

***ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ РЕЗКИ  
ЛИСТОВОГО ПРОКАТА***

[ibzh@yandex.ru](mailto:ibzh@yandex.ru)

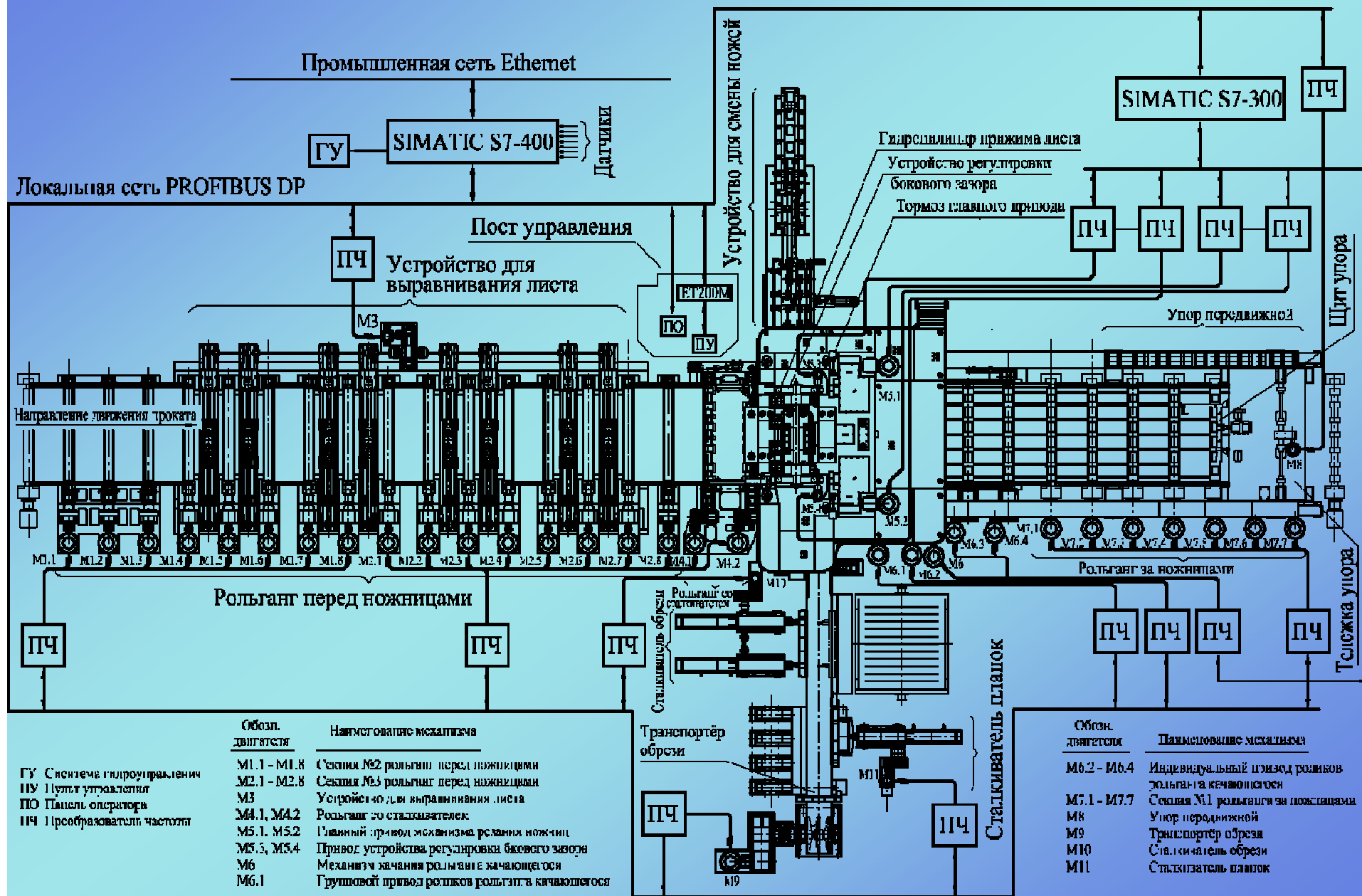
## ***Цель диссертационной работы:***

**исследование и оптимизация ЭМС управления комплексами резки листового проката, повышающие качество обрезанной кромки листов, увеличивающие производительность и снижающие энергозатраты.**

# ***Научные положения, выносимые на защиту:***

1. Математические модели ЭМС ножниц (одно- и двухкривошипных), учитывающие кинематику, динамику движения, энергетические оценки механизмов резания, и инструментальные средства в среде Matlab /Simulink, предназначенные для решения задач исследования и оптимизации систем управления НПР с учётом процесса резки.
2. Методика формирования траектории движения ножа средствами ЭМС управления двухкривошипными ножницами с электрической синхронизацией, обеспечивающая регулирование перекрытия ножей при резке листа.
3. Методика оптимизации электроприводов одно- и двух кривошипных ножниц по критериям энергосбережения и производительности.
4. Алгоритм управления электроприводом устройства регулировки бокового зазора с автоматической минимизацией энергозатрат за цикл резки листа, обеспечивающий повышение качества обрезанной кромки.
5. Методика расчёта режимов работы электроприводов механизмов комплекса резки листового проката по условию минимизации энергозатрат.

# Комплекс резки листового проката стана 2800

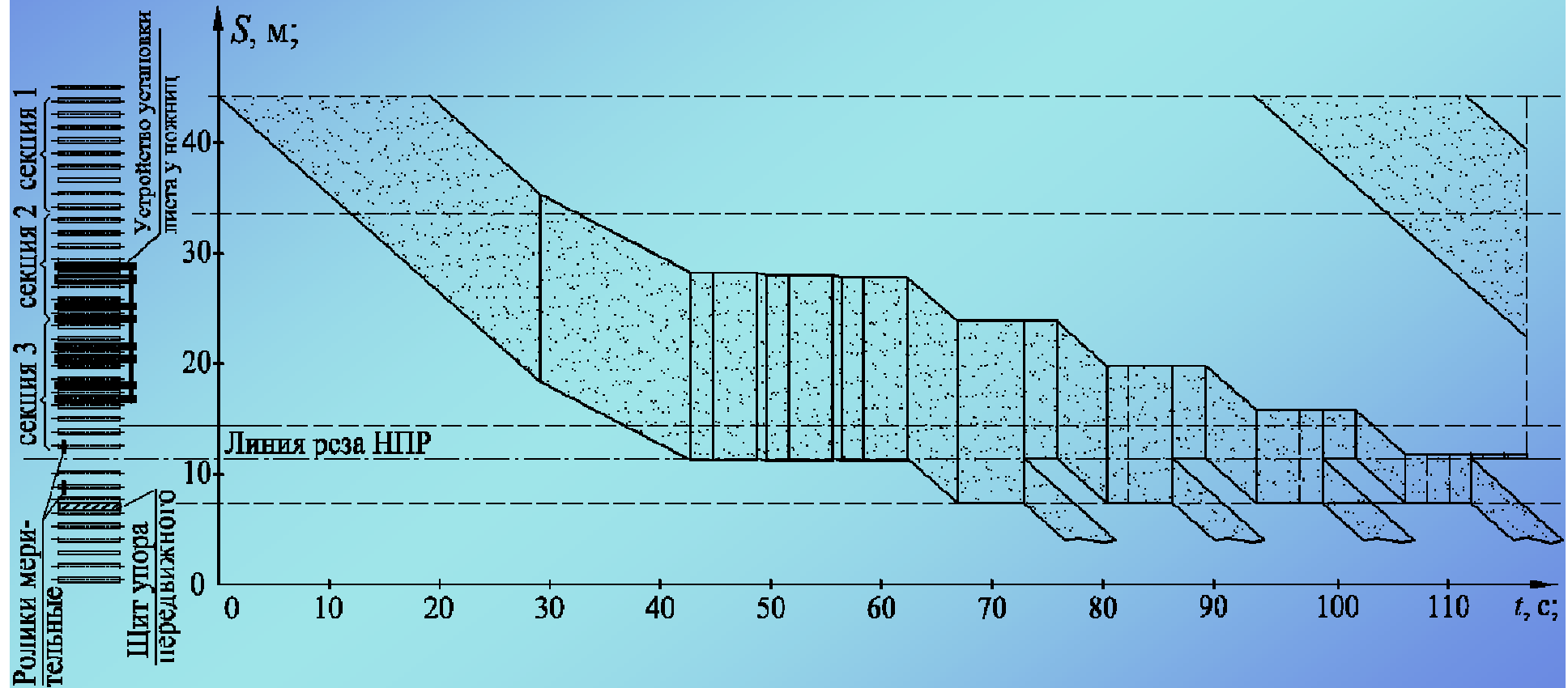


ГУ Система гидроуправления  
 ПУ Пульта управления  
 ПО Панель оператора  
 ПЧ Преобразователь частоты

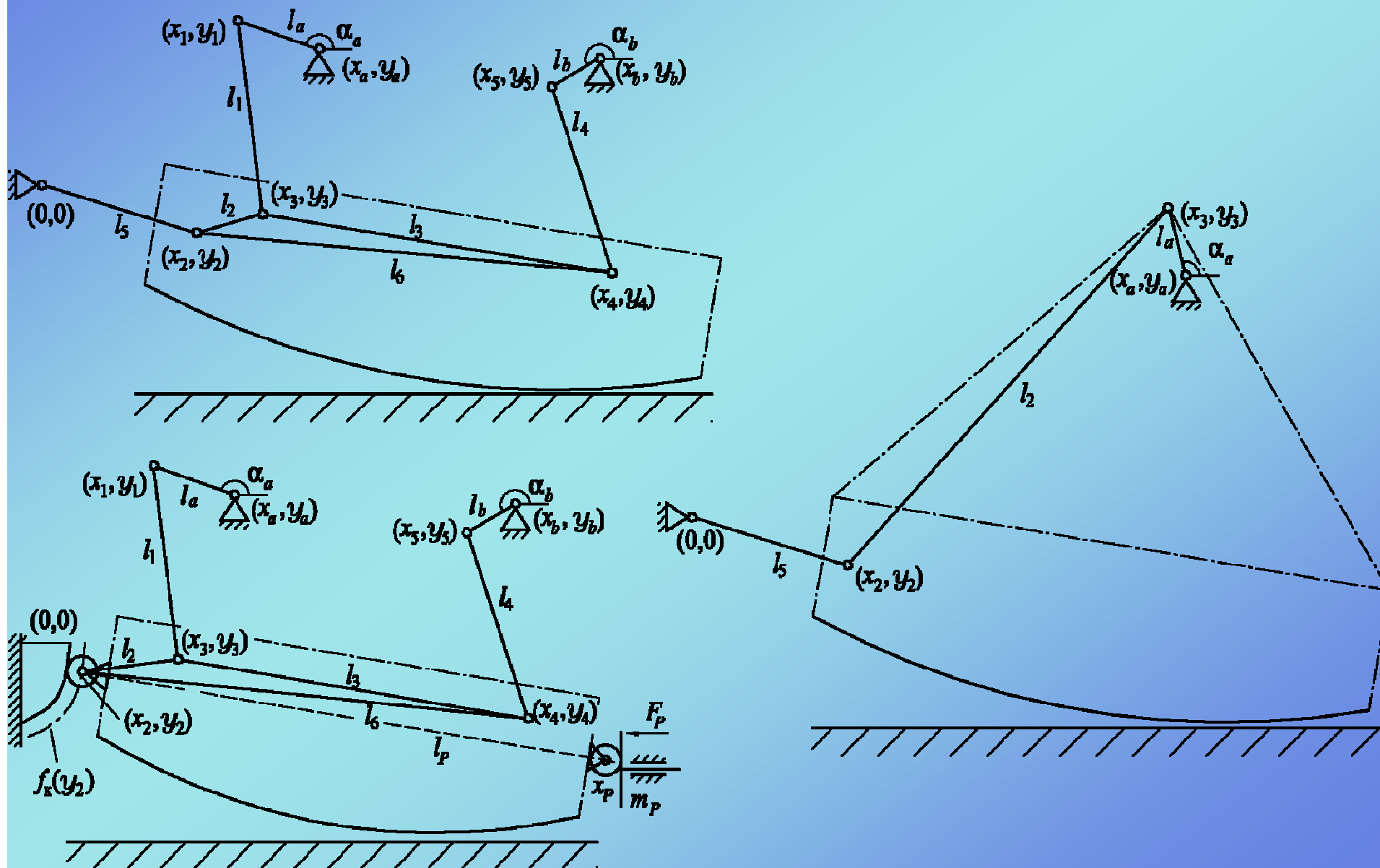
Обозн. двигателя	Наименование механизма
M1.1 - M1.8	Секция M2 рольганг перед ножницами
M2.1 - M2.8	Секция M3 рольганг перед ножницами
M3	Устройство для выравнивания листа
M4.1, M4.2	Рольганг со сталквателями
M5.1, M5.2	Главный привод механизма резания ножиц
M5.3, M5.4	Привод устройства регулировки бокового зазора
M6	Механизм зачистки рольганга и зачищается
M6.1	Групповой привод роликов рольганга качающегося

