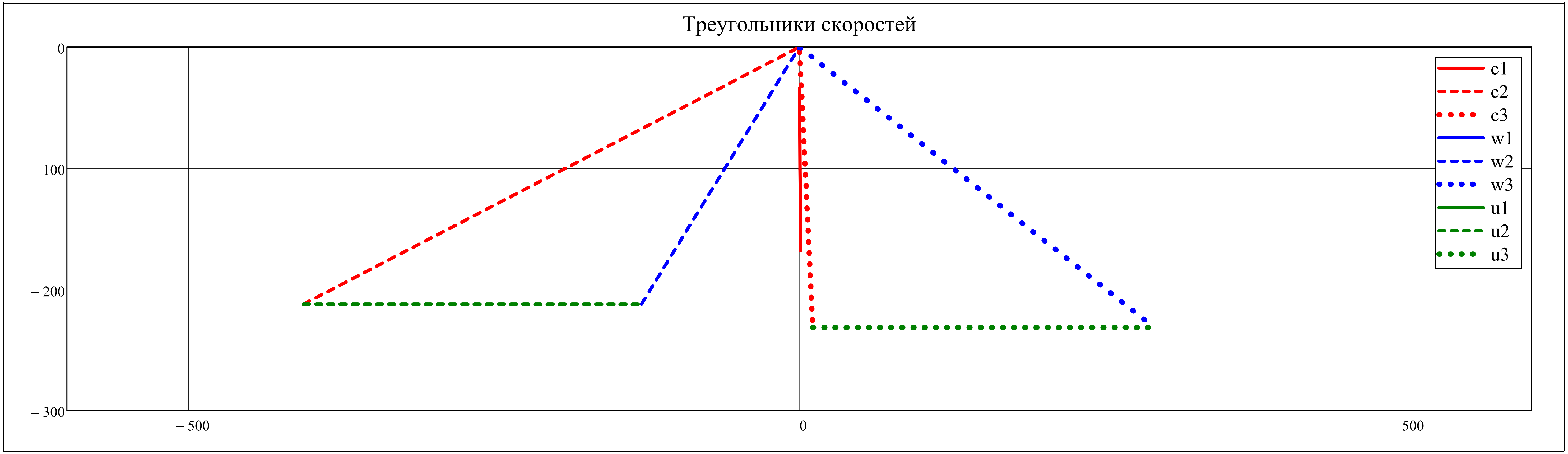
Треугольники скоростей
0
− 100
− 200
− 300
− 500
0
500
c1
c2
c3
w1
w2
w3
u1
u2
u3

$r = av(N_r)$



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

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

Длины хорд РК и СА (м):

$chord_{stator}^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

$chord_{rotor}^T =$

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

$\cdot 10^{-3}$

Расчет хорд Л по парусности

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

$\bar{x}_f = 0.45$

Расчет параметров решетки

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

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

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

Расчет параметров решетки

Результаты расчета параметров решеток

Относительные радиусы профилей ():

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

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

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

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

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

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

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

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

Относительная толщина профиля ():

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

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

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

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

Относительный шаг решетки ():

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

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

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

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

Относительная густота решетки ():

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

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

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

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

Длина хорды профиля [м]:

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

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

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

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

Радиусы профилей:

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

	1	2	3	4
1	1.64	1.42	1.69	1.94
2	2.11	1.82	2.17	2.50
3	2.58	2.23	2.66	3.05

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

	1	2	3	4
1	1.73	1.95	2.24	2.45
2	1.02	1.15	1.32	1.45
3	0.68	0.75	0.88	1.02

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

	1	2	3	4
1	0.82	0.71	0.85	0.97
2	1.06	0.91	1.09	1.25
3	1.29	1.11	1.33	1.53

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

	1	2	3	4
1	0.74	0.83	0.96	1.05
2	0.44	0.49	0.57	0.62
3	0.29	0.32	0.38	0.44

Толщина профиля [м]:

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

	1	2	3	4
1	4.11	3.55	4.23	4.86
2	5.28	4.56	5.43	6.24
3	6.45	5.57	6.64	7.63

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

	1	2	3	4
1	4.95	5.57	6.41	7.00
2	2.91	3.28	3.78	4.14
3	1.93	2.13	2.52	2.92

Шаг решетки [м]:

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

	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

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

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

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

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

$\cdot^{\circ}$

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

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

$\cdot^{\circ}$

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

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

$\cdot^{\circ}$

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

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

$\cdot^{\circ}$

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

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

$\cdot^{\circ}$

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

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

$\cdot^{\circ}$

Результаты расчета параметров решеток

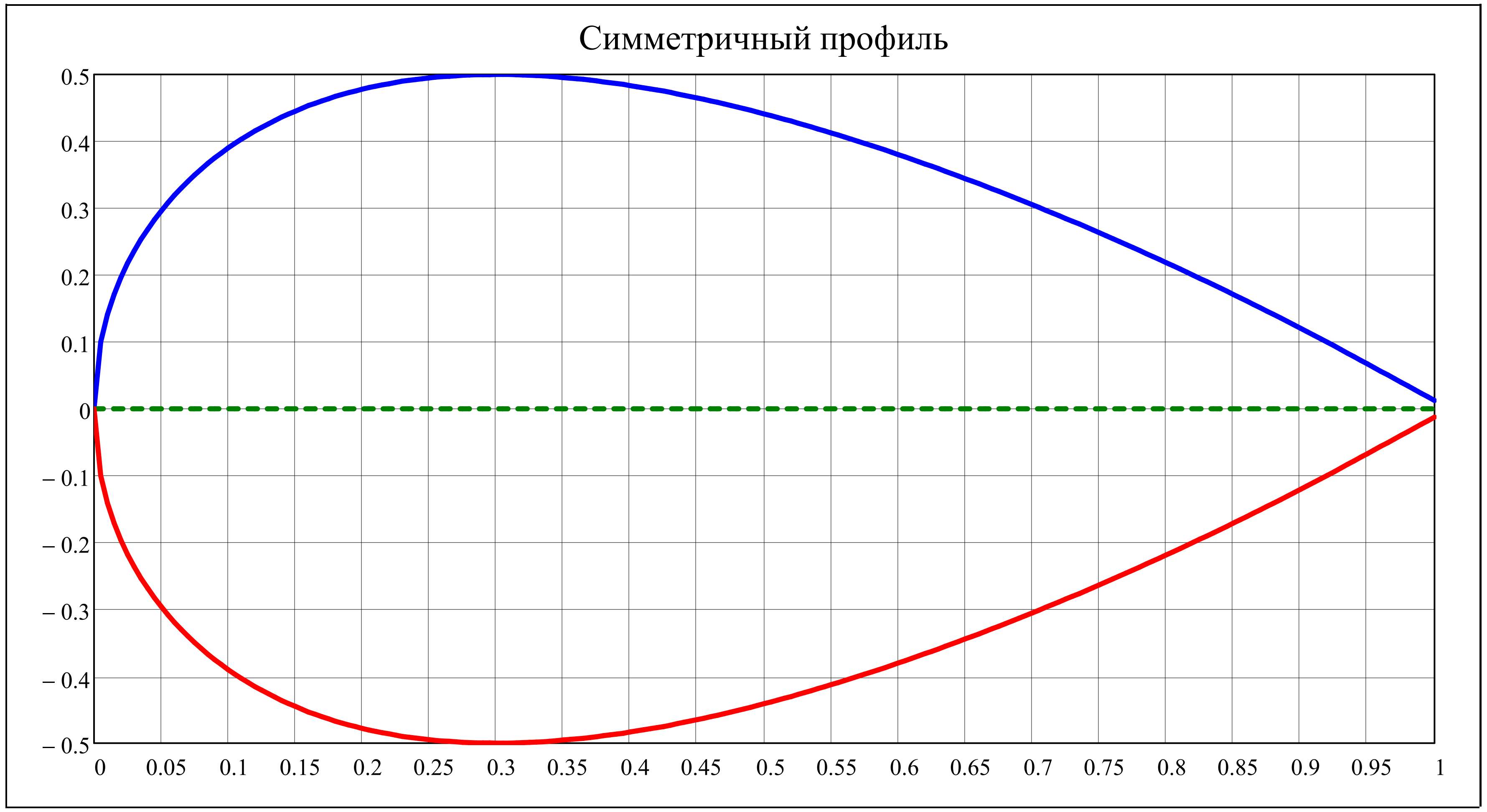
Подключение симметричного профиля

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

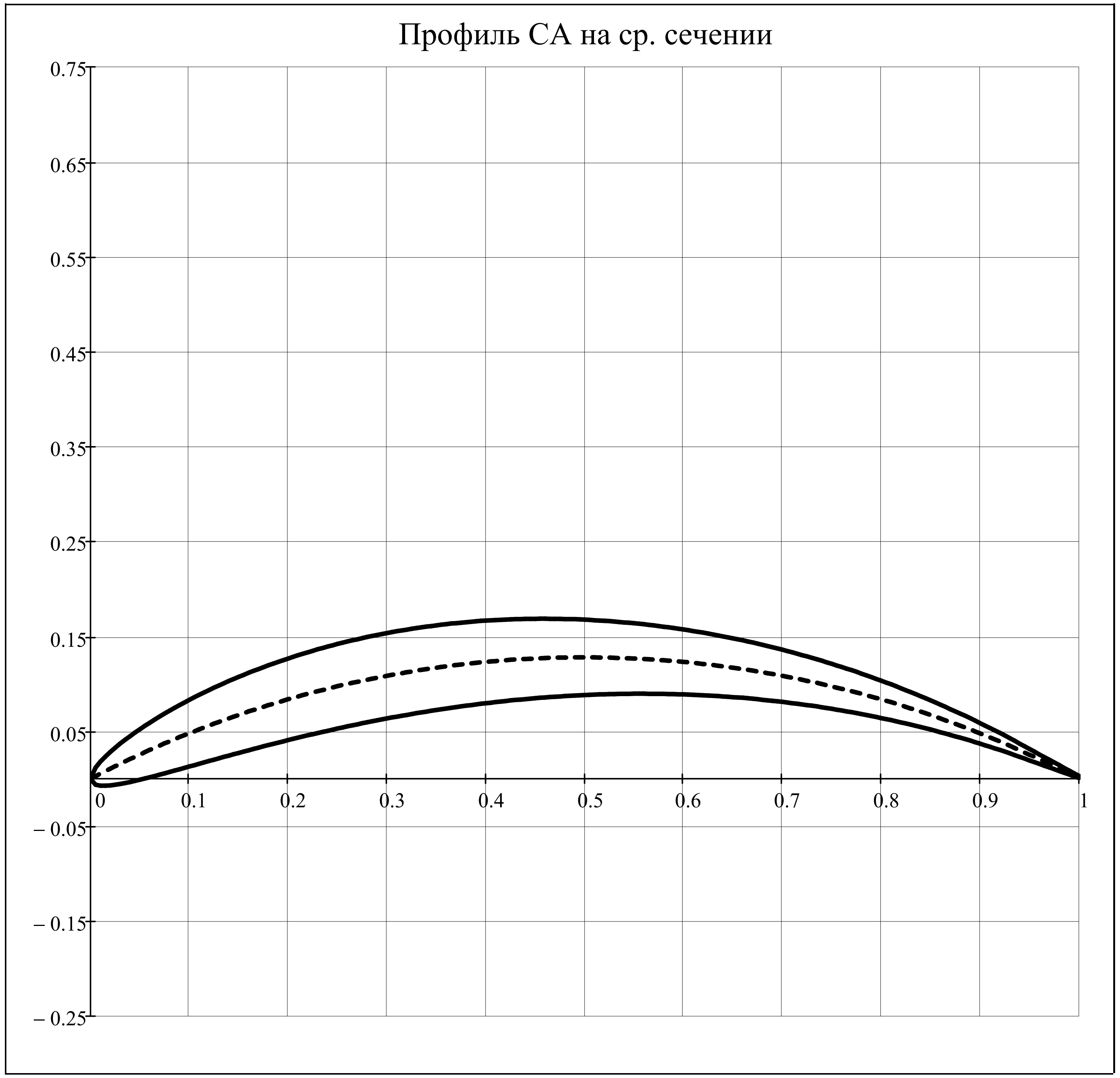
Относ. координаты профиля РК и СА:

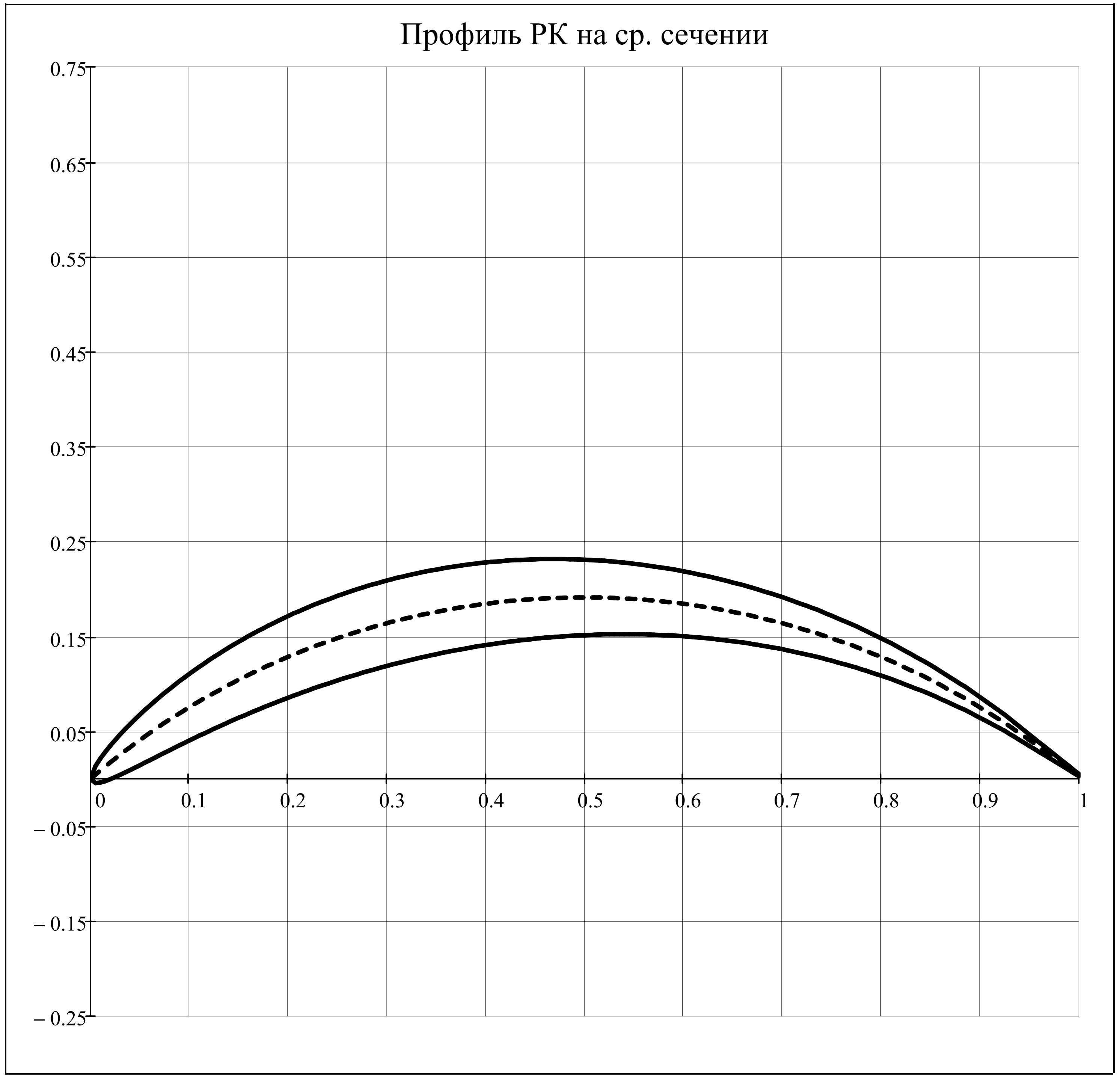
$$\mathrm{AIRFOIL}_0\left(x, line, \bar{f}, \bar{x}_f, \bar{c}\right) = \begin{cases} \begin{cases} \mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) & \text{if } line = \text{"+"} \\ \dfrac{\mathrm{linterp}\left(X_U, Y_U, x\right) + \mathrm{linterp}\left(X_L, Y_L, x\right)}{2} & \text{if } line = \text{"0"}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