Обозн. двигателя	Наименование механизма
M6.2 - M6.4	Индивидуальный привод роликов рольганга качающегося
M7.1 - M7.7	Секция M1 рольганга за ножницами
M8	Упор передвижной
M9	Транспортер обреза
M10	Сталкватель обреза
M11	Сталкватель плашек

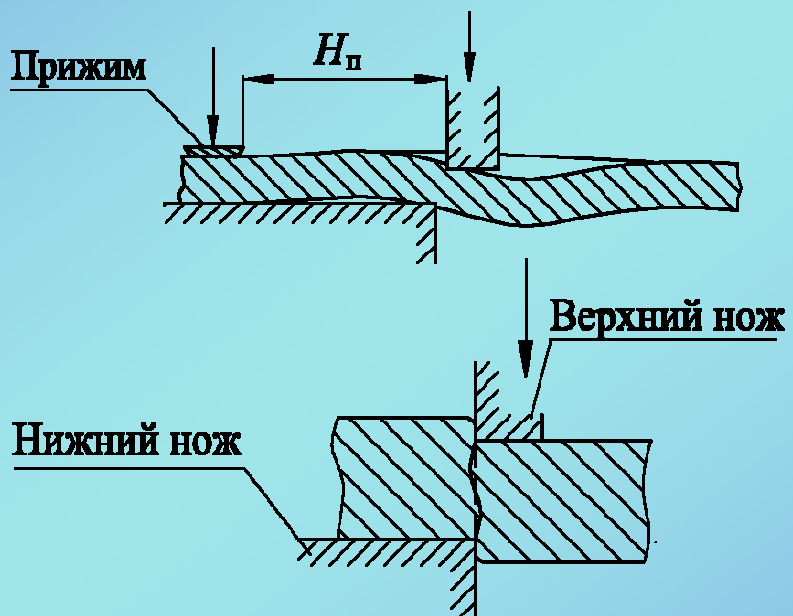
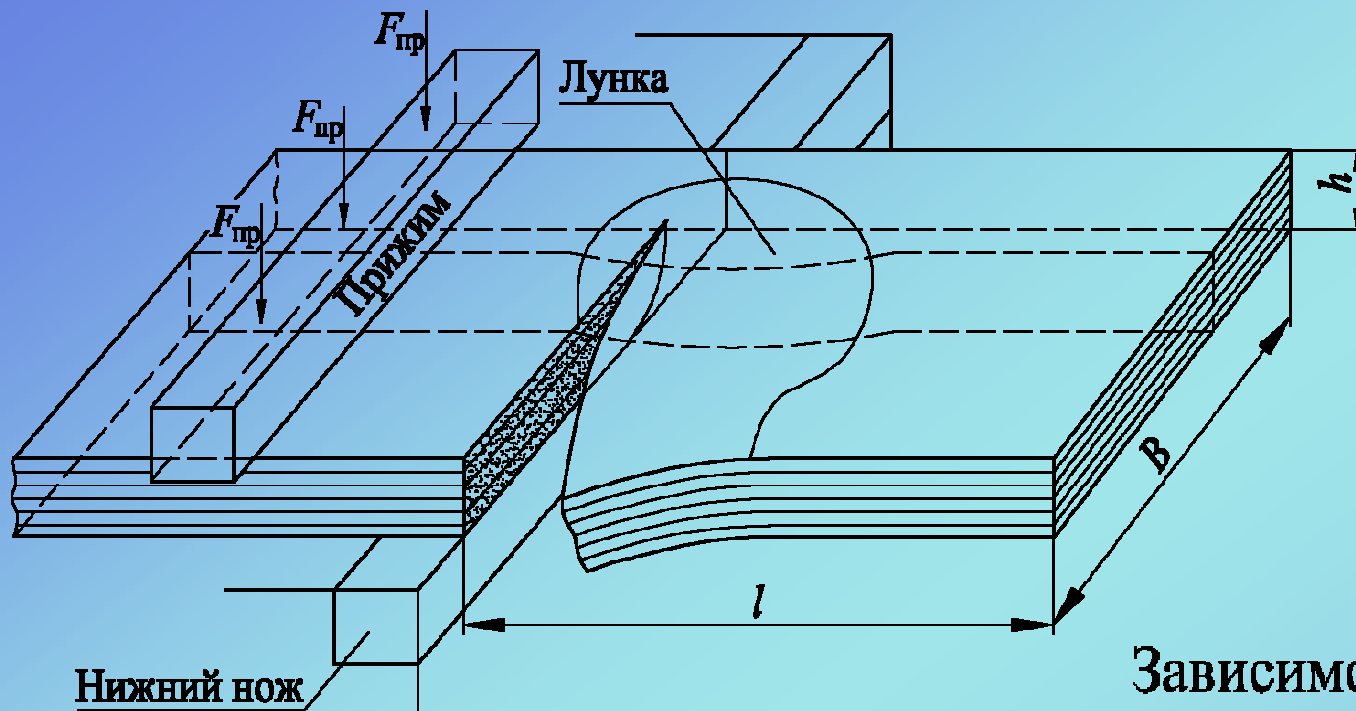
# График перемещения листа



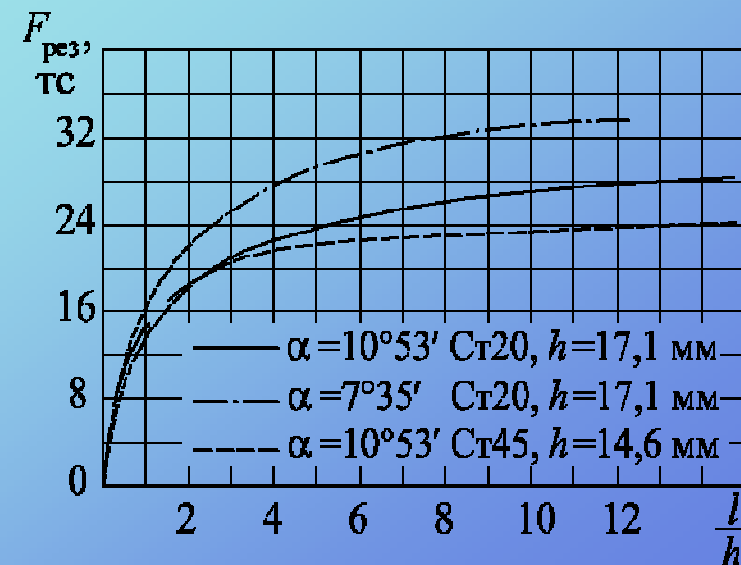
# Используемые конструкции ножниц



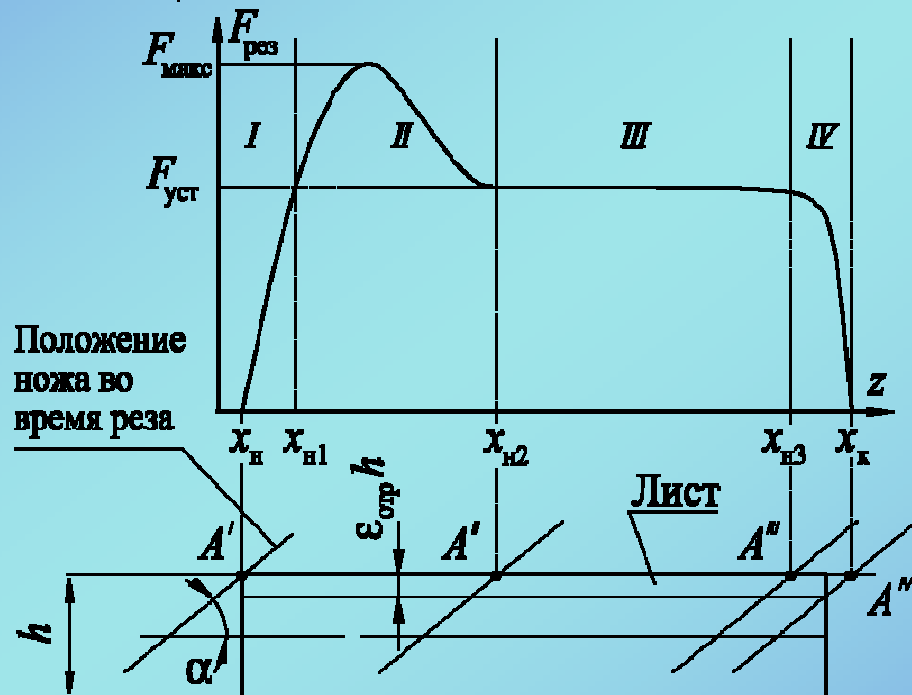
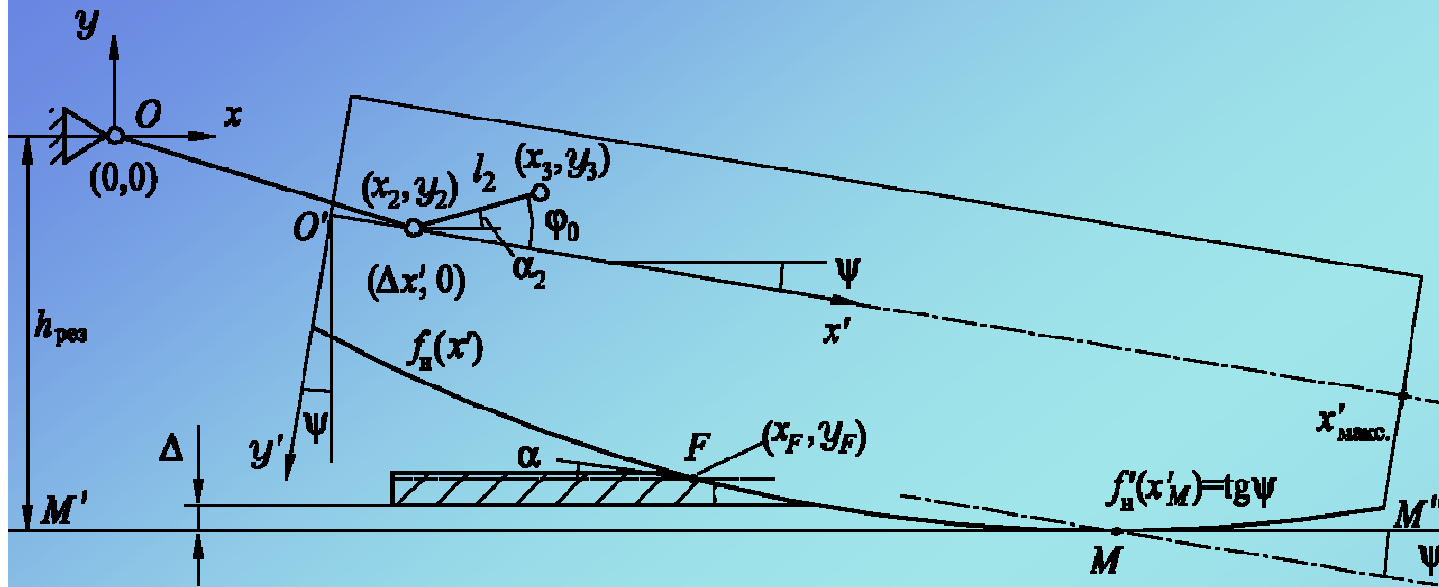
# ПРОЦЕСС РЕЗКИ ПРОКАТА