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



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





Подключение симметричного профиля

Определение относительных геометрических характеристик сечений Л

Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Определение абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

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

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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\cdot 10^{-3}$

$area_{stator}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-6}$

$area_{rotor}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-6}$

$Sx_{stator}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-9}$

$Sx_{rotor}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{stator}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-9}$

$Sy_{rotor}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-9}$

$x0_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	24.71	21.33	25.43	29.22
2	24.71	21.33	25.43	29.22
3	24.71	21.33	25.43	29.22

$\cdot 10^{-3}$

$x0_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	14.90	16.74	19.27	21.04
2	13.61	15.34	17.69	19.35
3	11.61	12.83	15.15	17.55

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{stator}^{T} =$

	1	2	3	4
1	6.44	1.84	3.85	6.06
2	6.80	2.85	4.83	6.77
3	7.30	3.89	5.78	7.44

$\cdot 10^{-3}$

$y0_{rotor}^{T} =$

	1	2	3	4
1	4.03	6.12	7.38	7.33
2	4.56	6.18	7.05	6.78
3	4.61	5.68	6.24	6.08

$\cdot 10^{-3}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot \circ$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot 10^{-12}$

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

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

$\cdot \circ$

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

	1	2	3	4
1	750	127	414	1063
2	1176	306	848	1855
3	1785	605	1499	2946

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	336	725	1338	1718
2	141	293	511	614
3	68	120	209	291

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	31306.3	17336.5	35041.3	61154.6
2	40263.3	22299.6	45077.7	78661.7
3	49233.3	27272.6	55130.2	96185.3

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	8273	13227	23245	33009
2	3716	5994	10601	15168
3	1531	2286	4442	7983

$\cdot 10^{-12}$

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

	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	32056	17464	35455	62217
2	41440	22605	45925	80516
3	51018	27878	56629	99132

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	8609	13952	24583	34727
2	3857	6288	11113	15782
3	1599	2406	4651	8275

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	927.3	594.5	1008.3	1531.7
2	1196.3	767.4	1301.6	1976.7
3	1468.5	942.6	1598.5	2426.8

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	412.5	585.9	893.9	1163.7
2	200.3	286.2	439.0	575.0
3	96.3	129.8	213.9	332.6

$\cdot 10^{-9}$

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

	1	2	3	4
1	639.9	355.2	717.6	1251.3
2	1360.1	755.0	1525.1	2659.5
3	2483.2	1378.5	2784.5	4855.6

$\cdot 10^{-12}$

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

	1	2	3	4
1	676.2	1078.8	1895.0	2693.4
2	125.4	201.9	357.0	511.5
3	31.2	46.5	90.5	162.9

$\cdot 10^{-12}$

$CPx_{stator}{}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-3}$

$CPx_{rotor}{}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-3}$

$CPy_{stator}{}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-3}$

$CPy_{rotor}{}^{T} =$

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

$\cdot 10^{-3}$

Результат расчета абсолютных геометрических характеристик сечений Л

Вывод результатов расчета геометрических хар-к сечений Л

Профилирование решеток

Абс. координаты профиля:

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

Профилирование решеток

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

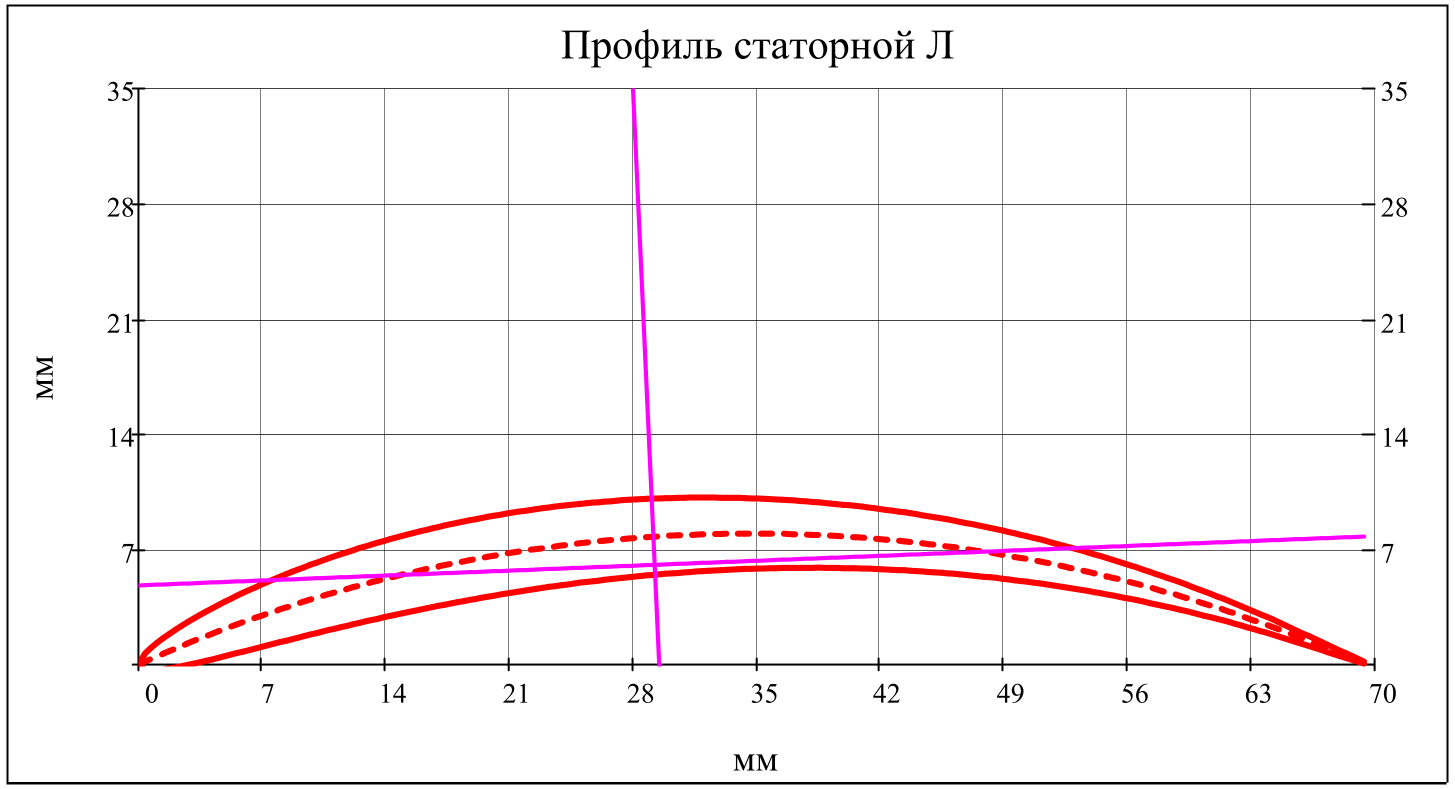
Построение профилей Л РК и НА

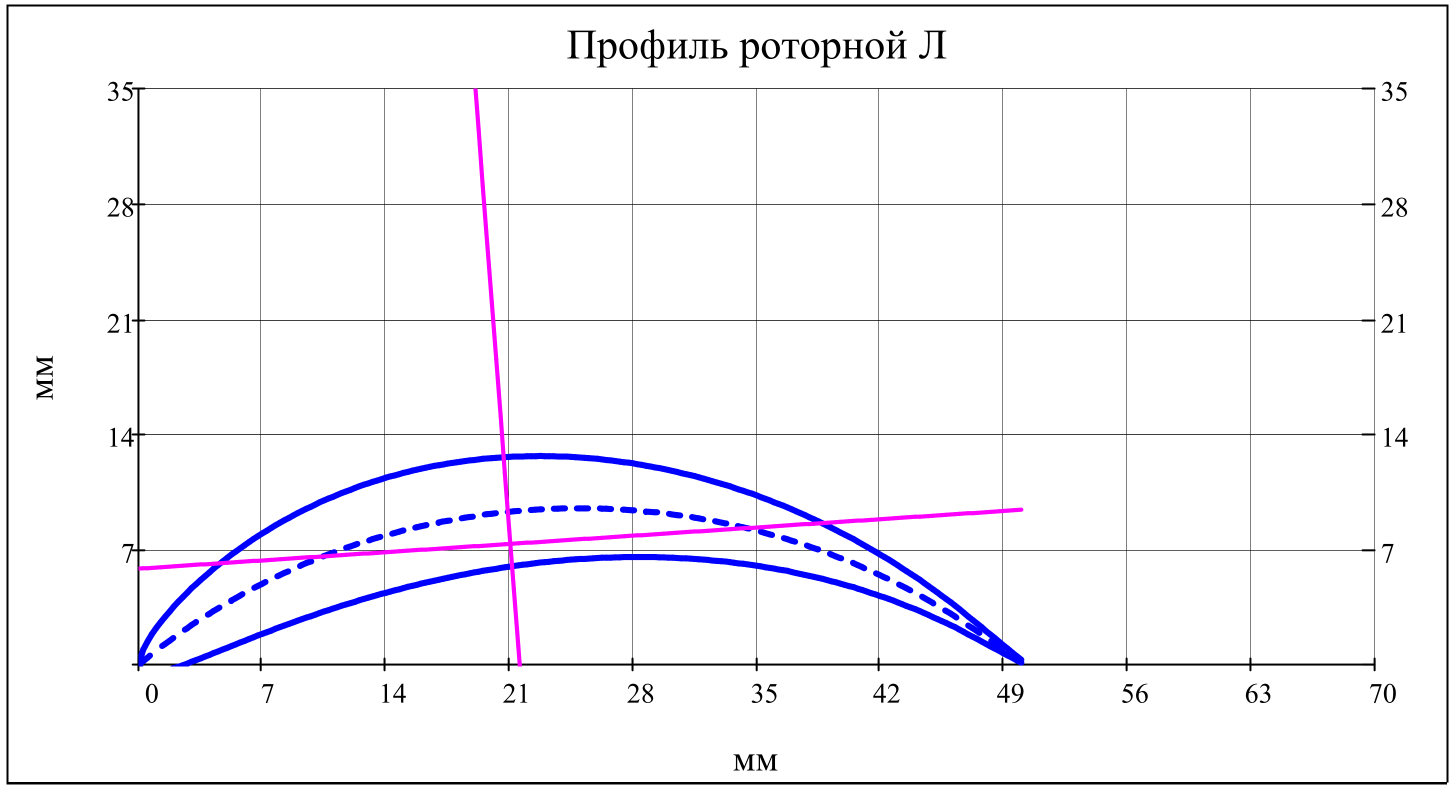
$$AXLE0(type, x, i, r) := \left| \begin{array}{ll} \frac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right) \cdot \left(x - \frac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } type = \text{"rotor"} \\ \frac{y0_{stator_{i,r}}}{chord_{stator_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{stator_{i,r}}\right)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

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

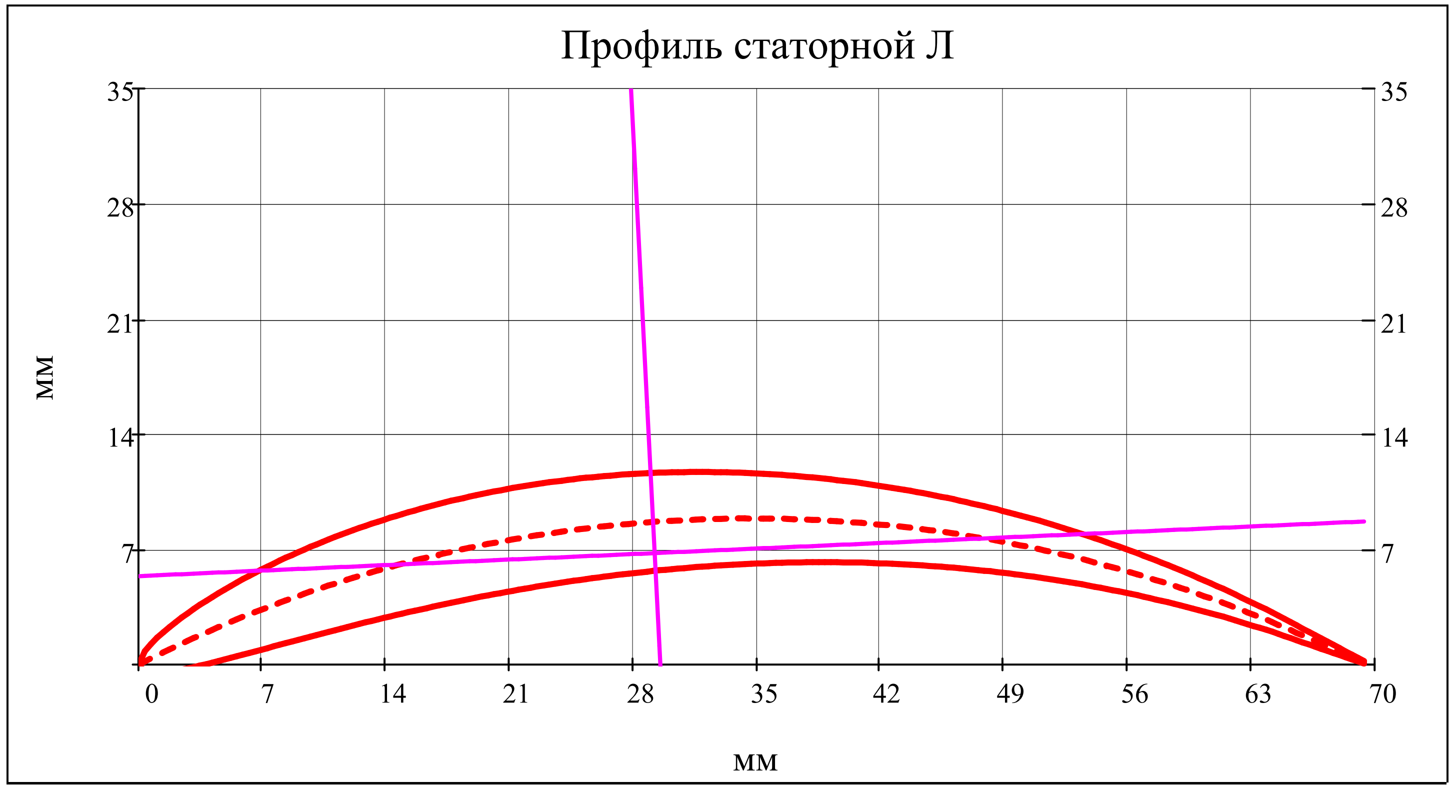
$$AXLE90(type, x, i, r) := \left| \begin{array}{ll} \frac{y0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}} + \tan\left(\alpha\_major_{rotor_{i,r}} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(x - \frac{x0_{rotor_{i,r}}}{chord_{rotor_{i,r}}}\right) & \text{if } (type = \text{"rotor"}) \wedge \left|\alpha\_major_{rotor_{i,r}}\right|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