Зависимость усилия резки от длины отрезаемой части листа



# Математическое описание процесса резки



Формула зависимости  $F_{рез}(x_A)$

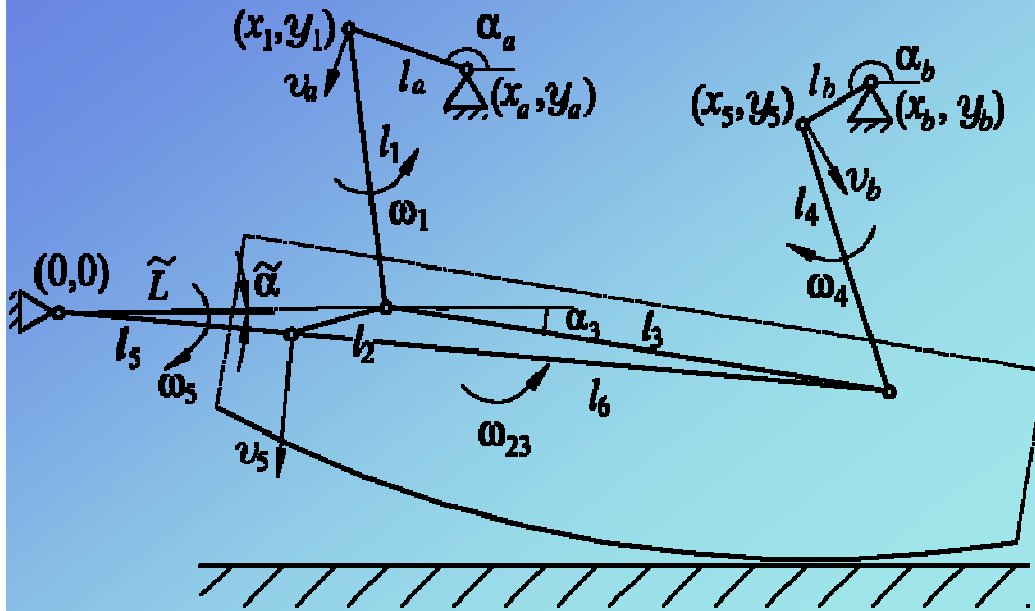
$$F_{рез}(x_A) = \begin{cases} ax_A, & \text{при } x_A \in [0, x_{н1}]; \\ a_1x_A^2 + b_1x_A + c_1, & \text{при } x_A \in [x_{н1}, x_{н2}]; \\ F_{уст}, & \text{при } x_A \in [x_{н2}, x_{н3}]; \\ a_2x_A^2 + b_2x_A + c_2, & \text{при } x_A \in [x_{н3}, x_к]; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Формула Крылова-Тарасова

$$F_{макс} = K_{эп} K_{отр} \frac{h^2 \varepsilon_{над}}{\operatorname{tg} \alpha} \tau_{макс} + z \sigma_B h^2$$



# Модель ЭМС двухкривошипных ножниц



Уравнения динамики

$$\begin{cases} -\omega_1 l_1 \cos \alpha_1 + \omega_{23} l_2 \sin(\alpha_3 - \beta) - \omega_5 l_5 \sin \alpha_5 = -\omega_a l_a \sin \alpha_a; \\ \omega_1 l_1 \sin \alpha_1 + \omega_{23} l_2 \cos(\alpha_3 - \beta) - \omega_5 l_5 \cos \alpha_5 = -\omega_a l_a \cos \alpha_a; \\ -\omega_1 l_1 \cos \alpha_1 + \omega_{23} l_3 \sin \alpha_3 + \omega_4 l_4 \cos \alpha_4 = \omega_b l_b \sin \alpha_b - \omega_a l_a \sin \alpha_a; \\ \omega_1 l_1 \sin \alpha_1 + \omega_{23} l_3 \sin \alpha_3 - \omega_4 l_4 \sin \alpha_4 = \omega_b l_b \cos \alpha_b - \omega_a l_a \cos \alpha_a; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \int M_a + \frac{\partial E_k}{\partial \alpha_a} dt = \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\alpha}_a}; & \text{где } \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\alpha}_a} = J_{\text{пра}}(\alpha_a, \alpha_b) \omega_a + J_{\text{прab}}(\alpha_a, \alpha_b) \omega_b; \\ \int M_b + \frac{\partial E_k}{\partial \alpha_b} dt = \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\alpha}_b}; & \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\alpha}_b} = J_{\text{прba}}(\alpha_a, \alpha_b) \omega_a + J_{\text{прb}}(\alpha_a, \alpha_b) \omega_b \end{cases}$$

Для определения координат элементов механизма достаточно решить нелинейное уравнение связи  $l_4^2 = f(\tilde{L})$  относительно  $\tilde{L}$  и произвести вычисления по формулам, выражающим значения координат через  $\tilde{L}, \alpha_a, \alpha_b$ .

$$f(\tilde{L}) = [x_5 - (\tilde{L} \cos \tilde{\alpha}(\tilde{L}) + l_3 \cos \alpha_3(\tilde{L}))]^2 + [y_5 - \tilde{L} \sin \tilde{\alpha}(\tilde{L}) + l_3 \sin \alpha_3(\tilde{L})]^2;$$

$$\text{ОДЗ: } \max(\tilde{L}^*, |l_2 - l_5|, |l_1 - R_1|) \leq \tilde{L} \leq \min(|l_2 + l_5|, |l_1 + R_1|),$$

где  $\tilde{L}^*$  – значение  $\tilde{L}$ , при котором  $f(\tilde{L})$  достигает минимума.

Определение энергозатрат на рез осуществляется по формуле

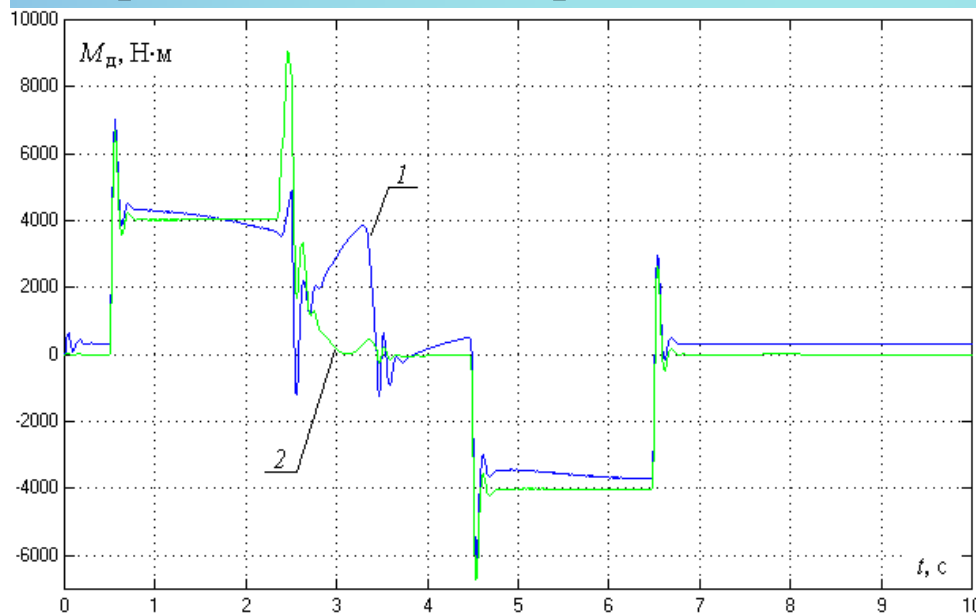
$$E_{\Pi} = \int M'_a \omega'_a + \Delta P_{\text{эл}a} (M'_a, \omega'_a) + M'_b \omega'_b + \Delta P_{\text{эл}b} (M'_b, \omega'_b) dt,$$

где  $M'_a, M'_b$  - момент на валу двигателя;

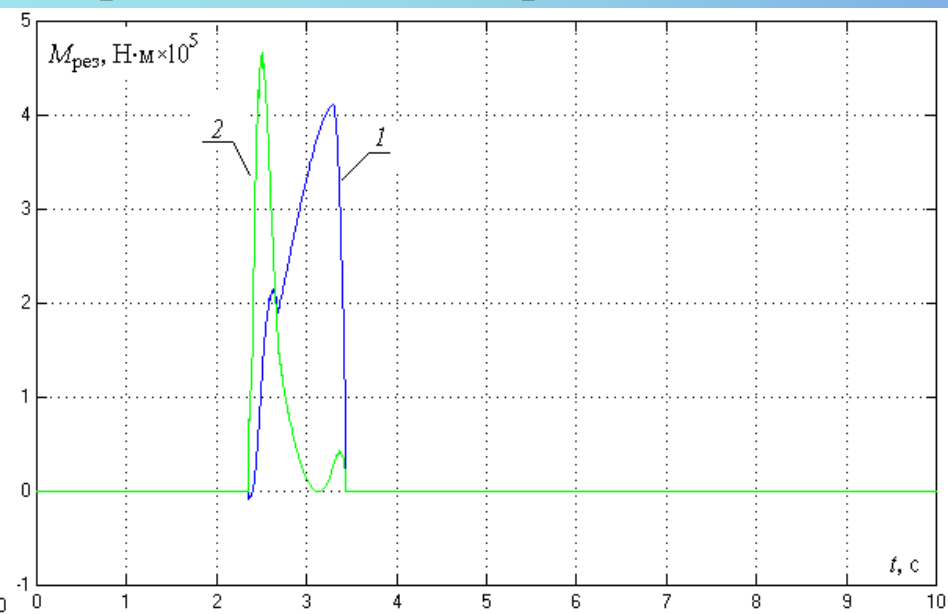
$\omega'_a, \omega'_b$  - скорости двигателей;

$\Delta P_{\text{эл}a}, \Delta P_{\text{эл}b}$  - потери в электрической цепи.

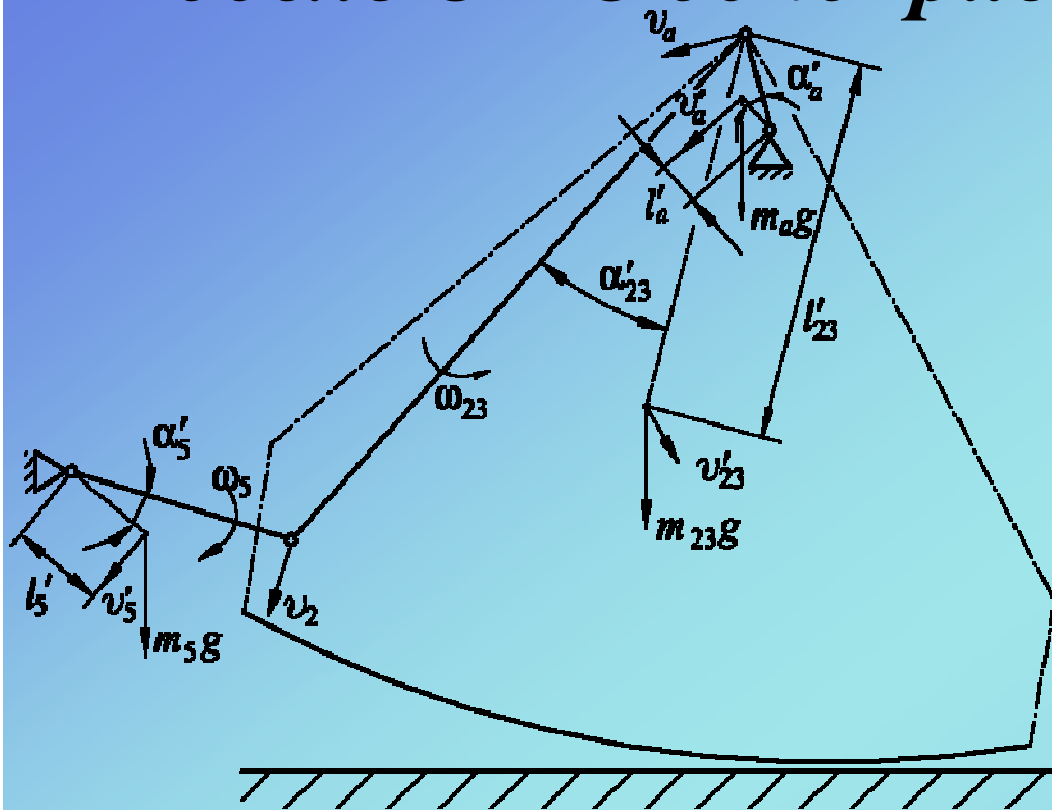
Графики моментов двигателей  
кривошипа  $a$  - 1 и кривошипа  $b$  - 2.



Графики моментов реза на  
кривошипе  $a$  - 1 и кривошипе  $b$  - 2.



# Модель ЭМС однокривошипных ножниц



Уравнения кинематики

$$\begin{cases} x_3 = x_a + l_a \cos \alpha_a; \\ y_3 = y_a + l_a \sin \alpha_a; \end{cases} \quad \tilde{L} = \sqrt{x_3^2 + y_3^2};$$

$$\tilde{\alpha} = \arctg \frac{y_3}{x_3}; \quad \alpha_5 = \tilde{\alpha} - \arccos \frac{\tilde{L} + l_5^2 - l_2^2}{2\tilde{L}l_5};$$

$$\begin{cases} x_2 = l_5 \cos \alpha_5; \\ y_2 = l_5 \sin \alpha_5; \end{cases} \quad \alpha_2 = \arccos \frac{x_3 - x_2}{l_2};$$

Уравнения динамики

$$\omega_5 = \frac{l_a \omega_a \sin \alpha_a - l_2 \omega_{23} \sin \alpha_2}{l_5 \sin \alpha_5}; \quad \omega_{23} = \frac{l_a \omega_a (\sin \alpha_a \operatorname{ctg} \alpha_5 - \cos \alpha_a)}{l_2 (\sin \alpha_2 \operatorname{ctg} \alpha_5 - \cos \alpha_2)};$$

$$J_{\text{пр}} = J_5 \cdot \left( \frac{\omega_5}{\omega_a} \right)^2 + J_a + J_{23} \cdot \left( \frac{\omega_{23}}{\omega_a} \right)^2 + m_{23} \cdot \left( \frac{v'_{23}}{\omega_a} \right)^2;$$

$$\vec{v}'_{23} = (\omega_{23} l'_{23} \sin(\alpha_{23} + \alpha'_{23}); -\omega_{23} l'_{23} \cos(\alpha_{23} + \alpha'_{23})).$$

Статический момент на кривошипе

определяется выражением

$$M_a(\alpha_a) = F_a(\alpha_a)l_a + M_{\Pi}(\alpha_a).$$

Сила  $F_a$  определяется из системы уравнений

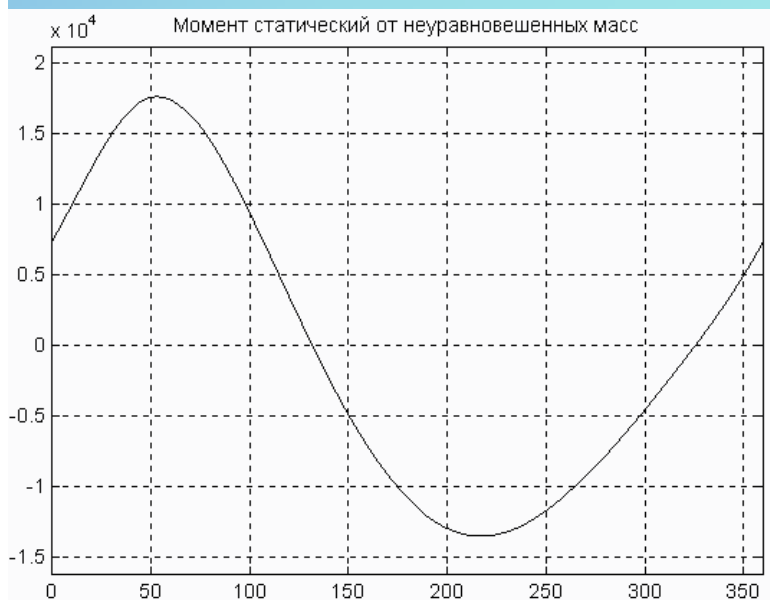
$$\begin{cases} F_a^r \cos \alpha_a - F_a \sin \alpha_a = -F_5 \cos \alpha_5 + F_{\text{рез}} \sin \alpha; \\ F_a^r \sin \alpha_a + F_a \cos \alpha_a = -F_5 \sin \alpha_5 + F_{\text{рез}} \cos \alpha; \end{cases}$$

где

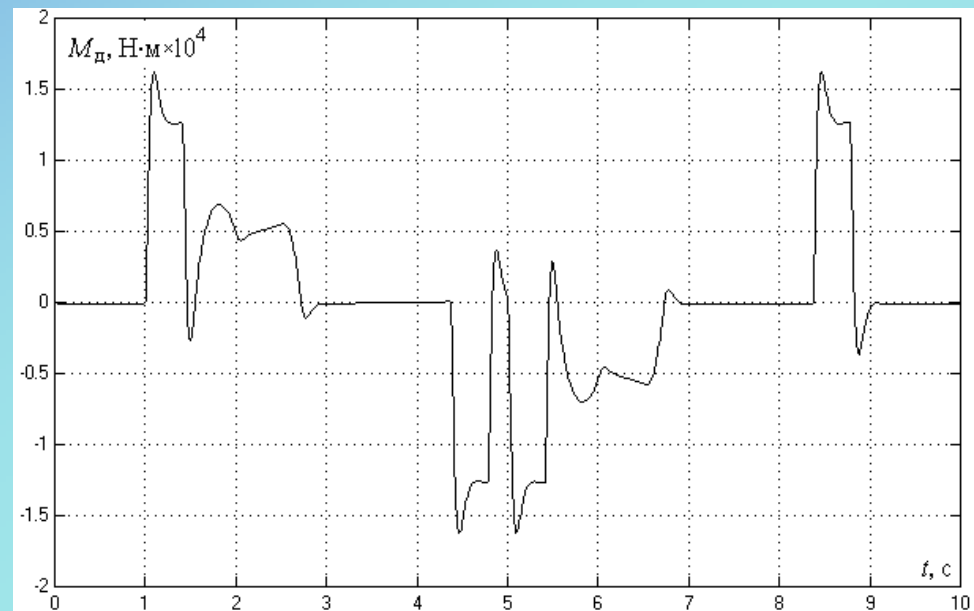
$$F_5 = -F_{\text{рез}} \frac{|(-\sin \alpha, \cos \alpha) \times (x_F - x_3, y_F - y_3)|}{|(\cos \alpha_5, \sin \alpha_5) \times \vec{l}_2|}.$$

Момент от неуравновешенных масс

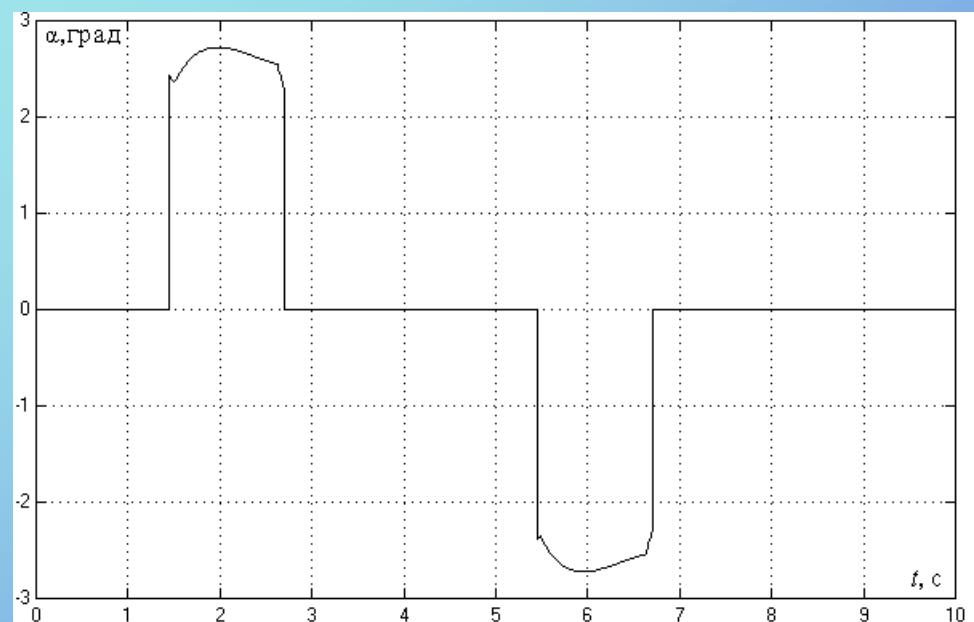
$$M_{\Pi} = g(m_a l'_a \cos(\alpha_a + \alpha'_a) + m_5 l'_5 \cos(\alpha_5 + \alpha'_5) + m_{23}(v_a \sin \alpha_a - l'_{23} \cos(\alpha_2 + \alpha'_{23}))).$$