r = 1

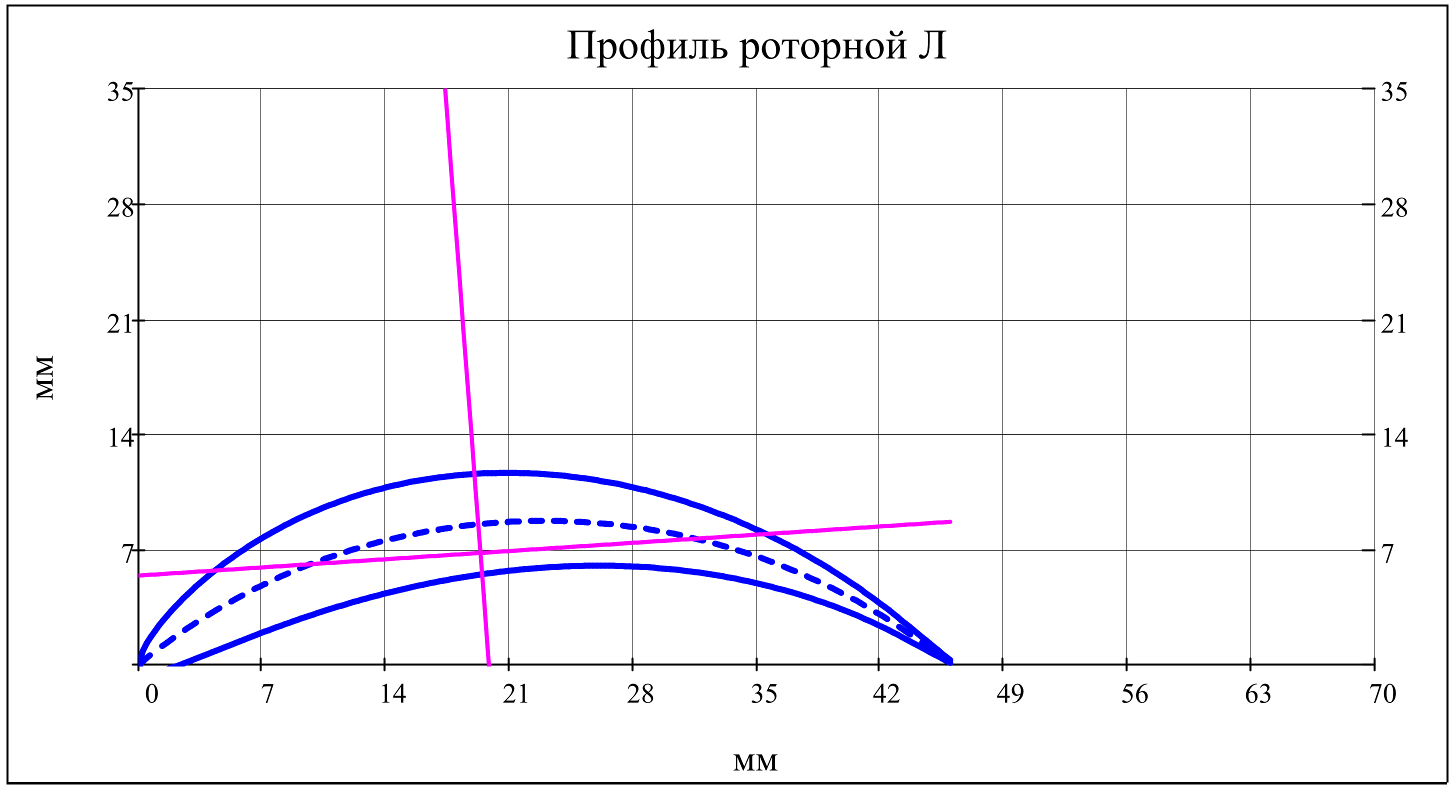

Профиль статорной Л
мм
мм
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
35
28
21
14
7


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

$r = av(N_r)$

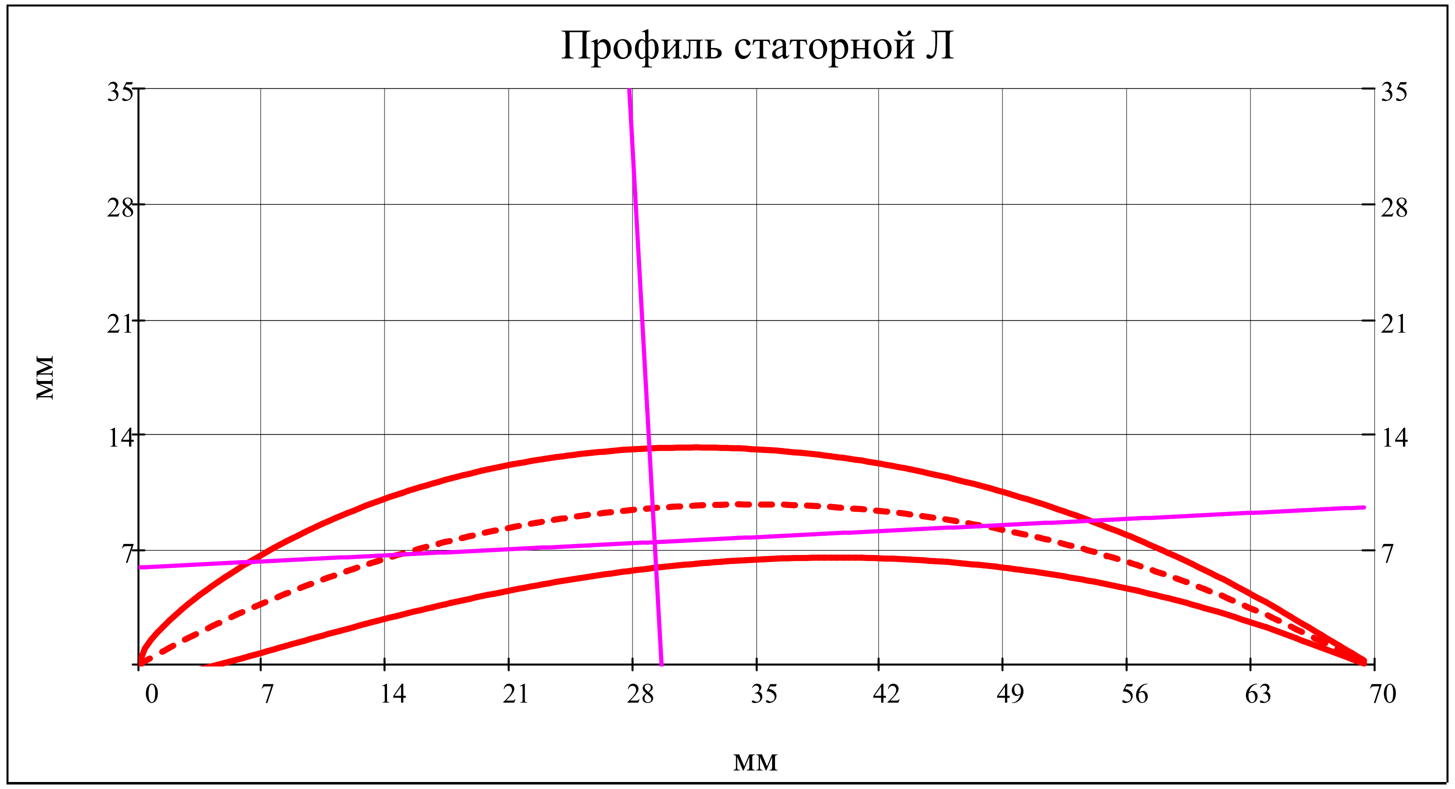


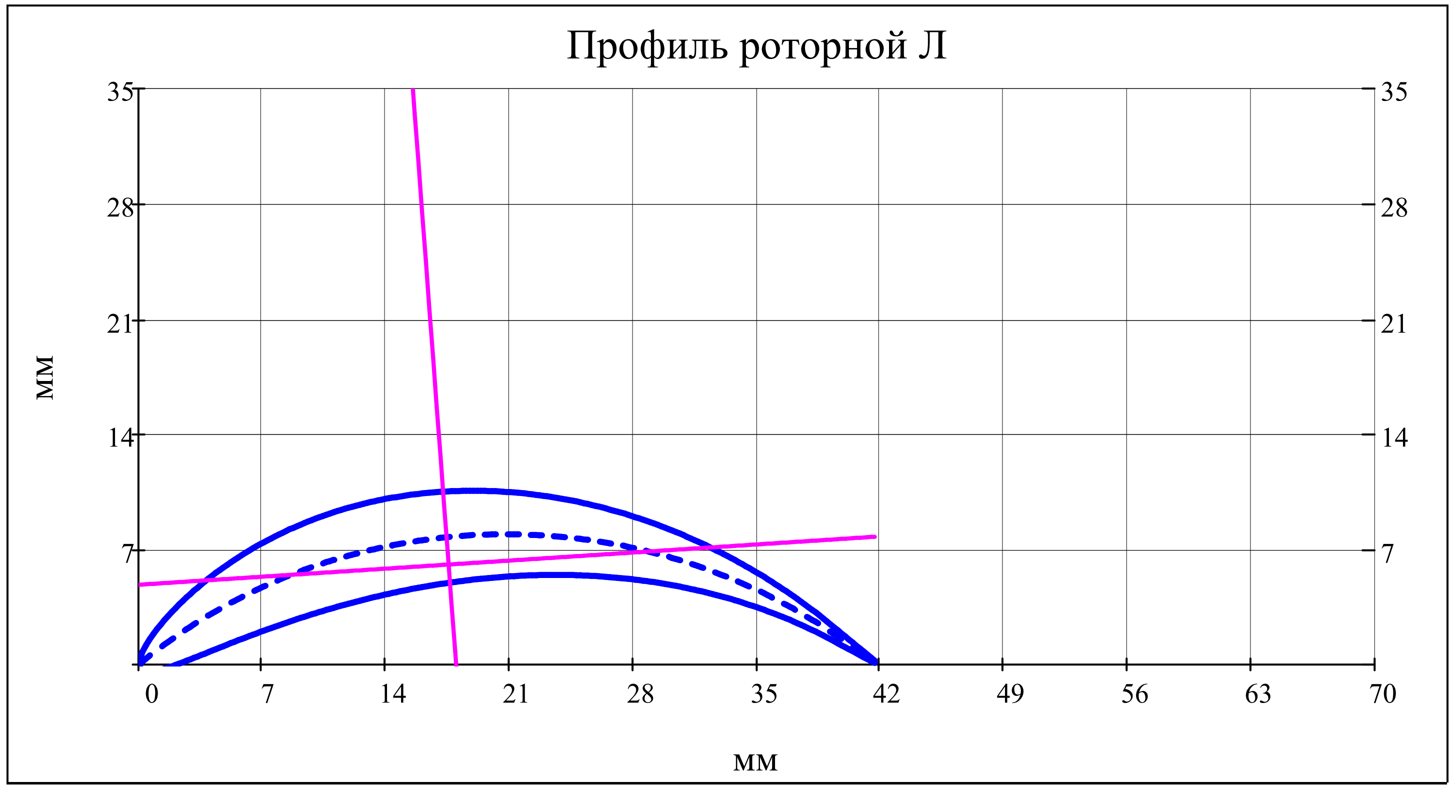
Профиль статорной Л
35
28
21
14
7
0
7
14
21
28
35
42
49
56
63
70
мм
мм



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

$r = N_r$





Построение профилей Л РК и НА

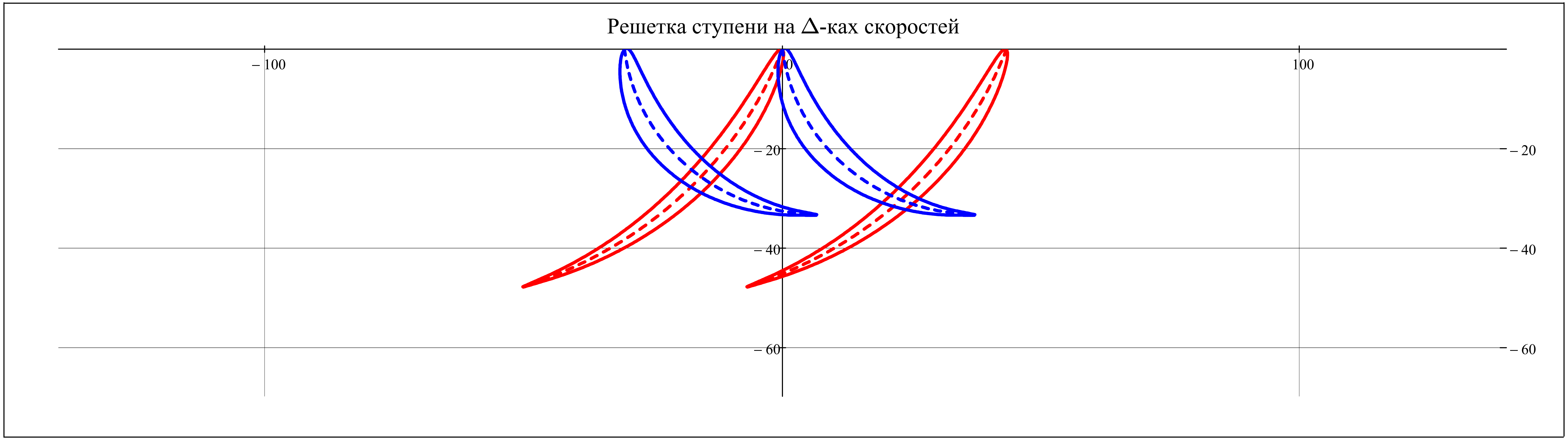
Вывод координат для построения профиля Л

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

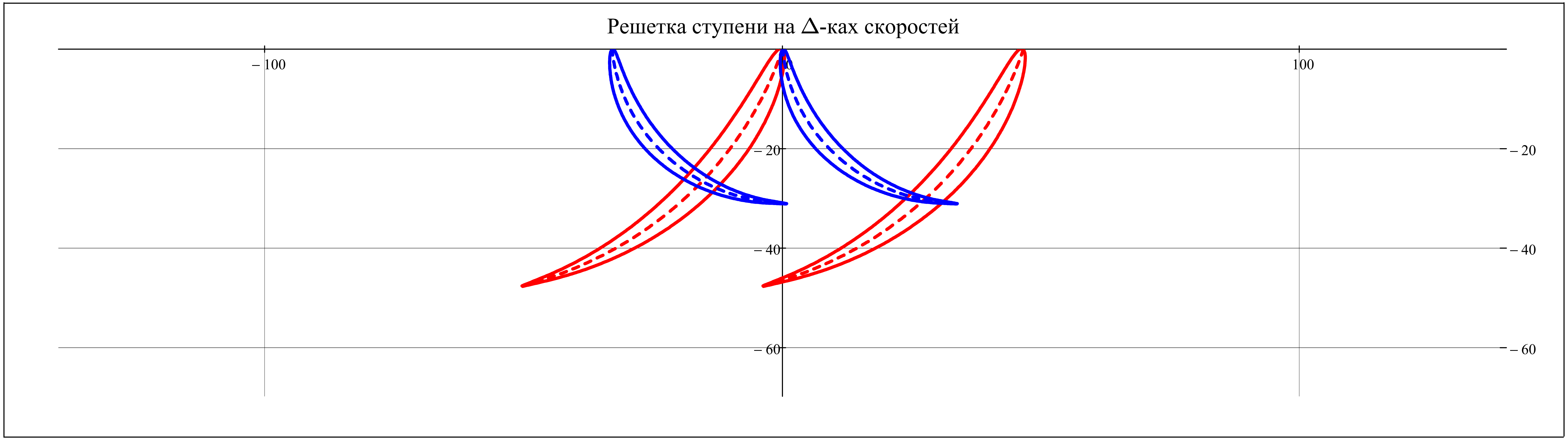
$$b_{lim} := \frac{\mathrm{ceil}\left(\max\left(\mathrm{chord}_{rotor_{j,N_r}}, \mathrm{chord}_{stator_{j,N_r}}\right) \cdot 10^2\right)}{10^2} = 70.0 \cdot 10^{-3}$$

Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

$r := 1$

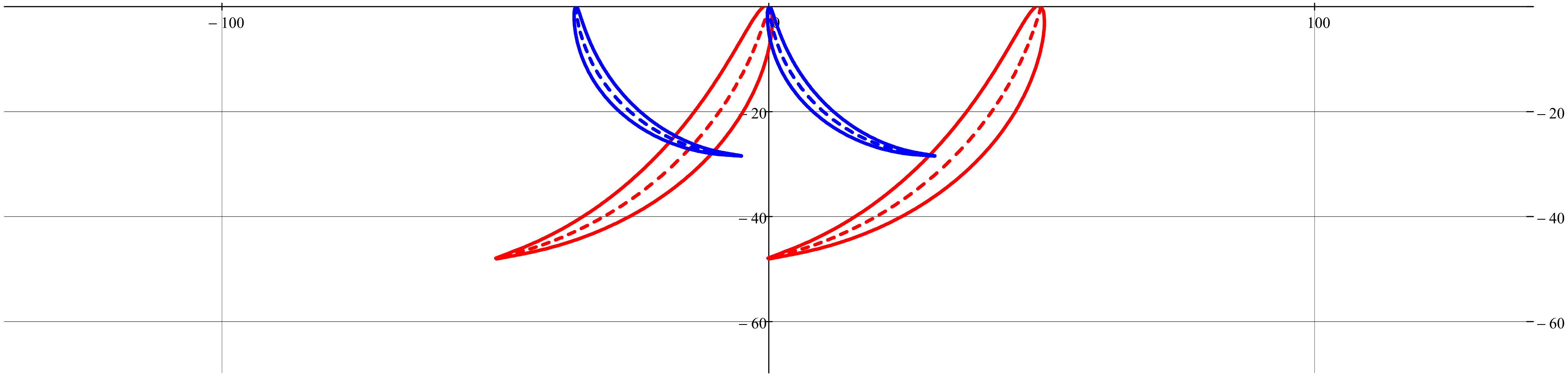


$r = av(N_r)$



$r = N_r$

Решетка ступени на Δ-как скоростей



Построение плоских решеток профилей Л на треугольниках скоростей

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

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

Поперечная часть ступени

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

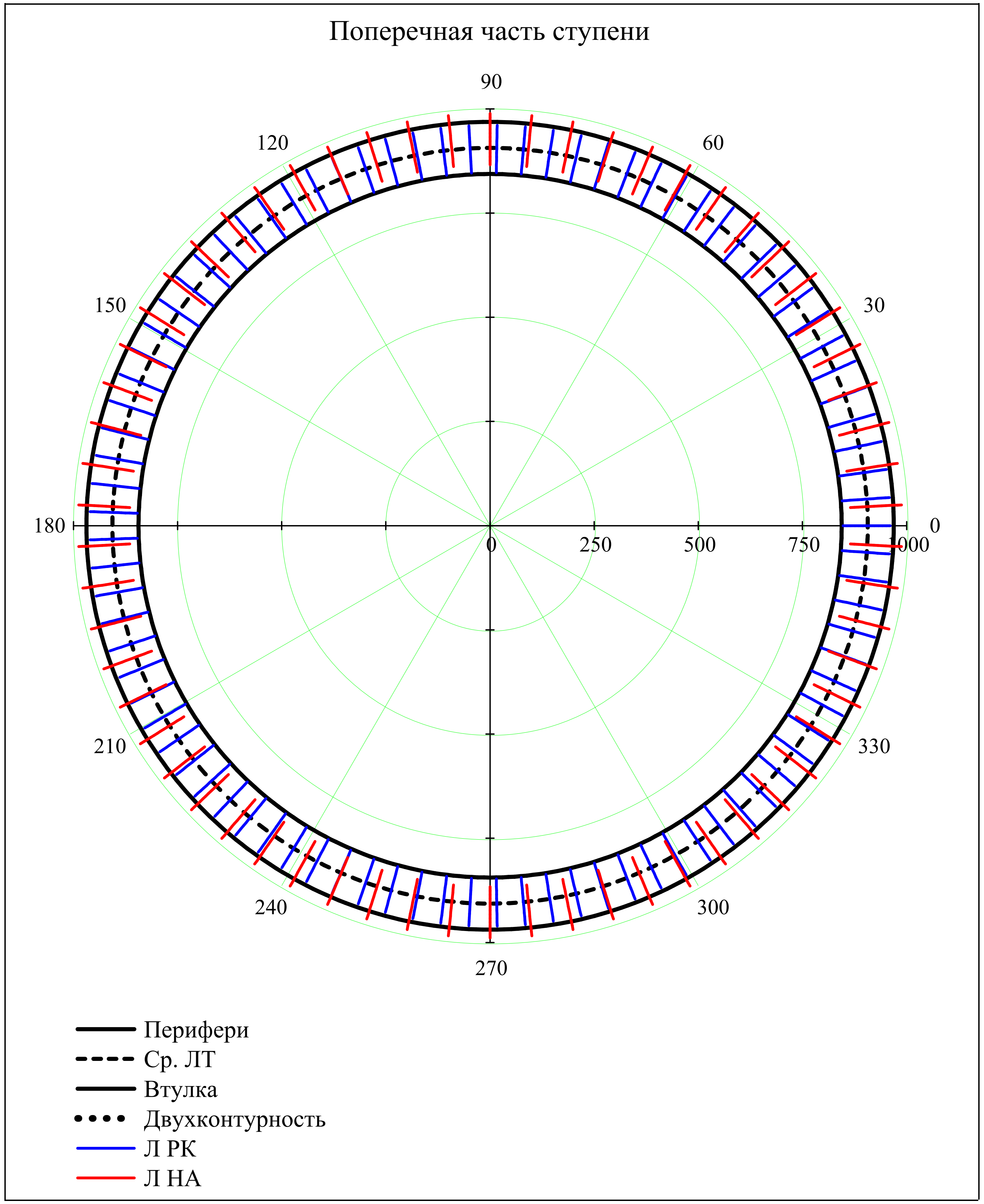
$$i_{rotor} := 1 .. Z_{rotor_j}$$

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

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

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

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



Поперечная часть ступени

Расчет собственных частот колебаний Л

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

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

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3263	1318	1559	1694	1618	1636	1616	1298
2	20449	8261	9769	10618	10139	10252	10130	8134
3	57262	23133	27357	29734	28391	28708	28368	22777
4	112296	45365	53649	58311	55677	56299	55632	44667
5	185556	74961	88649	96353	92001	93028	91925	73807
6	277118	111950	132392	143897	137398	138932	137285	110226

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

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

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

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

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

Расчет собственных частот колебаний Л

Вывод результатов расчета собственных частот колебаний Л

Расчетный узел: $type = "turbine"$

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

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

Расчет Л на прочность

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

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

Определение координат точек профиля Л, наиболее удаленных от НЛ

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

	1	2	3	4
1	-1.160	-1.024	-0.986	-1.003
2	0.261	0.336	0.342	-0.616
3	0.241	0.281	0.268	0.223

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

	1	2	3	4
1	4.927	5.365	5.441	5.299
2	3.698	3.973	3.956	3.765
3	3.189	3.344	3.240	3.002

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

	1	2	3	4
1	28.375	28.028	27.933	28.008
2	25.969	25.738	25.725	25.849
3	23.420	23.278	23.334	23.497

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

	1	2	3	4
1	-7.980	-10.413	-10.906	-10.223
2	-8.576	-10.135	-10.108	-9.138
3	-8.916	-9.837	-9.322	-8.081

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

	1	2	3	4
1	-6.048	18.972	16.627	15.685
2	14.809	34.565	38.064	22.591
3	-11.210	-18.804	-18.046	37.611

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

	1	2	3	4
1	29.582	4.200	5.221	6.027
2	38.137	20.800	13.898	8.774
3	7.817	9.146	23.918	15.820

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

	1	2	3	4
1	-9.648	-27.201	-27.296	-26.659
2	2.702	-20.244	-22.418	-24.751
3	34.492	34.701	10.465	-19.527

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

	1	2	3	4
1	-39.707	-6.703	-9.605	-12.000
2	-30.181	-20.609	-18.668	-15.935
3	-22.276	-20.913	-39.336	-22.312

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

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

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

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

$\cdot 10^{6}$

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

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

$\cdot 10^{6}$

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

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

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

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

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

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

$\cdot 10^{6}$

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

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

$\cdot 10^{6}$

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

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

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

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

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

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

$\sigma_{rotor}{}^T =$ (table) $\cdot 10^6$

	1	2	3	4
1	113.20	114.67	95.63	80.56
2	97.50	97.27	77.14	56.67
3	22.50	32.20	20.77	3.32

$\sigma_{stator}{}^T =$ (table) $\cdot 10^6$

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

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

$safety_{rotor}{}^T =$

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

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

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

$safety_{stator}{}^T =$

	1	2
1	00000000000000000000000000000000	
2	44.88	
3	3.77	

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

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

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

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

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

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

$\cdot 10^{-3}$

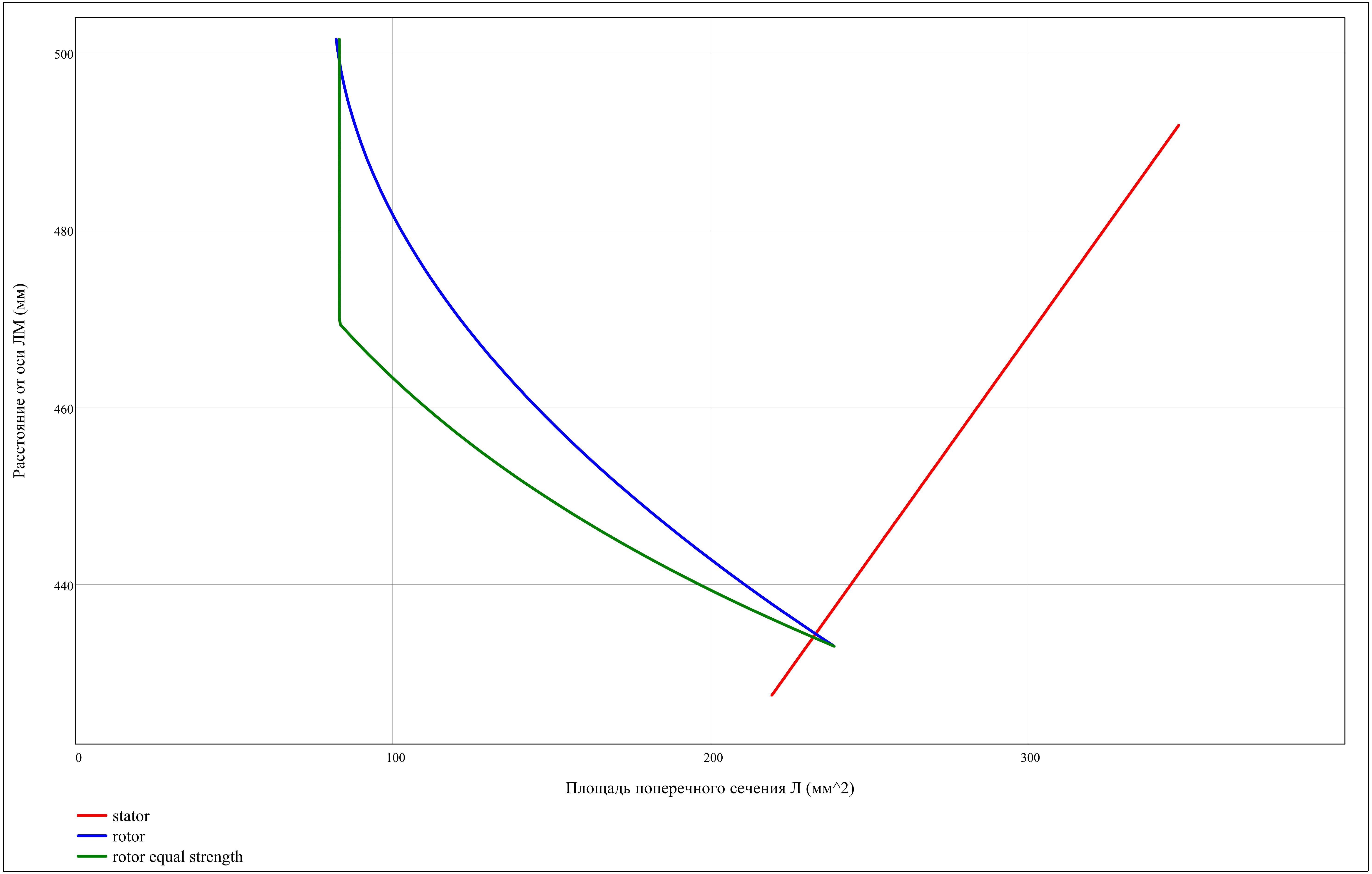
Дискретизация по высоте Л:

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

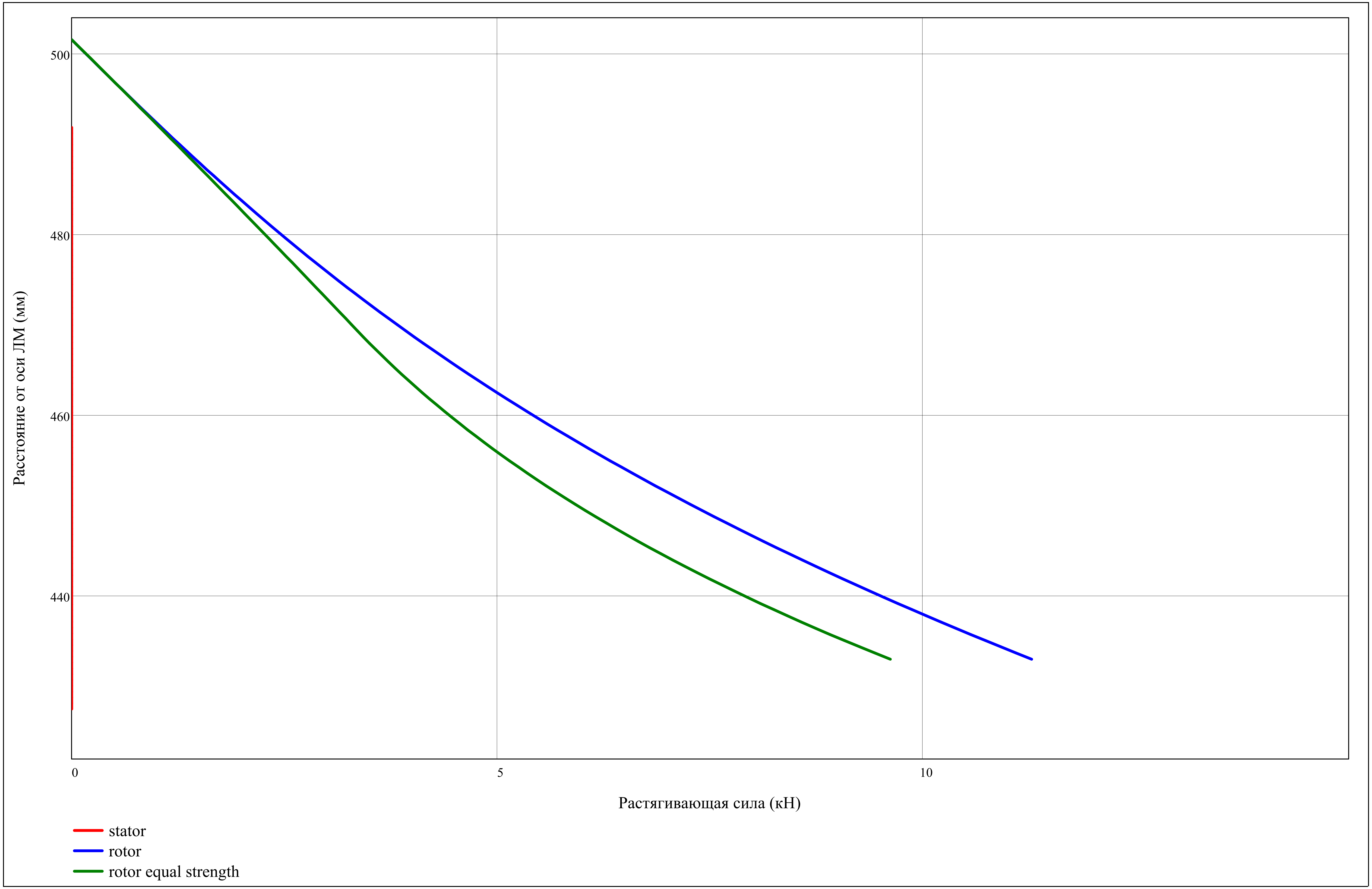
$$z_{rotor} := \left| \begin{array}{l} \text{mean}(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}), \text{mean}(Rj_{1,1}, Rj_{2,1}) + \frac{\text{mean}(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}) - \text{mean}(Rj_{1,1}, Rj_{2,1})}{100} .. \text{mean}(Rj_{1,N_r}, Rj_{2,N_r}) \text{ if } type = \text{"compressor"} \\ \text{mean}(Rj_{2,1}, Rj_{3,1}),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