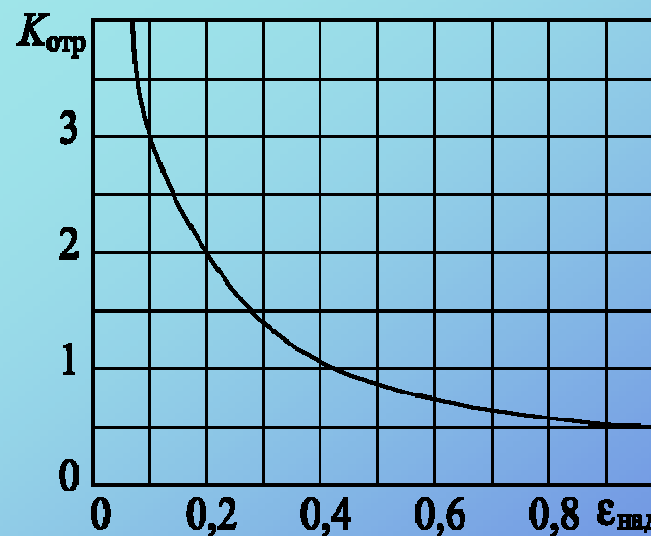
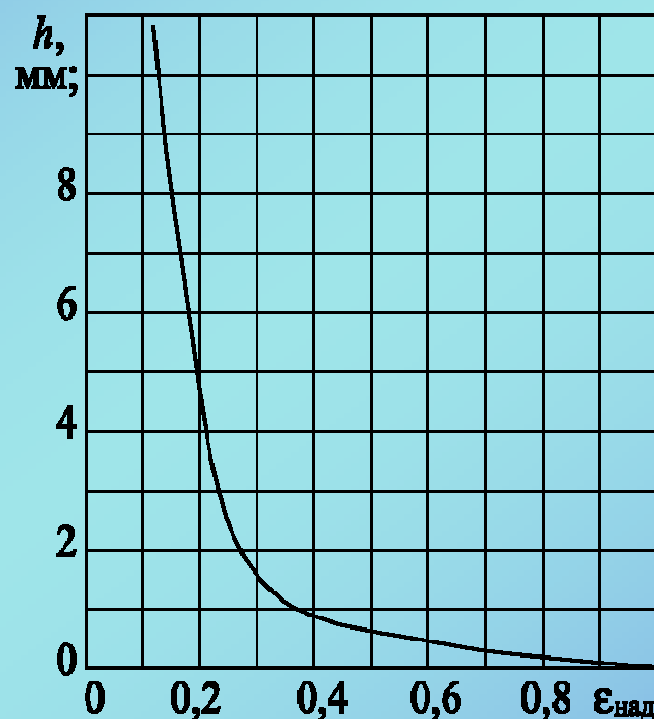
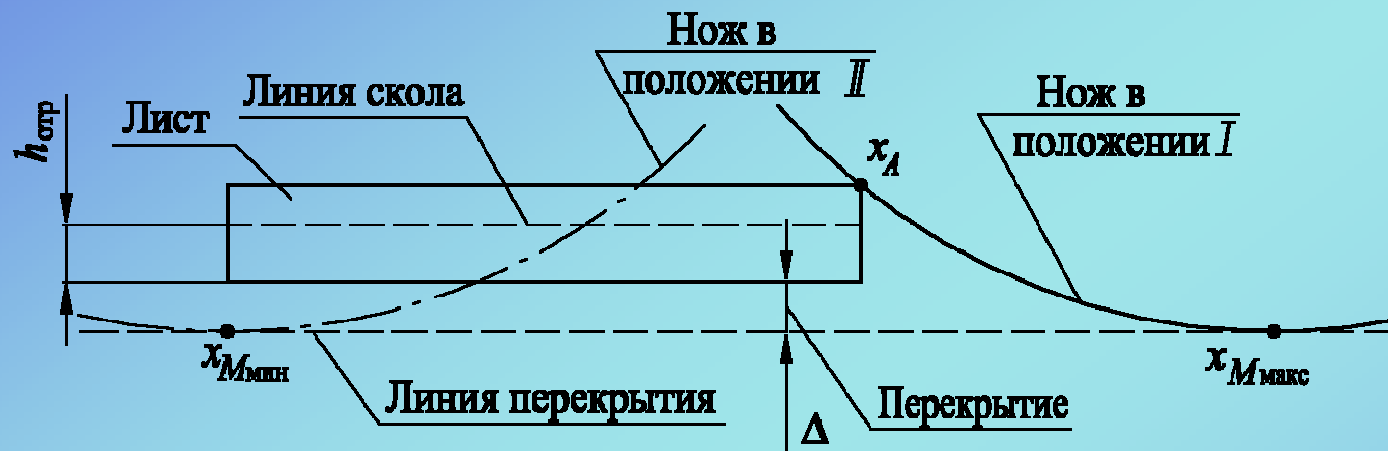
## Момент двигателя



## Угол реза



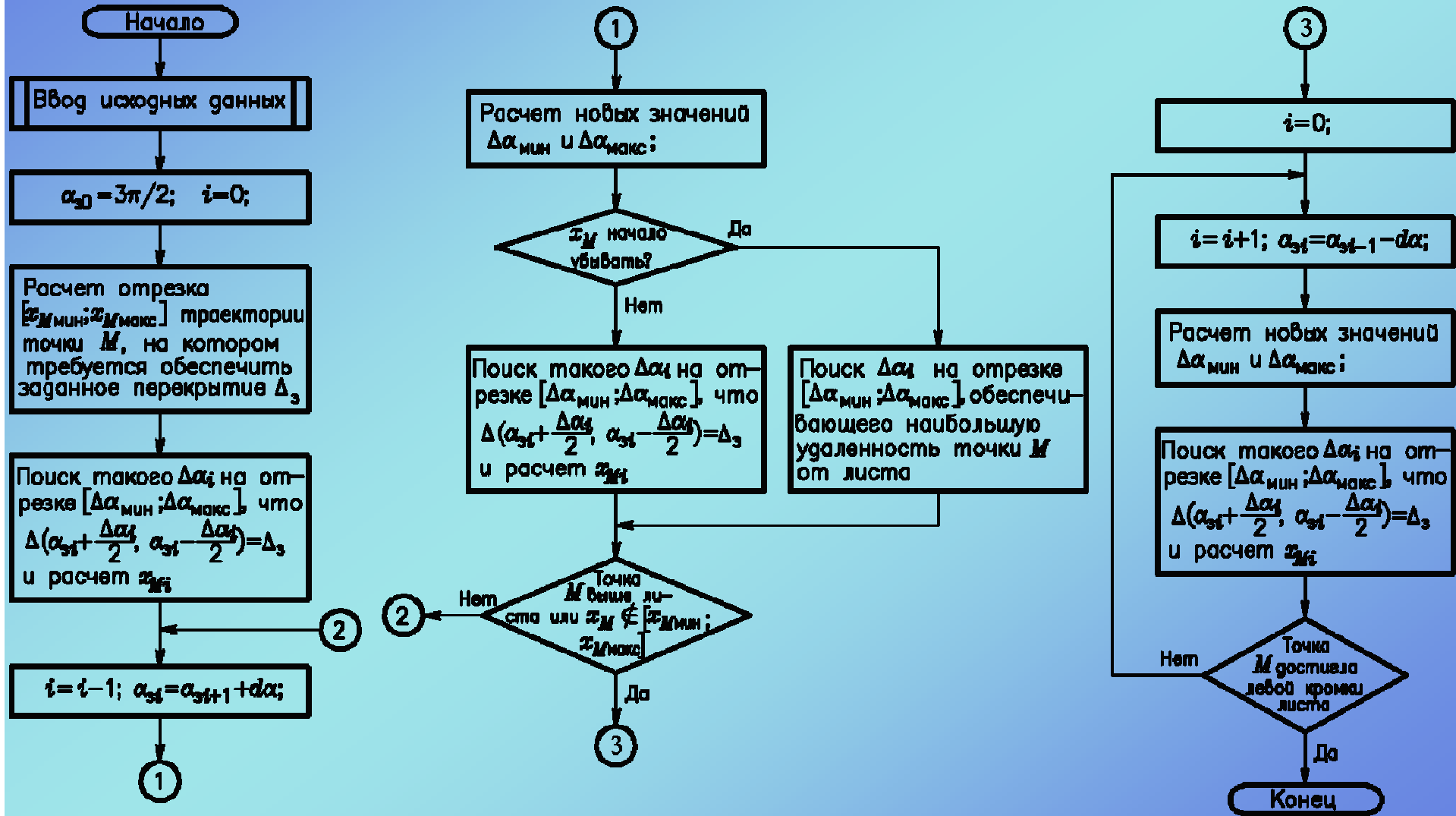
# Методика формирования траектории движения ножа



Линия скола листа находится на высоте

$$h_{отр} = h \cdot (1 - K_{отр} \epsilon_{над}(h))$$

# Алгоритм расчёта режима управления углом рассогласования

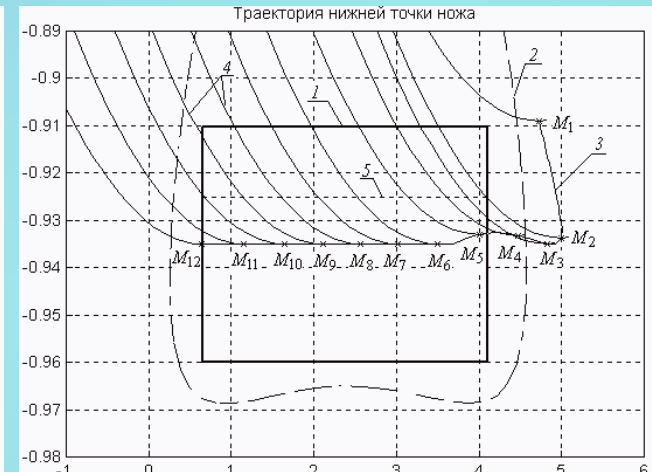
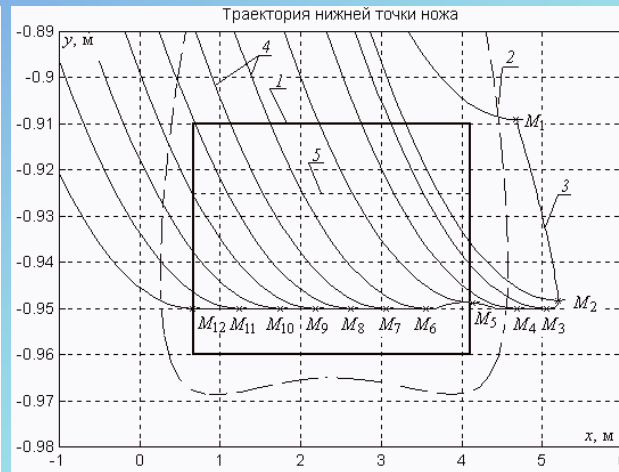
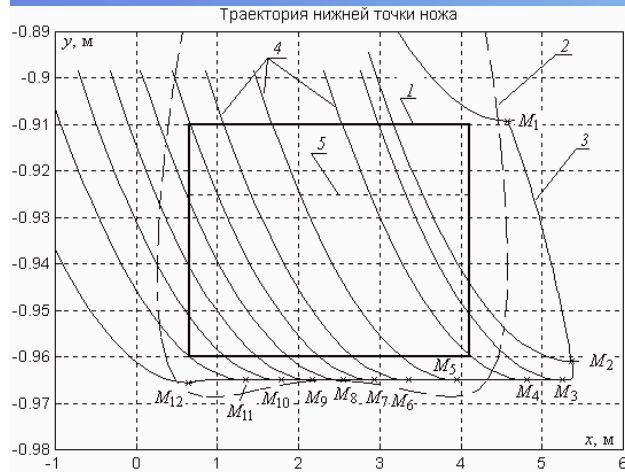


# Графики заданного перекрытия

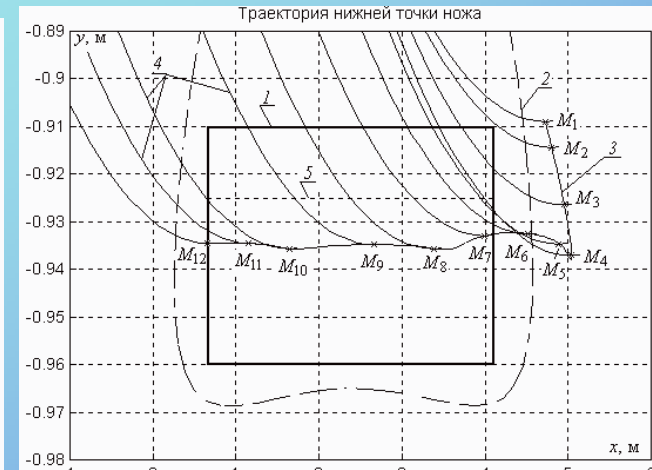
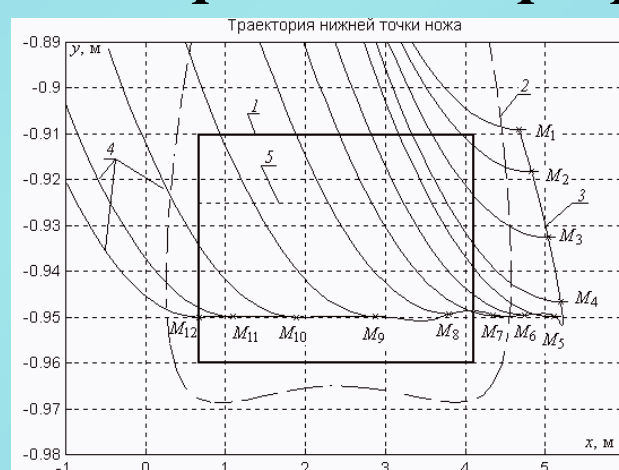
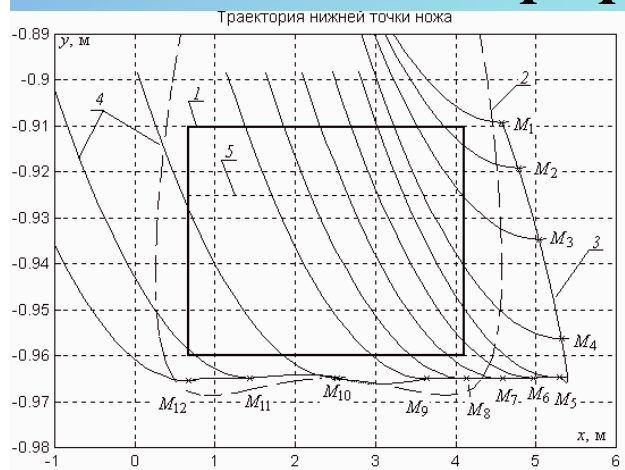
$\Delta_3 = 5 \text{ мм}$