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

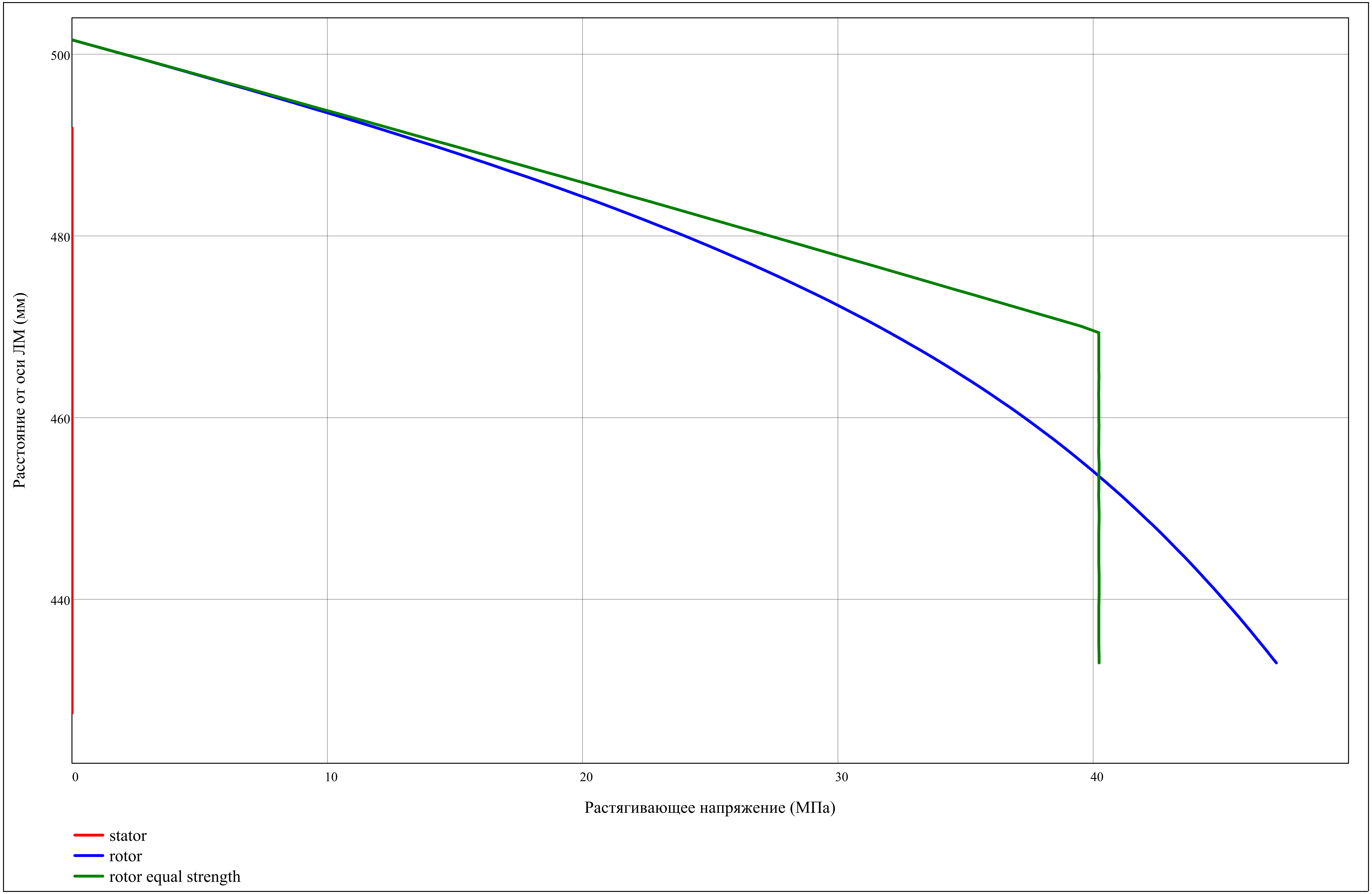
Результаты расчета на прочность Л

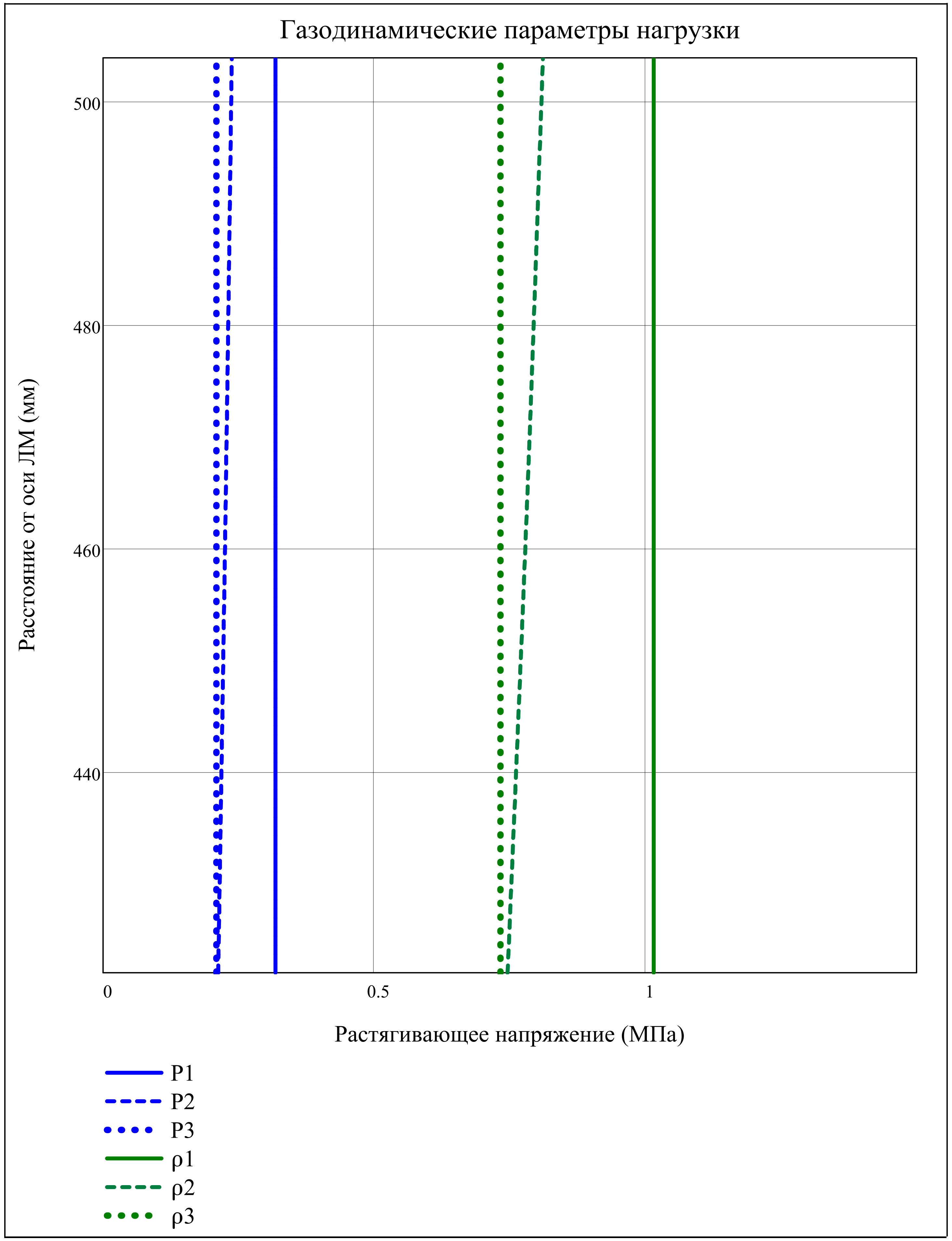


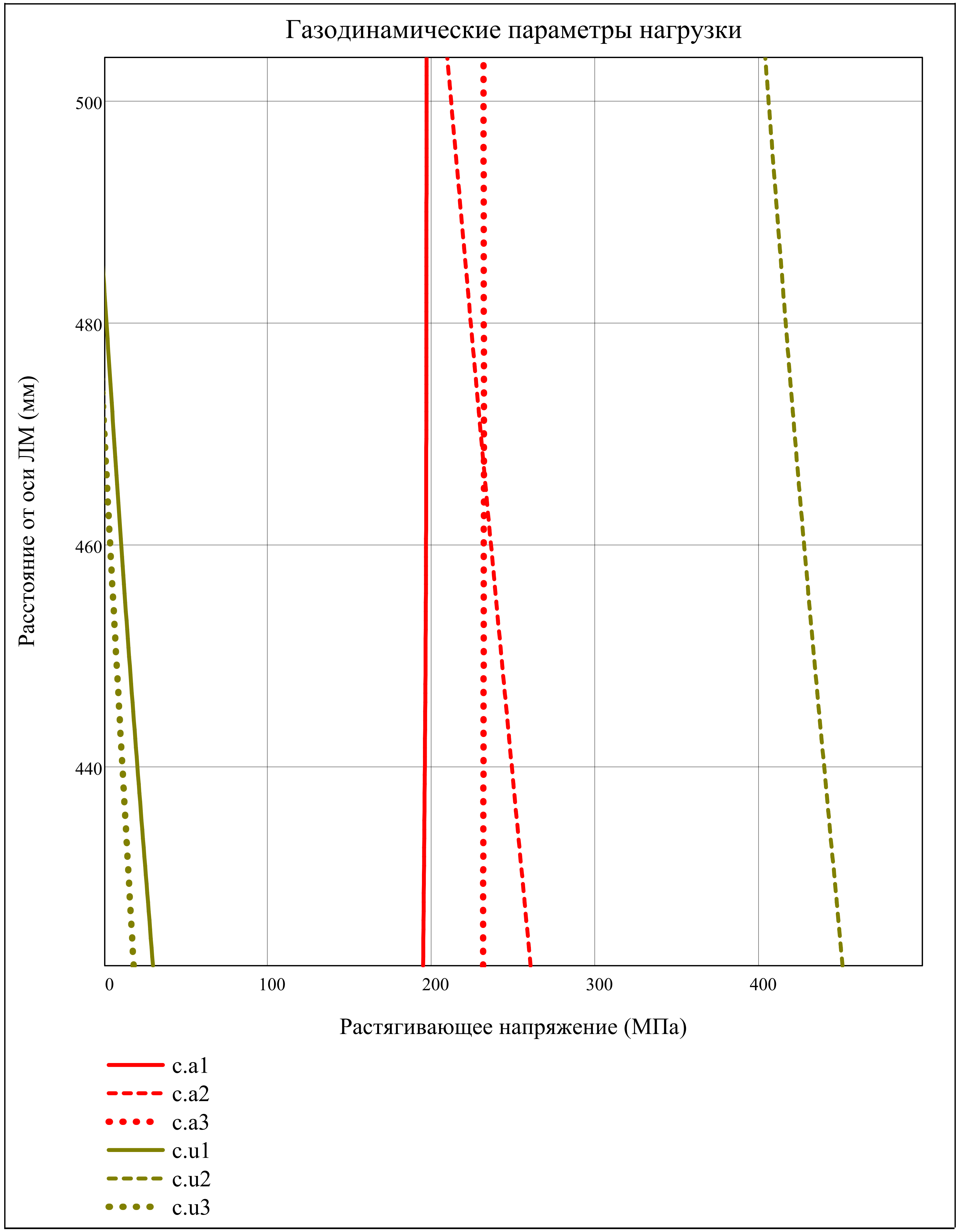
500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
0
100
200
300
Площадь поперечного сечения Л (мм^2)
stator
rotor
rotor equal strength

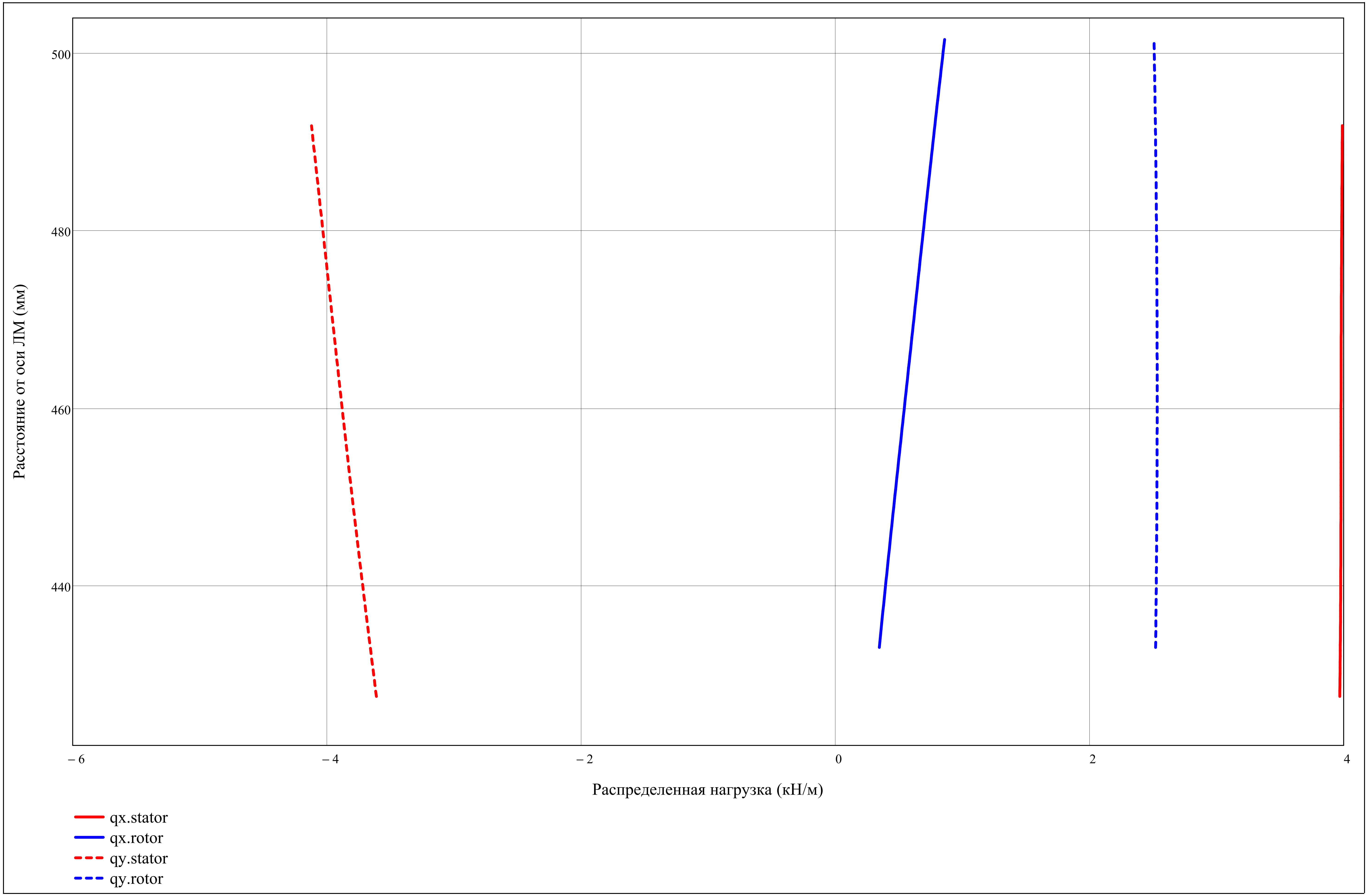


500
480
460
440
0
5
10
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Растягивающая сила (кН)
stator
rotor
rotor equal strength