$\Delta_3 = -10 \text{ мм}$

$\Delta_3 = -25 \text{ мм}$



# Графики отработки перекрытия

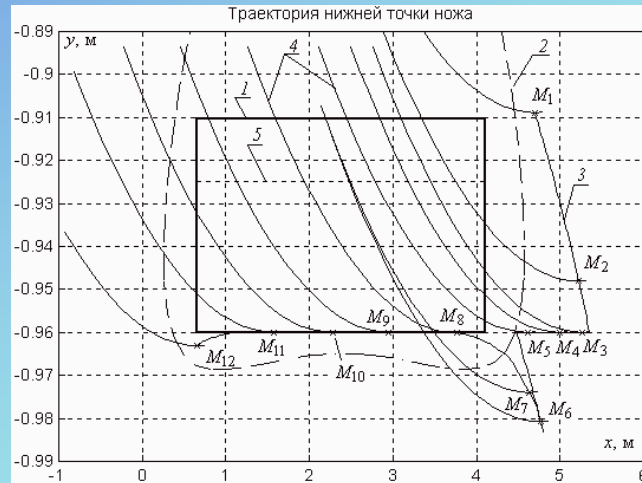
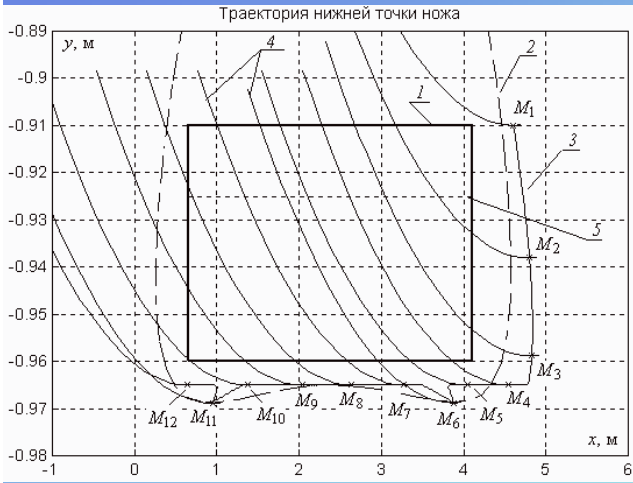


1 — лист; 2 — траектория ножа при механической синхронизации;  
3 — траектория при электрической синхронизации; 4 — нож; 5 — линия скола;  
 $M_1, M_2, \dots, M_{12}$  — положения нижней точки ножа.

# Заданное перекрытие при нереверсивном вращении кривошипов

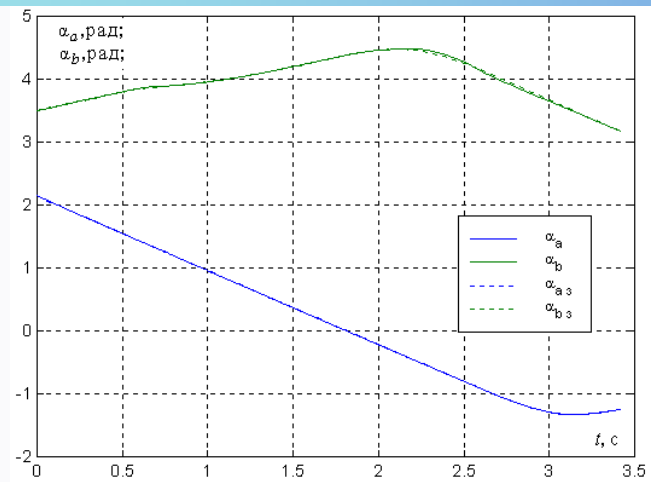
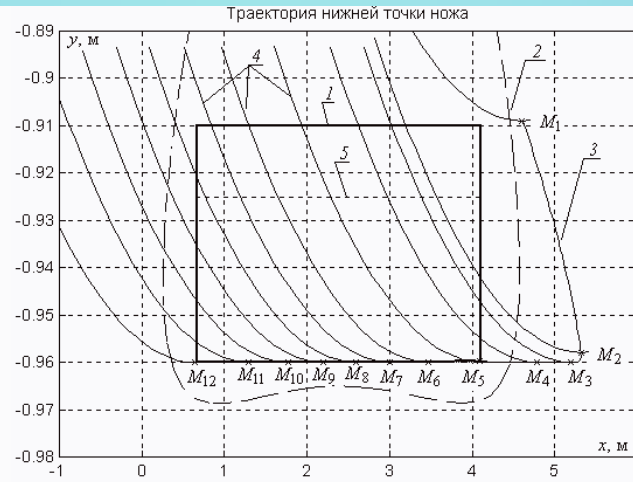
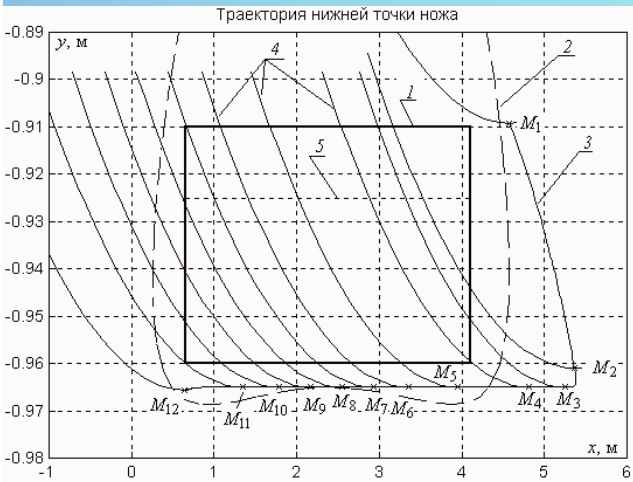
$$\Delta_3 = 5 \text{ мм}$$

$$\Delta_3 = 0 \text{ мм}$$



Графики положения кривошипов при отработке перекрытия  $\Delta_3 = 5 \text{ мм}$

# Заданное перекрытие при реверсивном вращении кривошипов

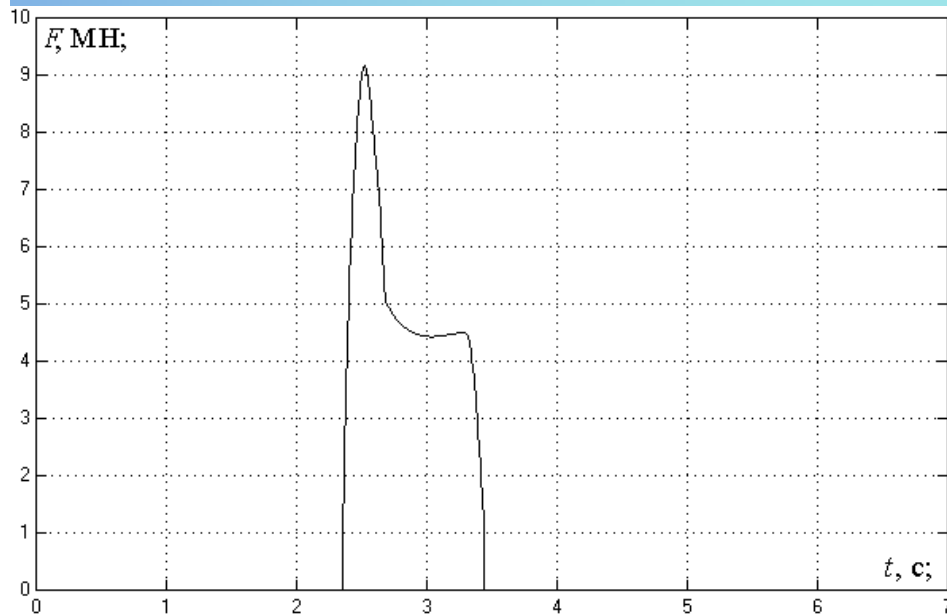


1 — лист; 2 — траектория ножа при механической синхронизации; 3 — траектория при электрической синхронизации; 4 — нож; 5 — линия скола;  $M_1, M_2, \dots, M_{12}$  — положения нижней точки ножа.

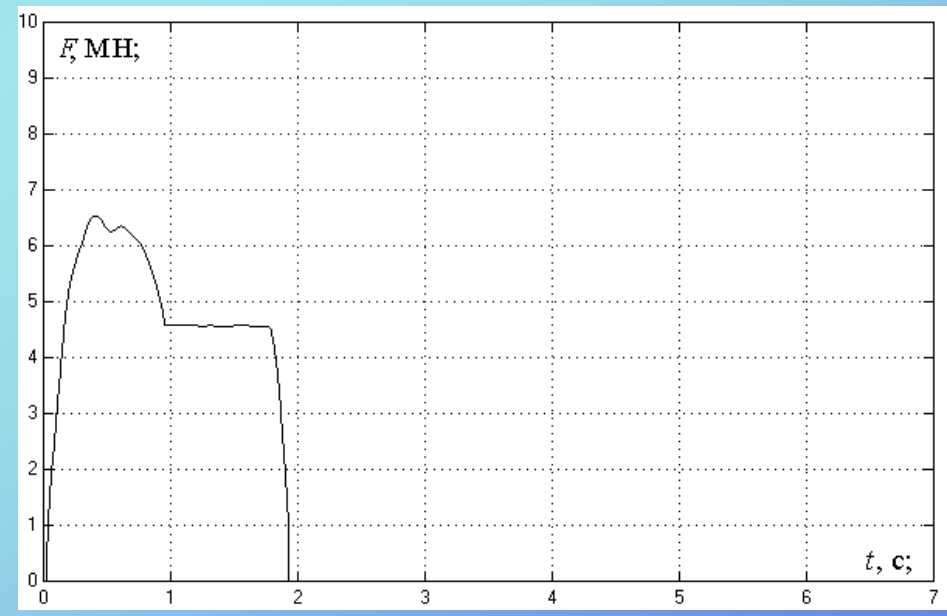


# Графики изменения силы реза при резке листового проката толщиной $h = 50$ мм

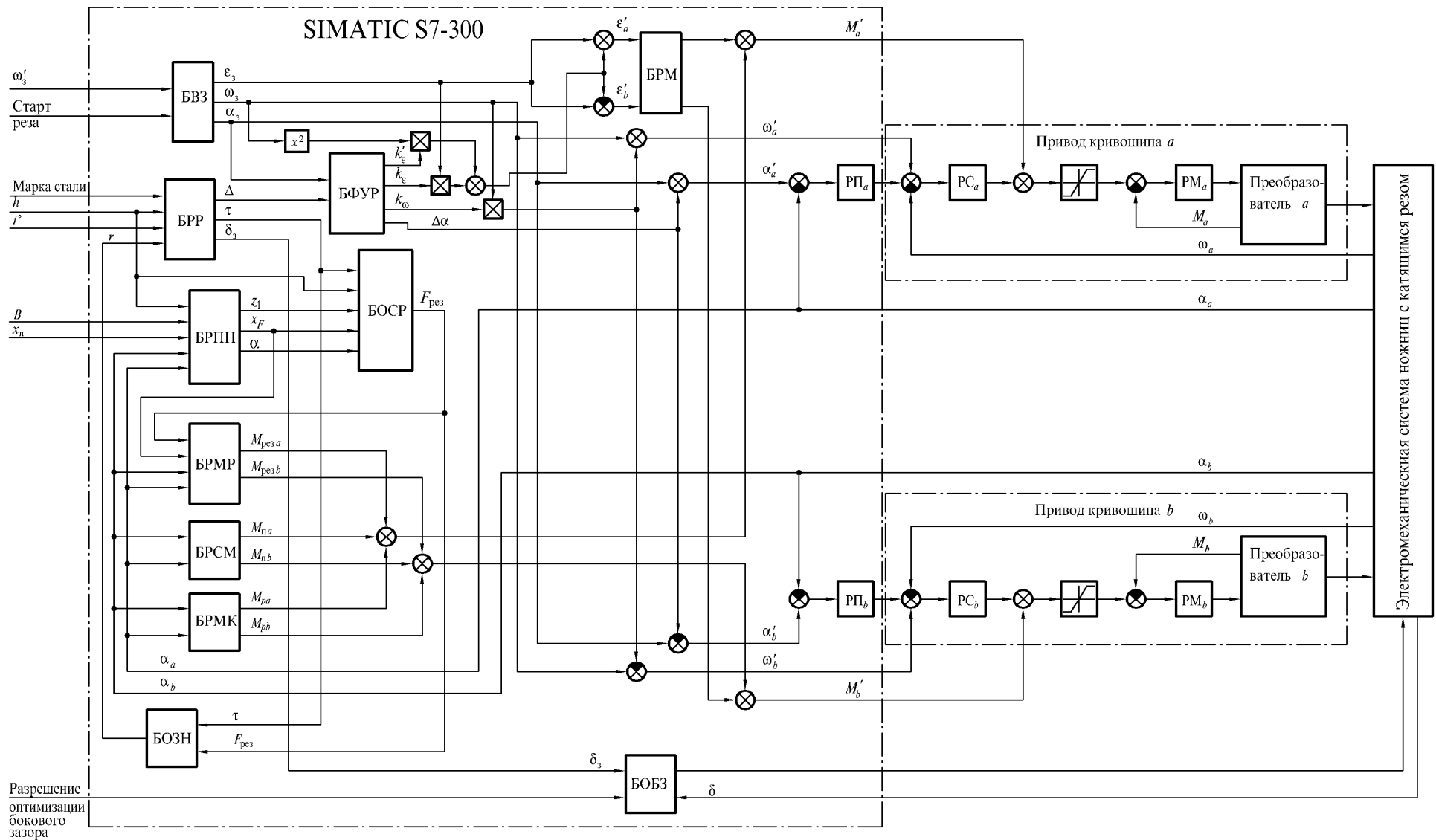
при поддержании постоянного угла рассогласования между кривошипами



при поддержании постоянного перекрытия  $\Delta_3 = 5$  мм

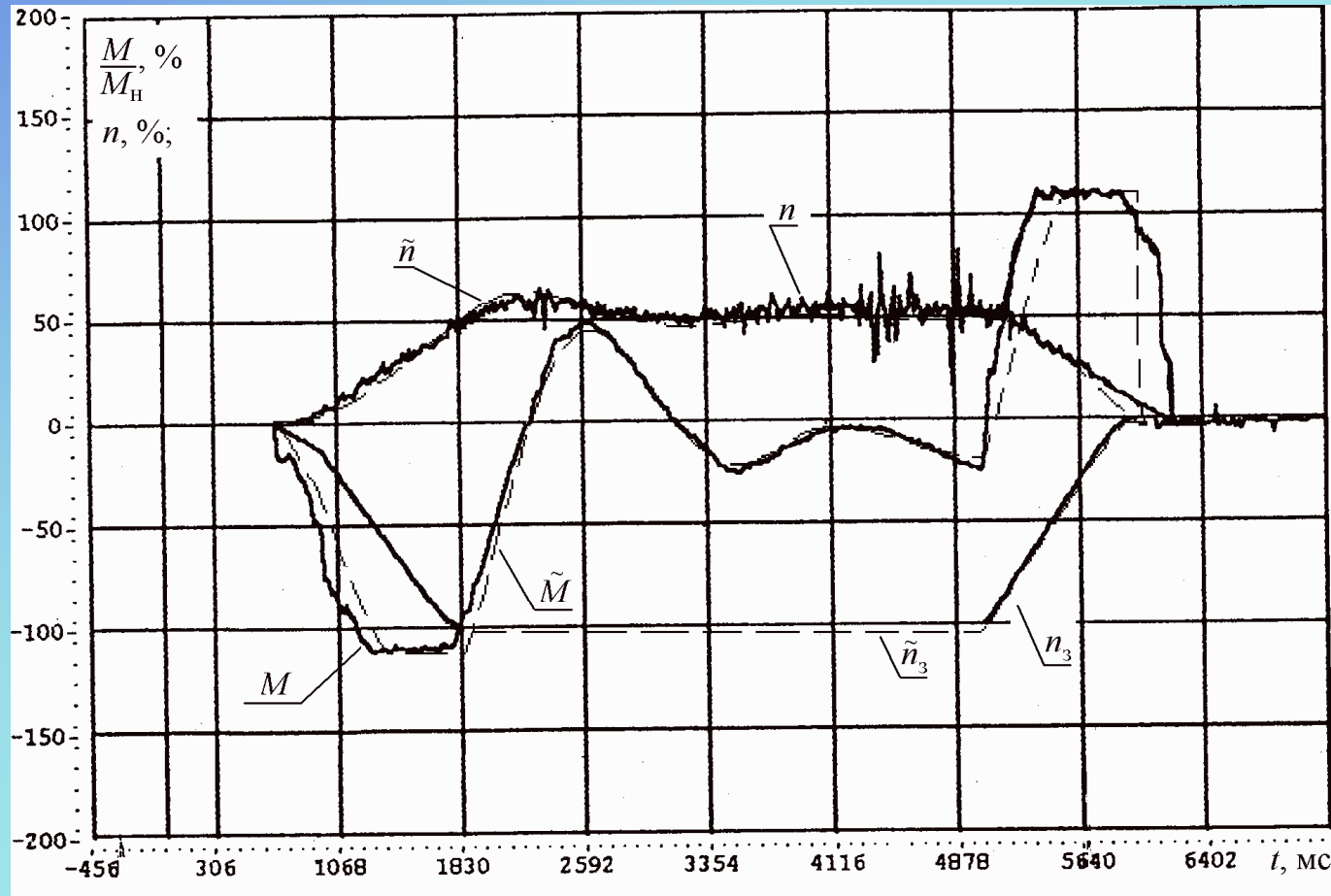


# Структура системы управления электроприводом двухкривошипных ножниц



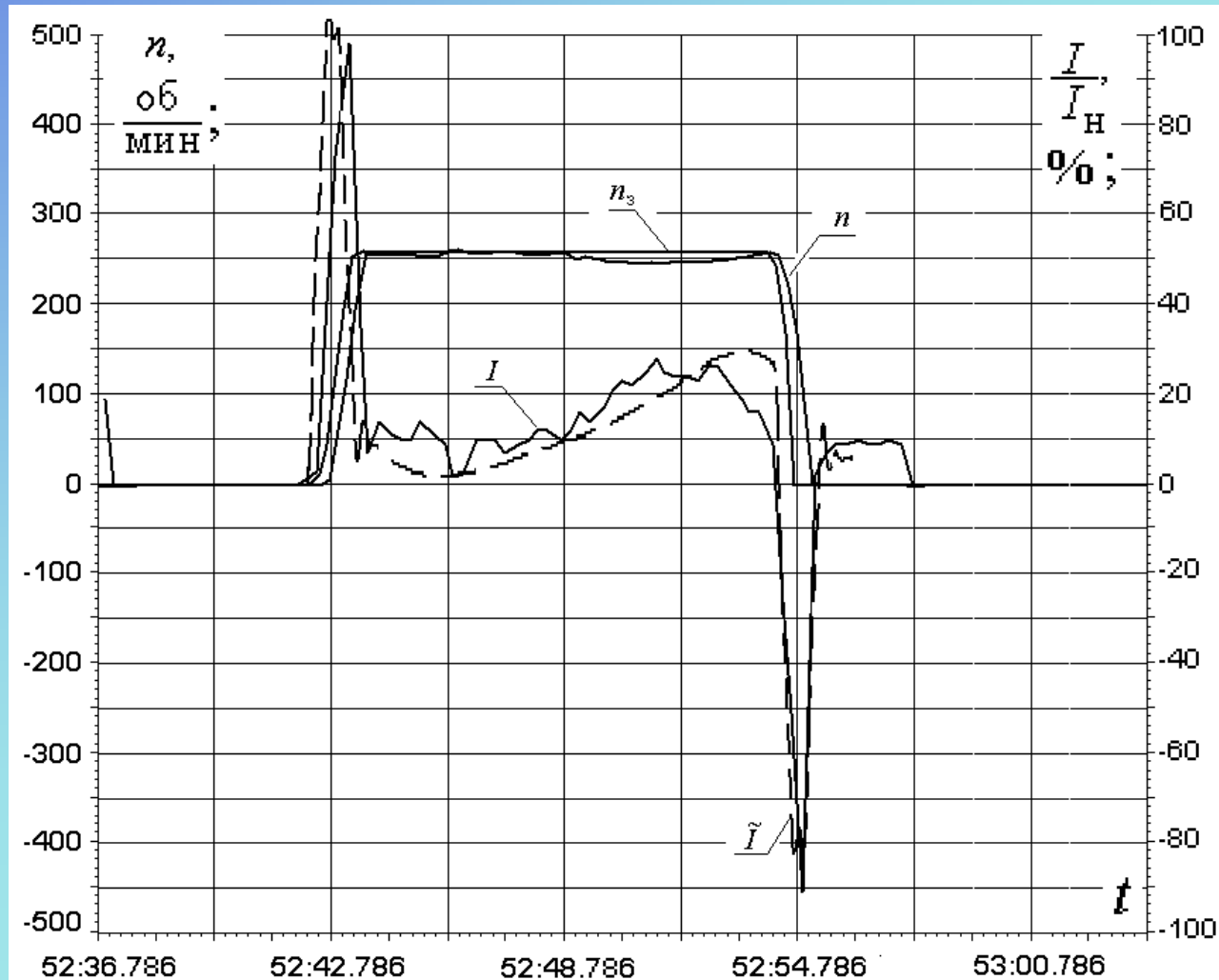
БВЗ - блок выработки задания; БРР - блок расчёта параметров резки; БФУР - блок формирования угла рассогласования; БРПН - блок расчёта положения точки реза  $x_F$  и угла реза  $\alpha$ ; БОСР - блок оценки силы реза  $F_{рез}$ ; БРМР - блок расчёта моментов реза; БРСМ - блок расчёта статических моментов от неуравновешенных масс; БРМК - блок расчёта статических моментов от копира.

# Экспериментальные исследования на однокривошипных ножницах стана 2800



$n, \tilde{n}$  — скорость двигателя, измеренная и моделированная;  
 $n_3, \tilde{n}_3$  — задание скорости преобразователя и модели;  
 $M, \tilde{M}$  — момент двигателя и модели.

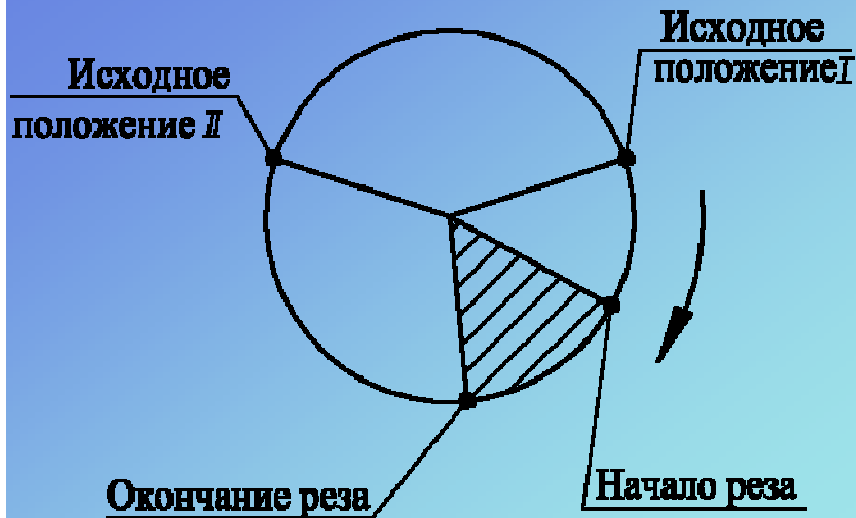
# Экспериментальные исследования на двухкровошипных ножницах стана 5000



$n$  — измеренная скорость двигателя;  
 $n_3$  — задание скорости преобразователя;  
 $I, \tilde{I}$  — ток двигателя и модели.