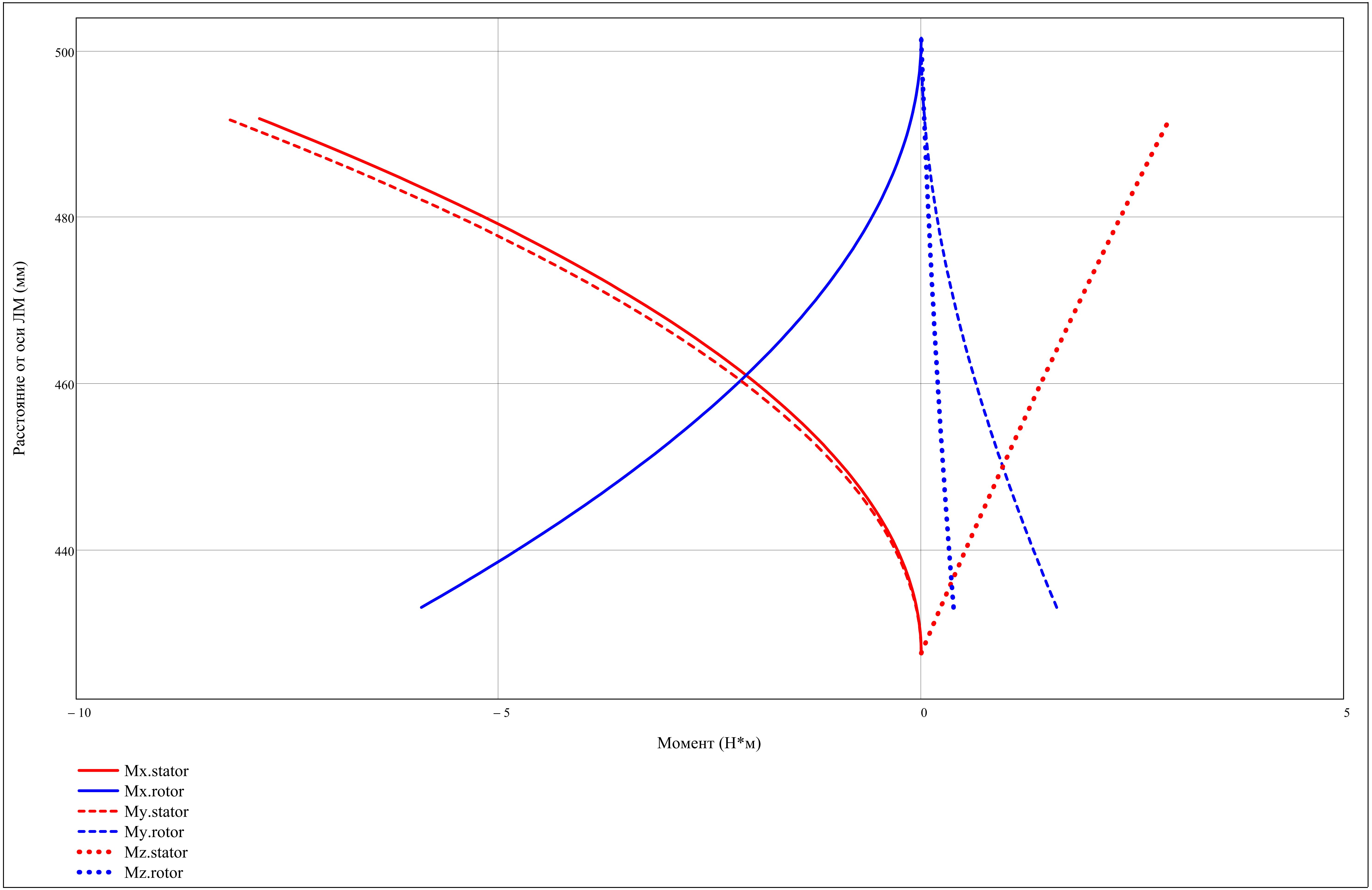

500
480
460
440
0
10
20
30
40
Расстояние от оси ЛМ (мм)
Растягивающее напряжение (МПа)
stator
rotor
rotor equal strength

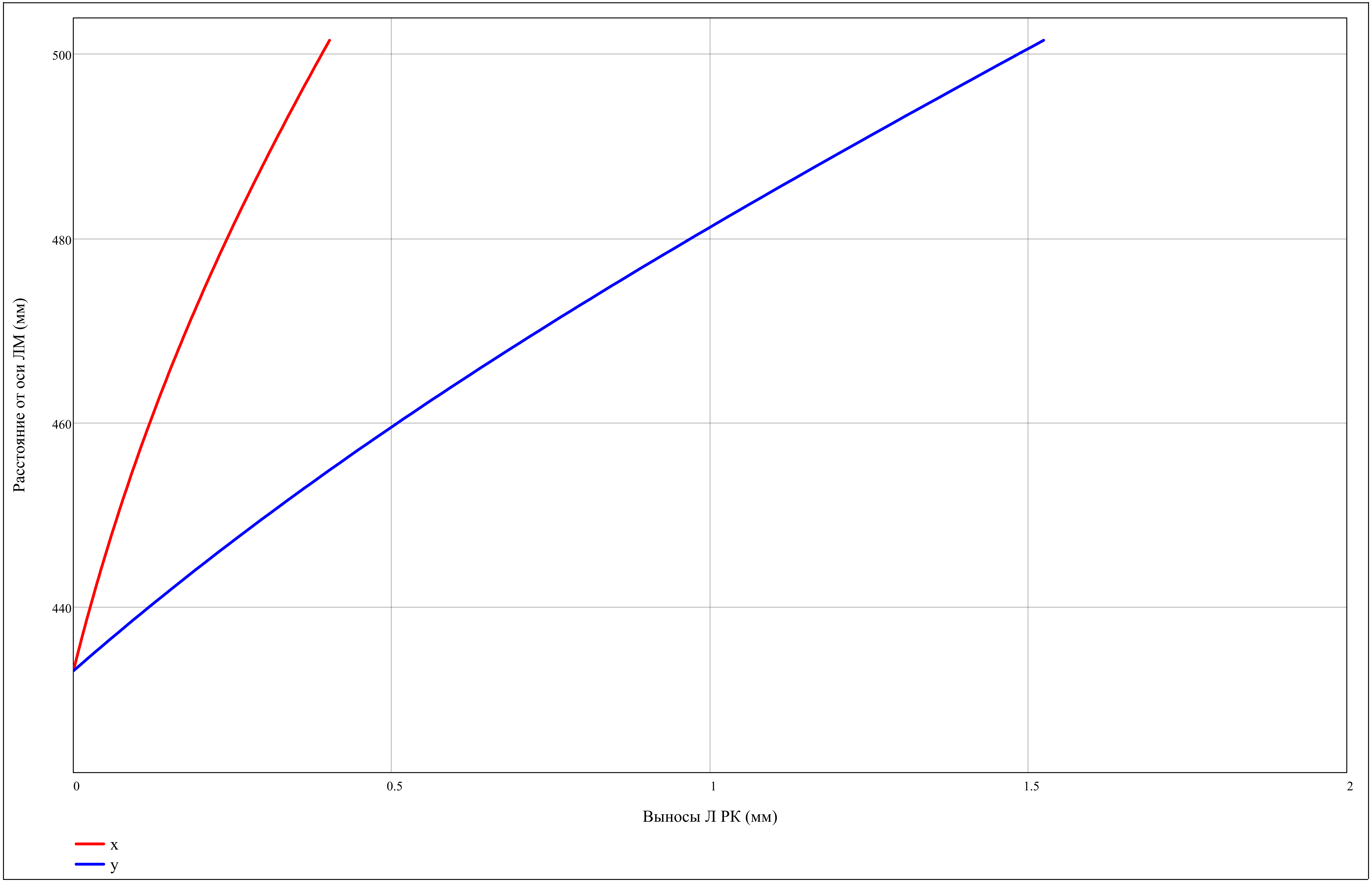

Газодинамические параметры нагрузки
Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
0
0.5
1
Растягивающее напряжение (МПа)
P1
P2
P3
ρ1
ρ2
ρ3


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

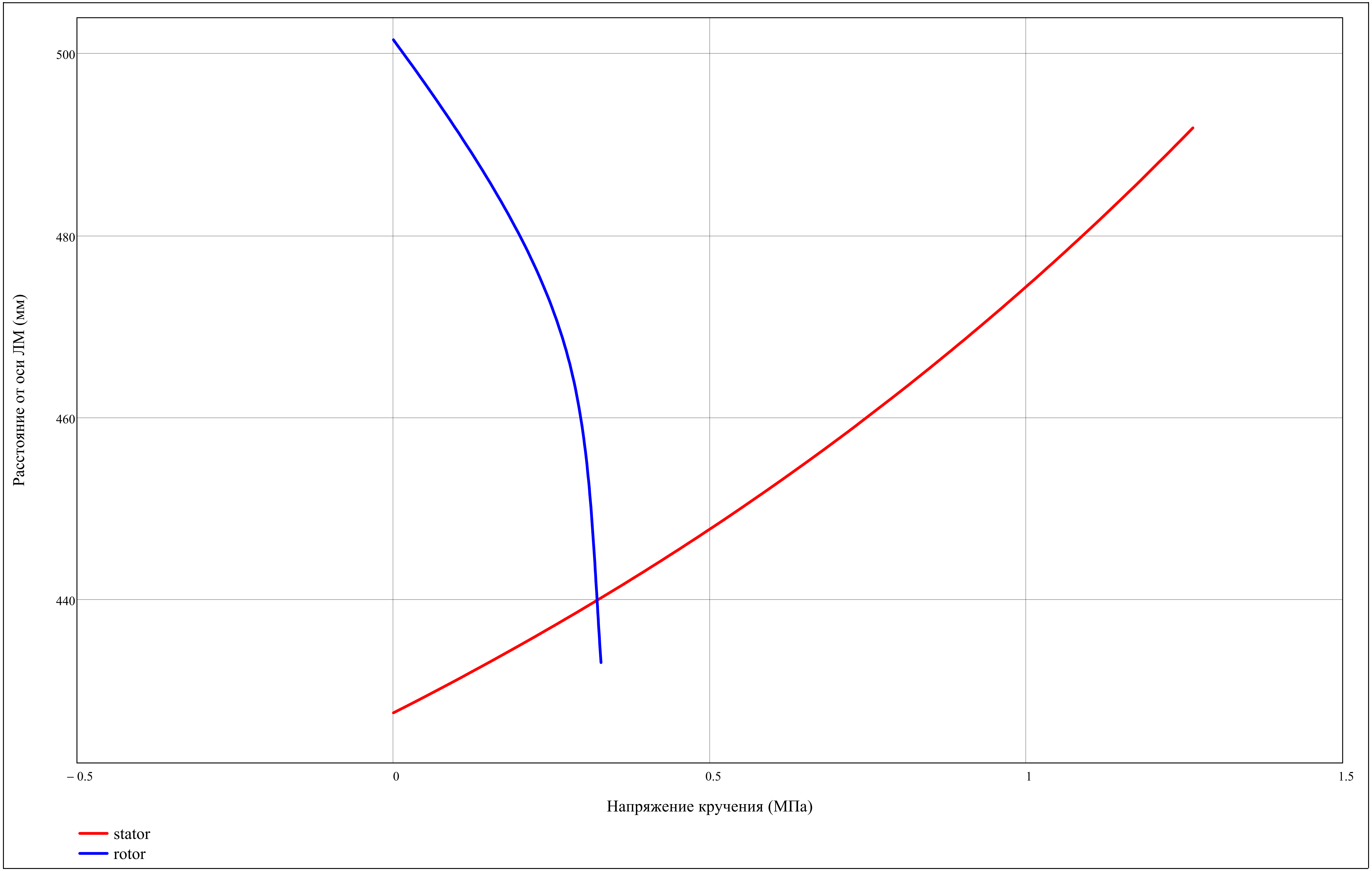


500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
− 6
− 4
− 2
0
2
4
Распределенная нагрузка (кН/м)
qx.stator
qx.rotor
qy.stator
qy.rotor

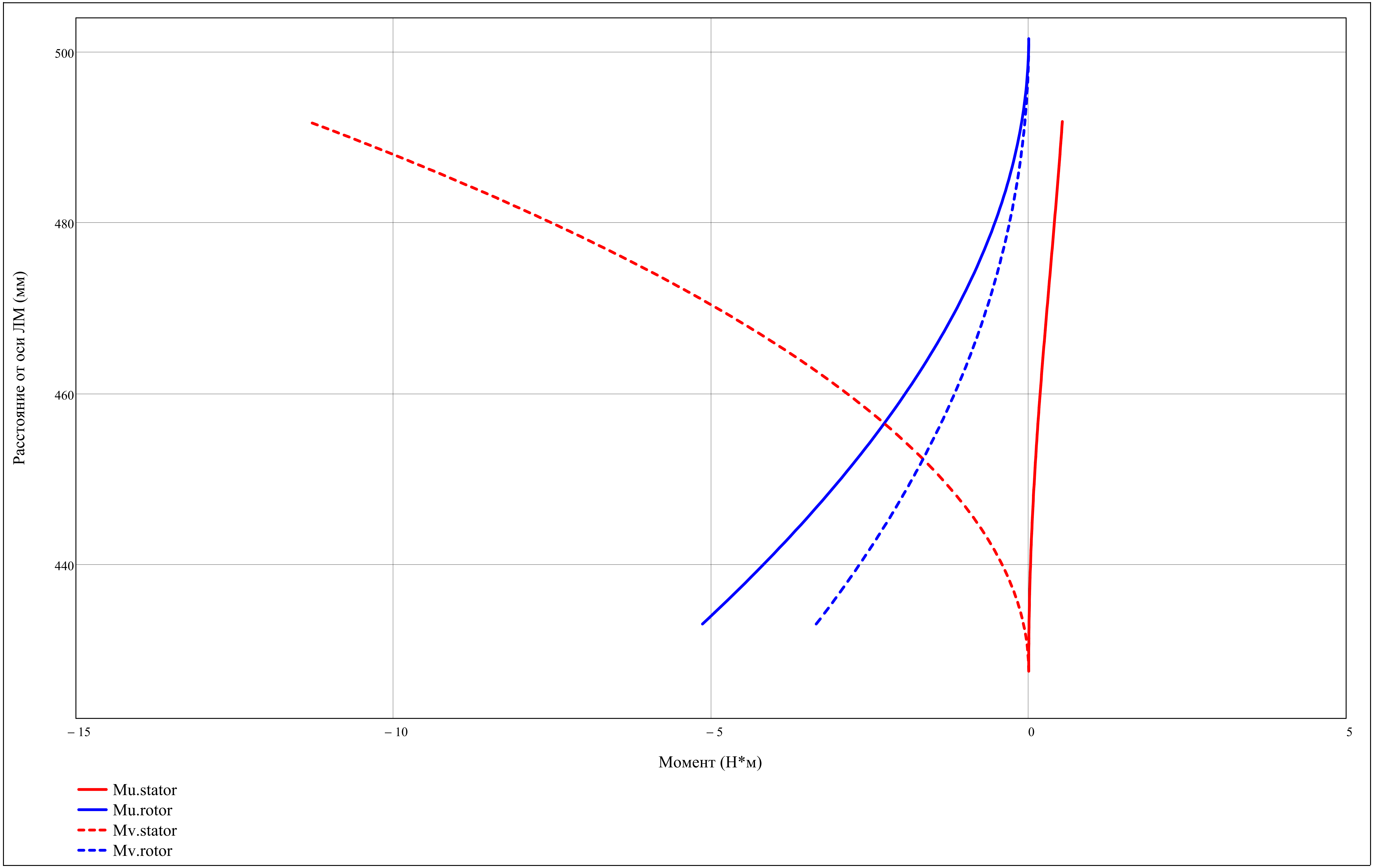

500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 10
– 5
0
5
Момент (Н*м)
Mx.stator
Mx.rotor
My.stator
My.rotor
Mz.stator
Mz.rotor



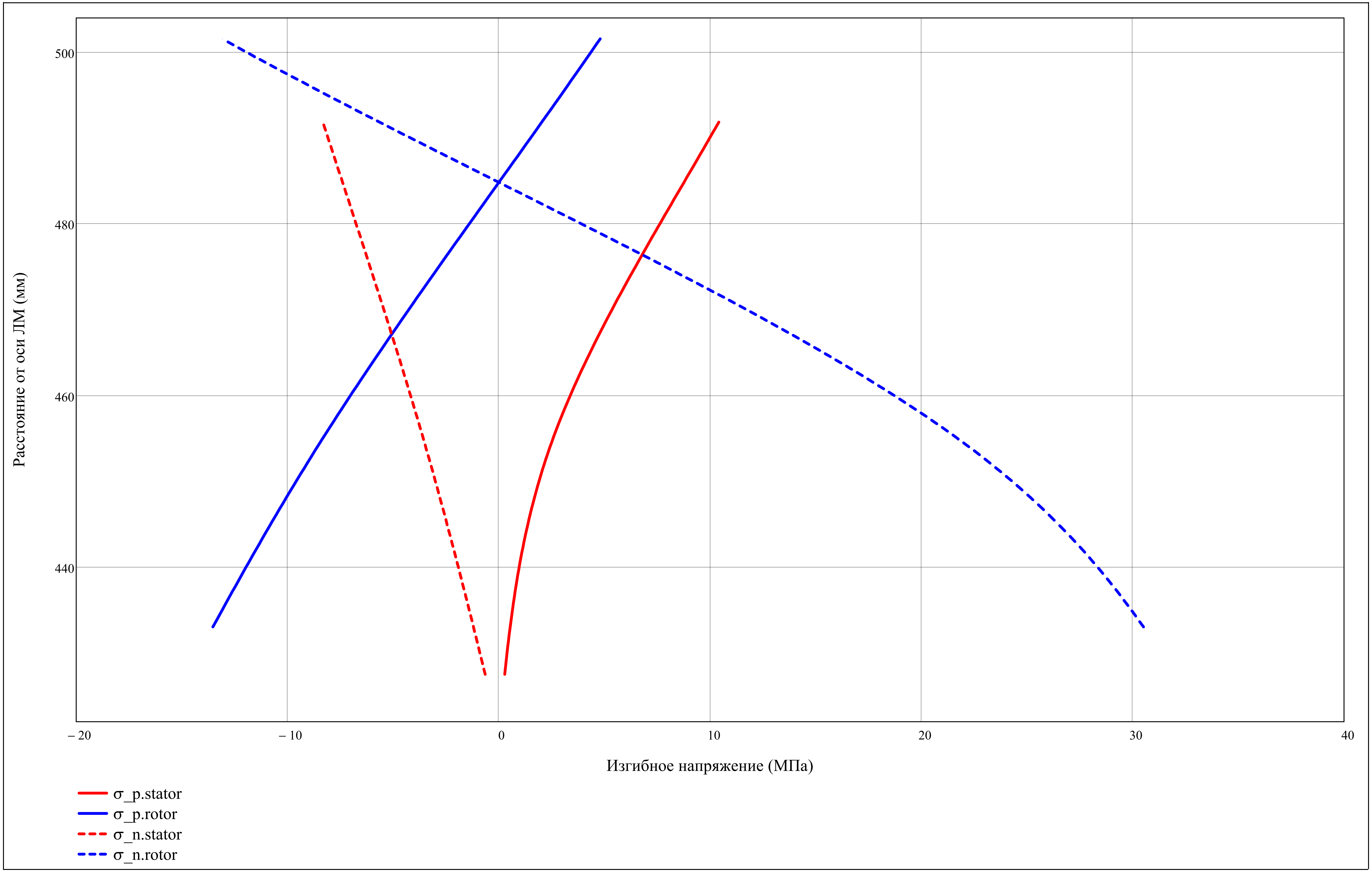
Расстояние от оси ЛМ (мм)
500
480
460
440
0
0.5
1
1.5
2
Выносы Л РК (мм)
x
y



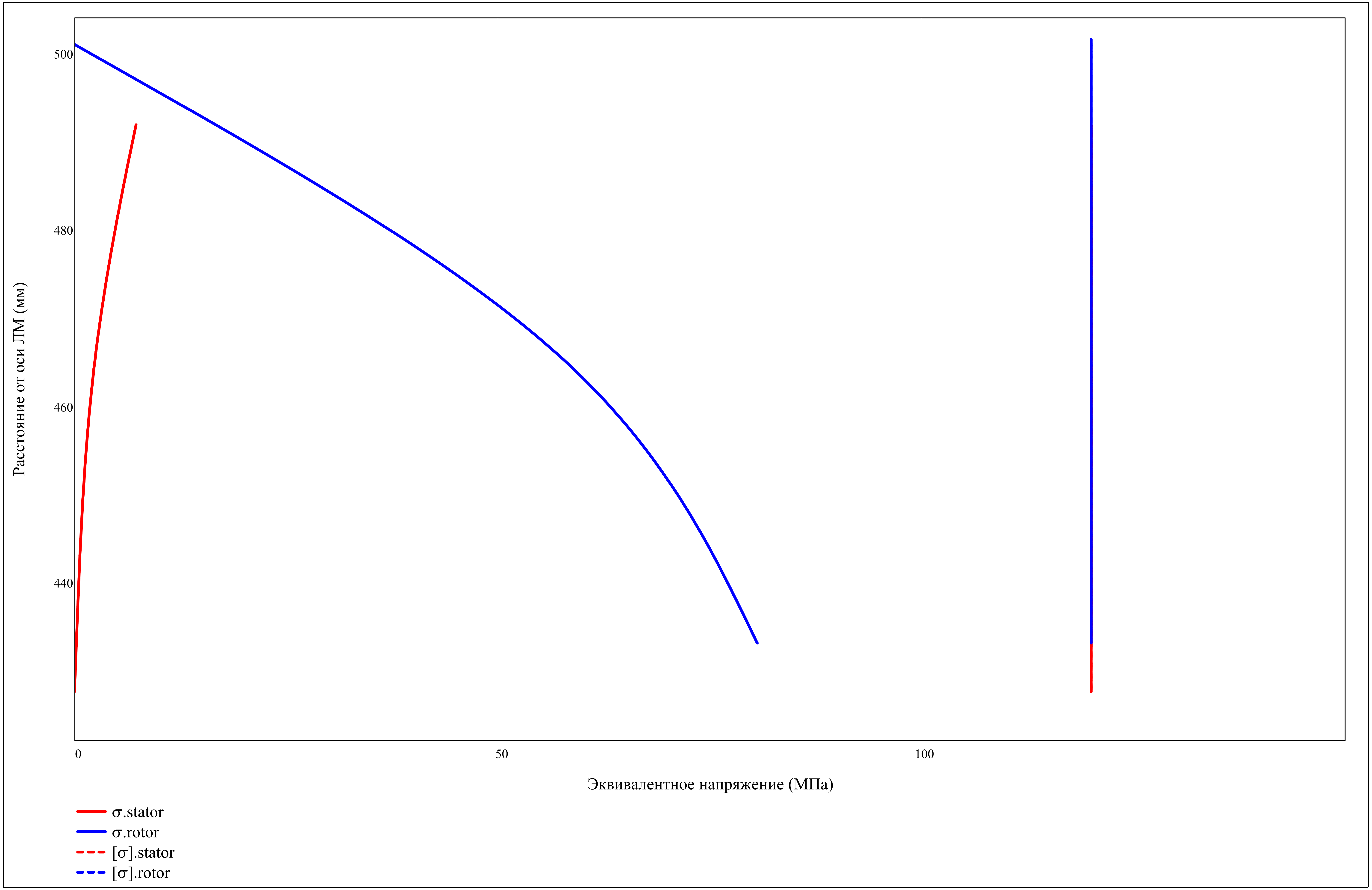
500
480
460
440
Расстояние от оси ЛМ (мм)
– 0.5
0
0.5
1
1.5
Напряжение кручения (МПа)
stator
rotor



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



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



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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

$$\begin{pmatrix} u\_u_{rotor_{j,r}} & v\_u_{rotor_{j,r}} \\ u\_l_{rotor_{j,r}} & v\_l_{rotor_{j,r}} \\ u\_u_{stator_{j,r}} & v\_u_{stator_{j,r}} \\ u\_l_{stator_{j,r}} & v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c|c} & 1 & 2 \\ \hline 1 & -0.62 & 3.77 \\ 2 & 25.85 & -9.14 \\ 3 & 22.59 & 8.77 \\ 4 & -24.75 & -15.93 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

Изгибные напряжения (Па):

$$\begin{pmatrix} \sigma\_p_{rotor_{j,r}} & \sigma\_p_{stator_{j,r}} \\ \sigma\_n_{rotor_{j,r}} & \sigma\_n_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c|c} & 1 & 2 \\ \hline 1 & -8.8 & 2.3 \\ 2 & 22.6 & -3.4 \end{array} \cdot 10^{6}$$

Эквивалентные напряжения (Па):

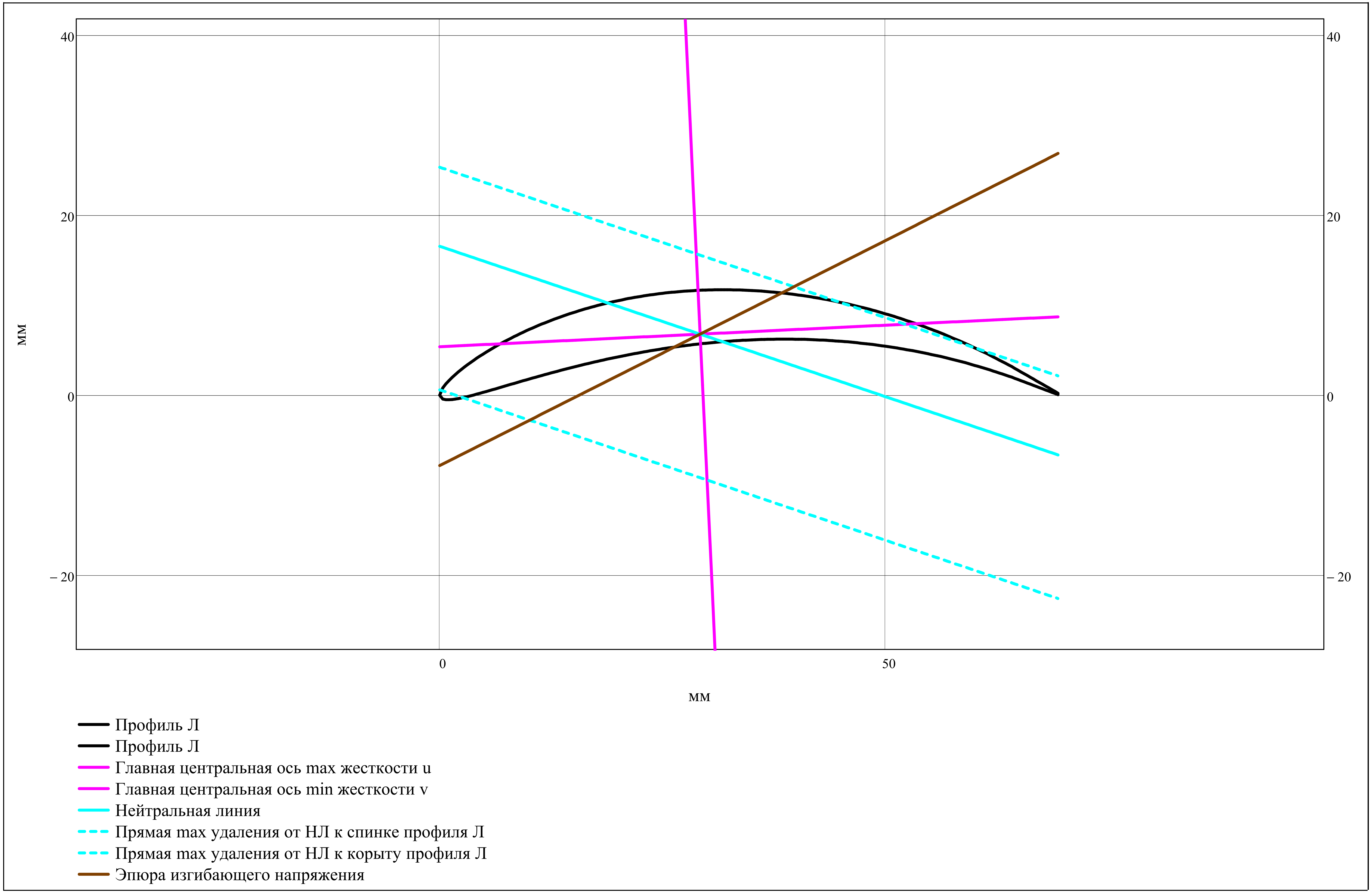
$$\begin{pmatrix} \sigma_{stator_{j,r}} \\ \sigma_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 2.5 \\ 2 & 56.7 \end{array} \cdot 10^{6}$$

Коэф. запаса: $\begin{pmatrix} safety_{stator_{j,r}} \\ safety_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 48.515 \\ 2 & 2.117 \end{array}$

$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = "rotor" \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 8.774 \\ 2 & -15.935 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} x0 \\ y0 \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} x0_{rotor_{j,r}} \\ y0_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = "rotor" \\ \begin{pmatrix} x0_{stator_{j,r}} \\ y0_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 29.217 \\ 2 & 6.773 \end{array} \cdot 10^{-3}$$

$$chord = \left| \begin{array}{ll} chord_{rotor_{j,r}} & \text{if } blade = "rotor" \\ chord_{stator_{j,r}} & \text{if } blade = "stator" \end{array} \right. = 69.4 \cdot 10^{-3}$$


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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

	1	2
1	0.22	3.00
2	23.50	-8.08
3	37.61	15.82
4	-19.53	-22.31

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-0.1	8.7
2	0.2	-7.4

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	8.8
2	3.3

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

	1
1	13.626
2	36.173

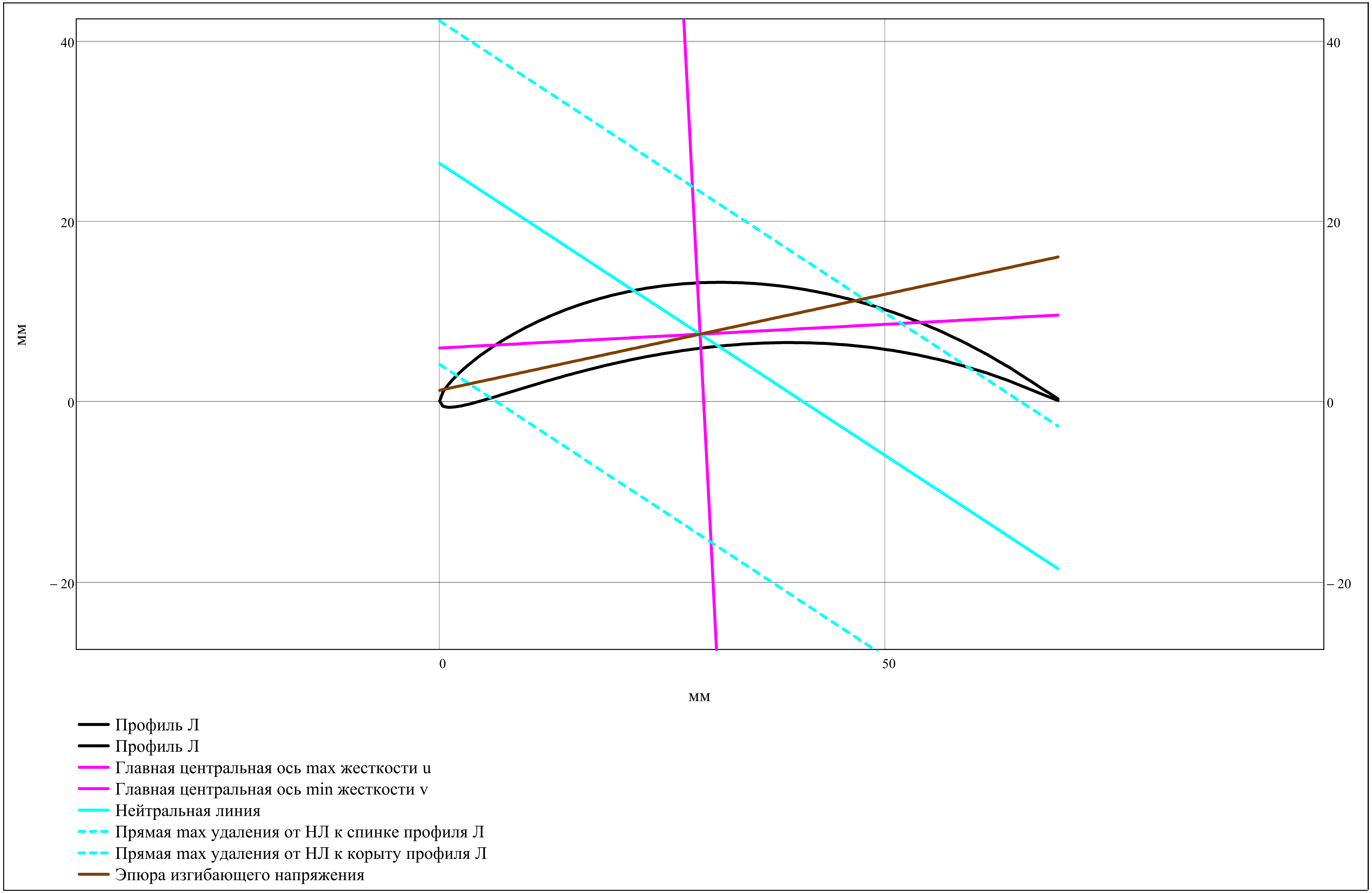
$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{(table)}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

	1
1	15.820
2	-22.312

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

	1
1	29.217
2	7.440

$$chord = \left| \begin{array}{ll} chord_{rotor_{j,r}} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ chord_{stator_{j,r}} & \text{if } blade = \text{"stator"} \end{array} \right. = 69.4 \cdot 10^{-3}$$



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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

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

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-15.9	0.1
2	33.4	-0.1

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	0.2
2	80.6

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

	1
1	751.571
2	1.490

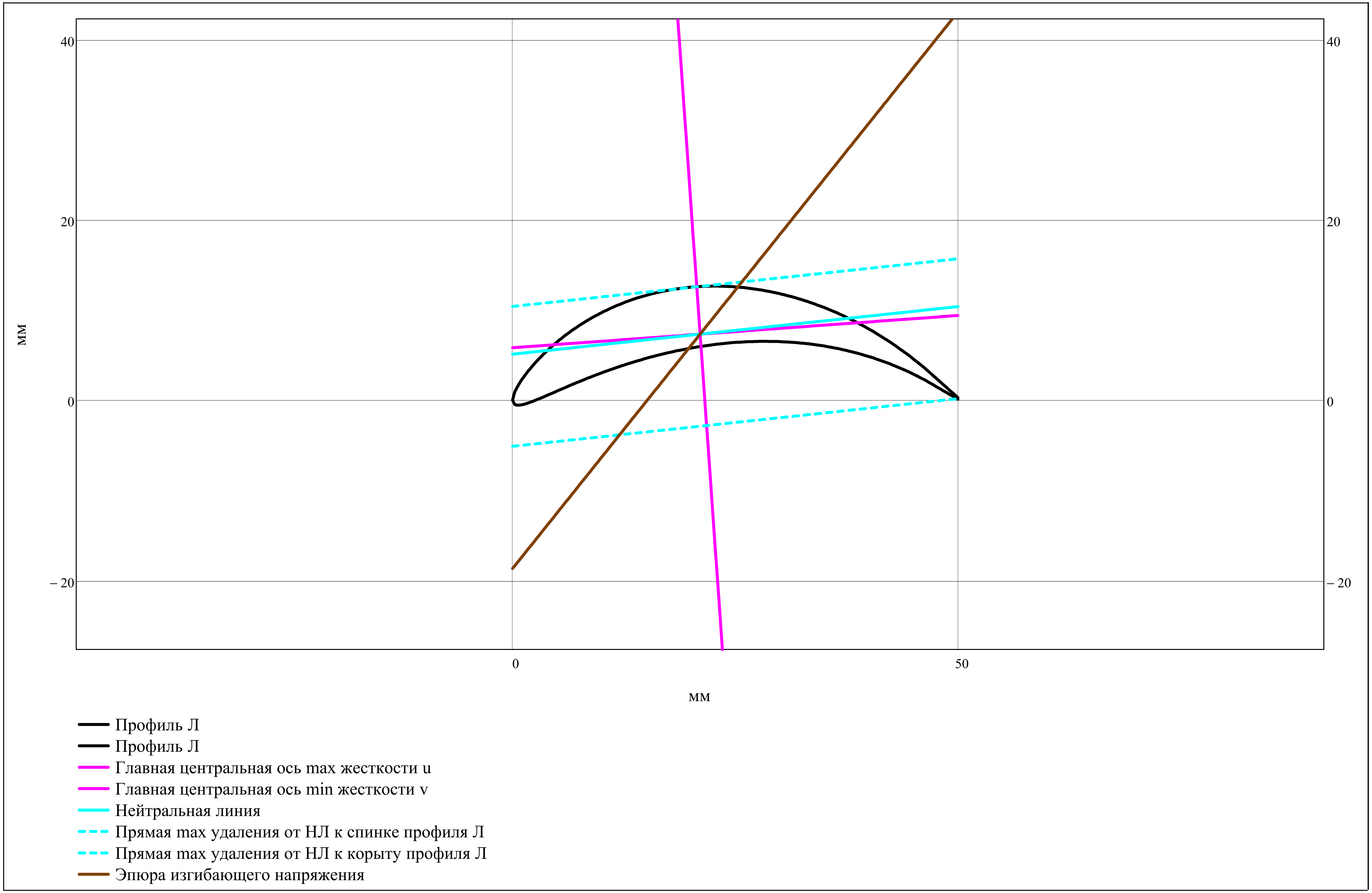
$$\begin{pmatrix} v\_p \\ v\_n \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} v\_u_{rotor_{j,r}} \\ v\_l_{rotor_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ \begin{pmatrix} v\_u_{stator_{j,r}} \\ v\_l_{stator_{j,r}} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \cdot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

	1
1	5.299
2	-10.223

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

	1
1	21.043
2	7.333

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



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

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

Наиболее удаленные точки от НЛ (мм):

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

	1	2
1	-0.62	3.77
2	25.85	-9.14
3	22.59	8.77
4	-24.75	-15.93

$\cdot 10^{-3}$

Изгибные напряжения (Па):

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

	1	2
1	-8.8	2.3
2	22.6	-3.4

$\cdot 10^{6}$

Эквивалентные напряжения (Па):

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

	1
1	2.5
2	56.7

$\cdot 10^{6}$

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

	1
1	48.515
2	2.117

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

	1
1	3.765
2	-9.138

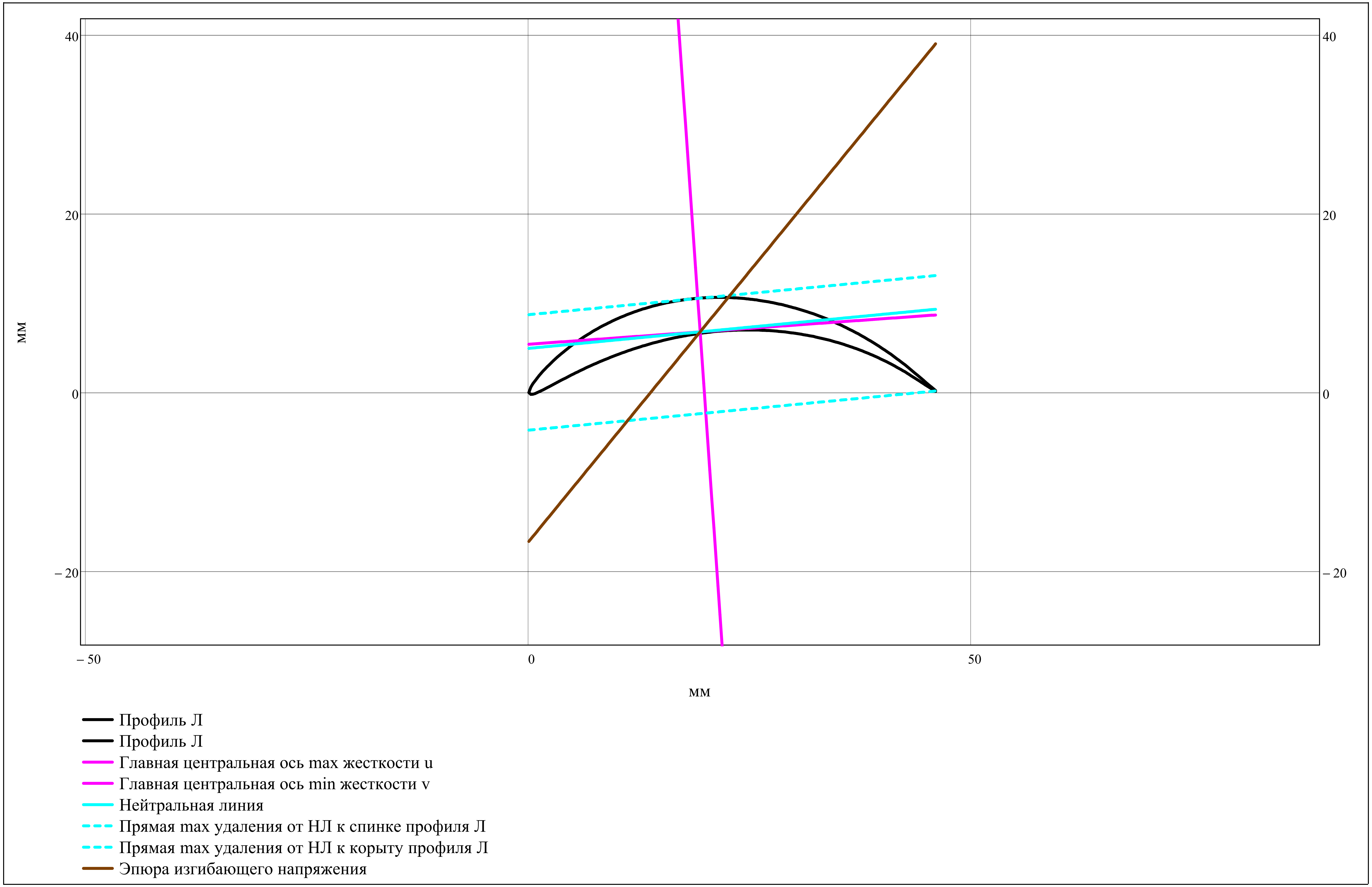
$\cdot 10^{-3}$

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

	1
1	19.349
2	6.782

$\cdot 10^{-3}$

$$chord = \left| \begin{array}{ll} chord_{rotor_{j,r}} & \text{if } blade = \text{"rotor"} \\ chord_{stator_{j,r}} & \text{if } blade = \text{"stator"} \end{array} \right. = 45.9 \cdot 10^{-3}$$



Результаты расчета на прочность Л

Вывод результатов расчета Л на прочность

Выбор материала Д

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

Выбранный материал Д: $material\_disk_i = \begin{array}{|l} \text{"ВЖ175"} \;\; \text{if } turbine = \text{"ТВД"} \\ \text{"ЭП742"} \;\; \text{if } turbine = \text{"ТНД"} \end{array}$

Плотность материала Д (кг/м^3):

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

Предел длительной прочности Д (Па):

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

$material\_disk^T =$

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

$\rho\_disk^T =$

	1	2	3	4
1	8320	8320	8320	8320

$\sigma\_disk\_long^T =$

	1	2	3	4
1	680	680	680	680

$\cdot 10^6$

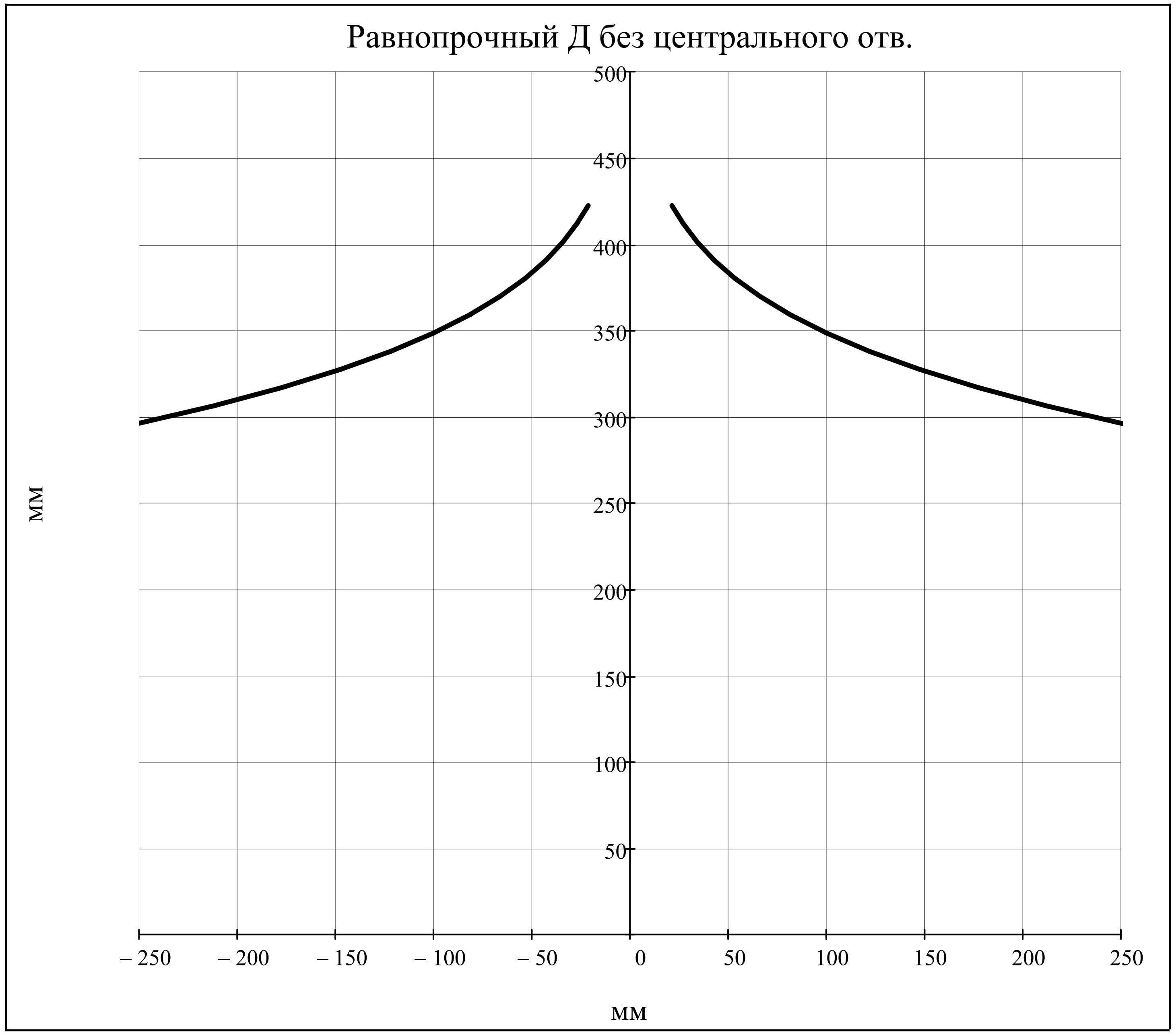
Выбор материала Д

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

Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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



Профилирование равнопрочного Д без центрального отв.

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

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

Вывод результатов охлаждения

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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