# Оптимизация режима управления приводом ножниц

Диаграмма положений кривошипа  $\alpha$



Ограничения, учитываемые алгоритмом оптимизации при расчёте значения  $i$ -ой точки

$$\max(x_{\min}(t_i), x(t_{i-1}) + x'_{\min} \Delta t, x(t_{i+1}) - x'_{\max} \Delta t) \leq x(t_i) \leq \min(x_{\max}(t_i), x(t_{i-1}) + x'_{\max} \Delta t, x(t_{i+1}) - x'_{\min} \Delta t)$$

Минимизируемый функционал

$$v = \int_0^{t_u} M \omega + \Delta P_{\text{дв}}(i_1, i_2, \omega) + \Delta P_{\text{ип}}(P_1) + \Delta P_{\text{аи}}(i_1, P_1) dt;$$

$$P_1 = M \omega + \Delta P_{\text{дв}}(i_1, i'_2, \omega).$$

Потери в двигателе

$$\Delta P_{\text{дв}} = (\Delta P_{1мN} + \Delta P_{\text{добN}}) \cdot \frac{i_1^2}{i_{1N}^2} + \Delta P_{2м.N} \cdot \frac{i_2^2}{i_{2N}^2} + \Delta P_{1сгN} \cdot \frac{\psi_0^2}{\psi_N^2} \cdot \frac{\omega}{\omega} + \Delta P_{1мехN} \cdot \frac{\omega^{2/3}}{\omega_N^{2/3}} + \Delta P_{1свN} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_N^2},$$

$$\psi_0 = \sqrt{(\psi_{2x} - L'_2 i'_{2x})^2 + (L'_2 i'_{2y})^2}.$$

Потери в источнике питания

$$\Delta P_{\text{ип}} = \Delta P_{в1N} \cdot \frac{P_1}{P_{1N}} + (\Delta P_{в2N} + \Delta P_{рвх.N} + \Delta P_{рфN}) \cdot \frac{P_1^2}{P_{1N}^2}.$$

Потери в автономном инверторе

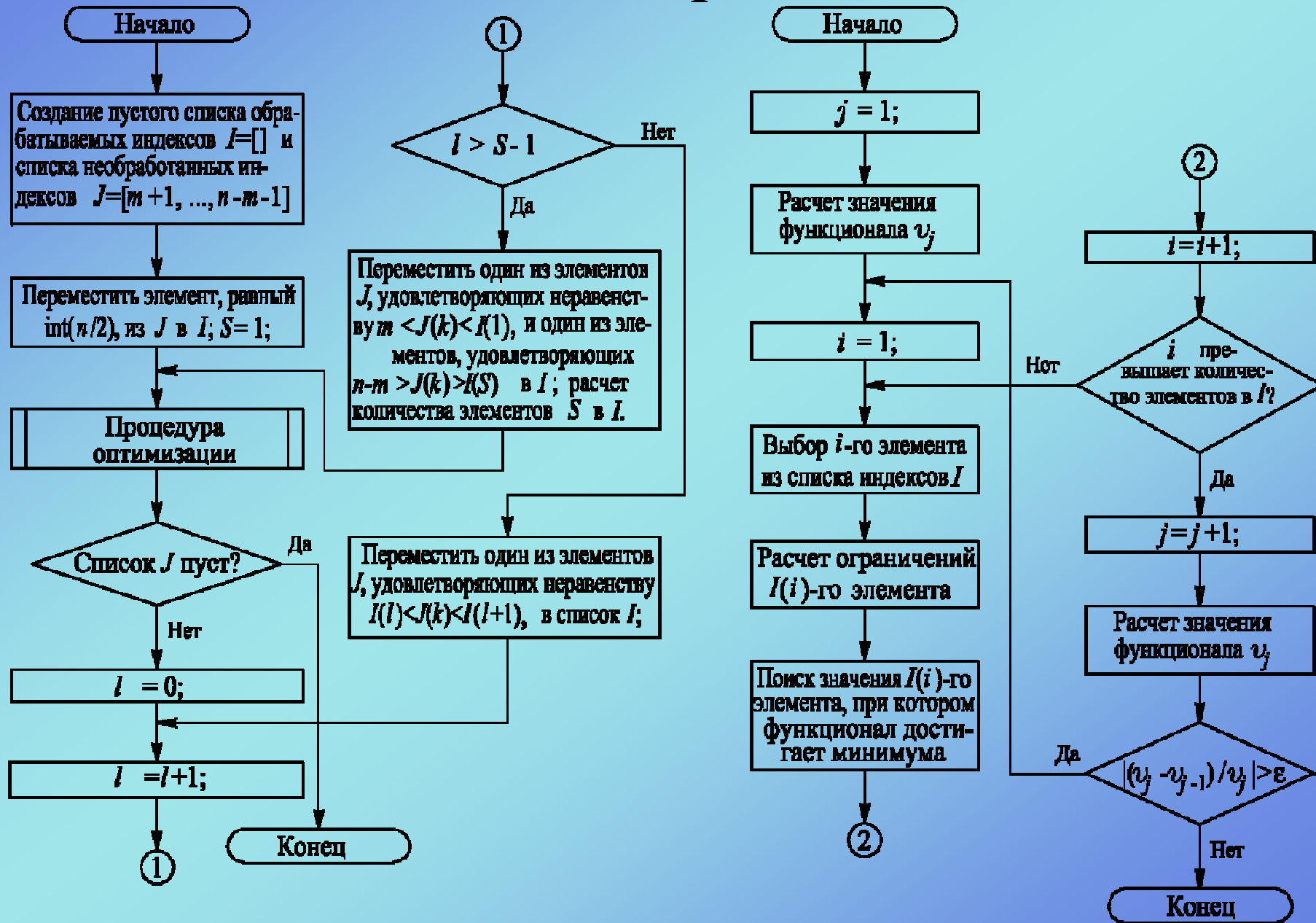
$$\Delta P_{\text{аи}} = \left( \Delta P_{\text{кл1N}} + \Delta P_{\text{кл2N}} \cdot \frac{i_1}{i_{1N}} \right) \cdot \frac{i_1}{i_{1N}} + \Delta P_{\text{кл3N}} \frac{P_1^2}{P_{1N}^2} + \Delta P_{\text{кл4N}} \cdot \frac{i_1}{i_{1N}} \cdot \frac{P_1}{P_{1N}} + \Delta P_{\text{рвыхN}} \cdot \left( \frac{i_1}{i_{1N}} \right)^2.$$

При векторном управлении

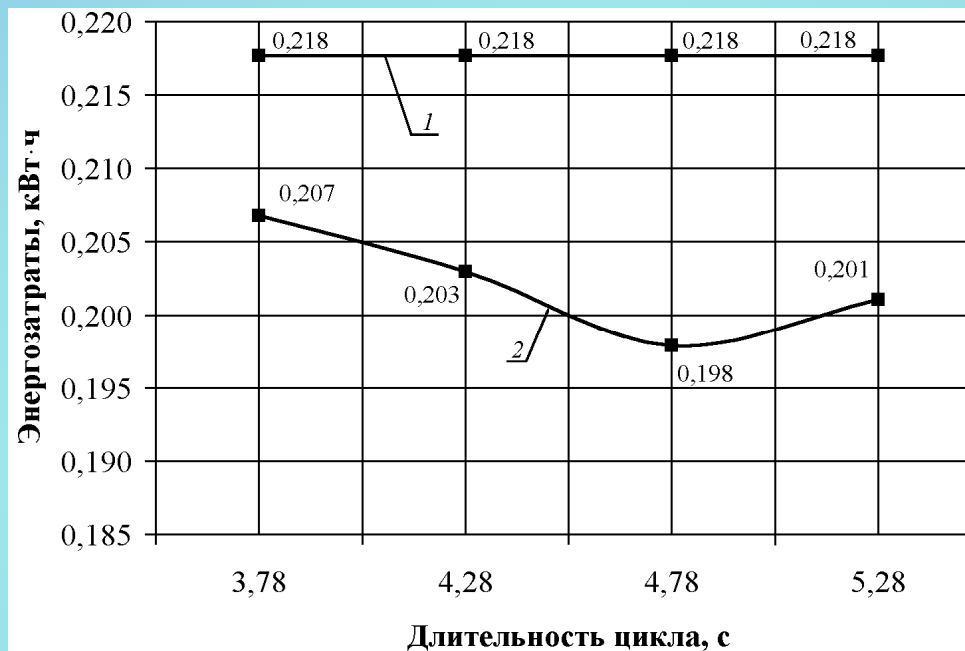
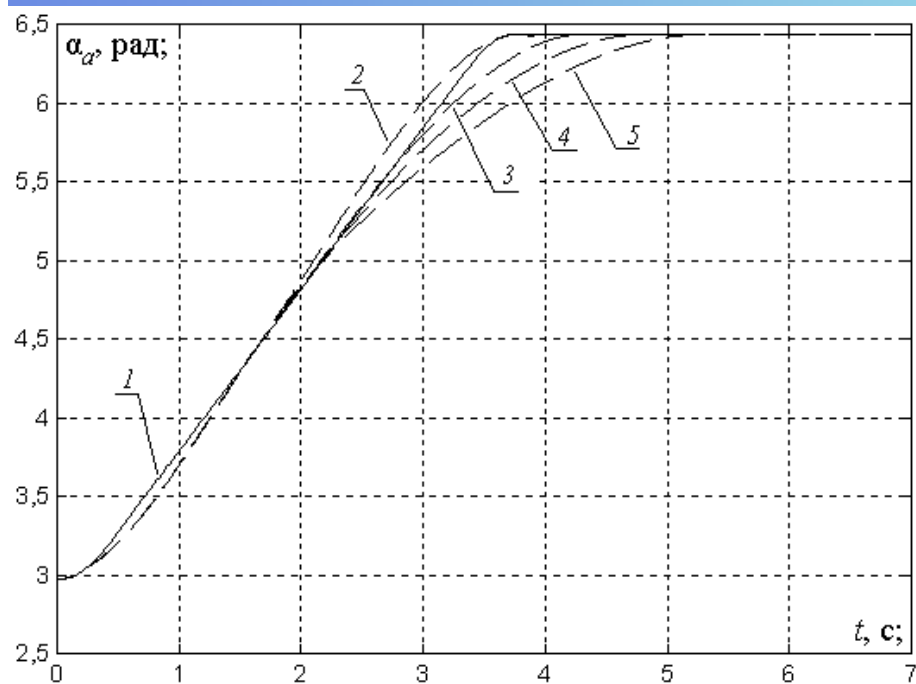
$$i_1 = \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2}; \quad I_{1x} = \text{const}; \quad I_{1y} = \frac{2M}{3p_{\pi} k_2};$$

$$i'_2 = \sqrt{I_{2x}'^2 + \left( I_{1y} \cdot \frac{L_{12}}{L'_2} \right)^2}, \quad I_{2x}' = \text{const}.$$

# Алгоритм оптимизации режима управления главным приводом



# Результаты оптимизации



1 - проектный вариант управления;

2 - оптимизированный вариант,  $t_{\text{ц}} = 3,78$  с;

3 - оптимизированный вариант,  $t_{\text{ц}} = 4,28$  с;

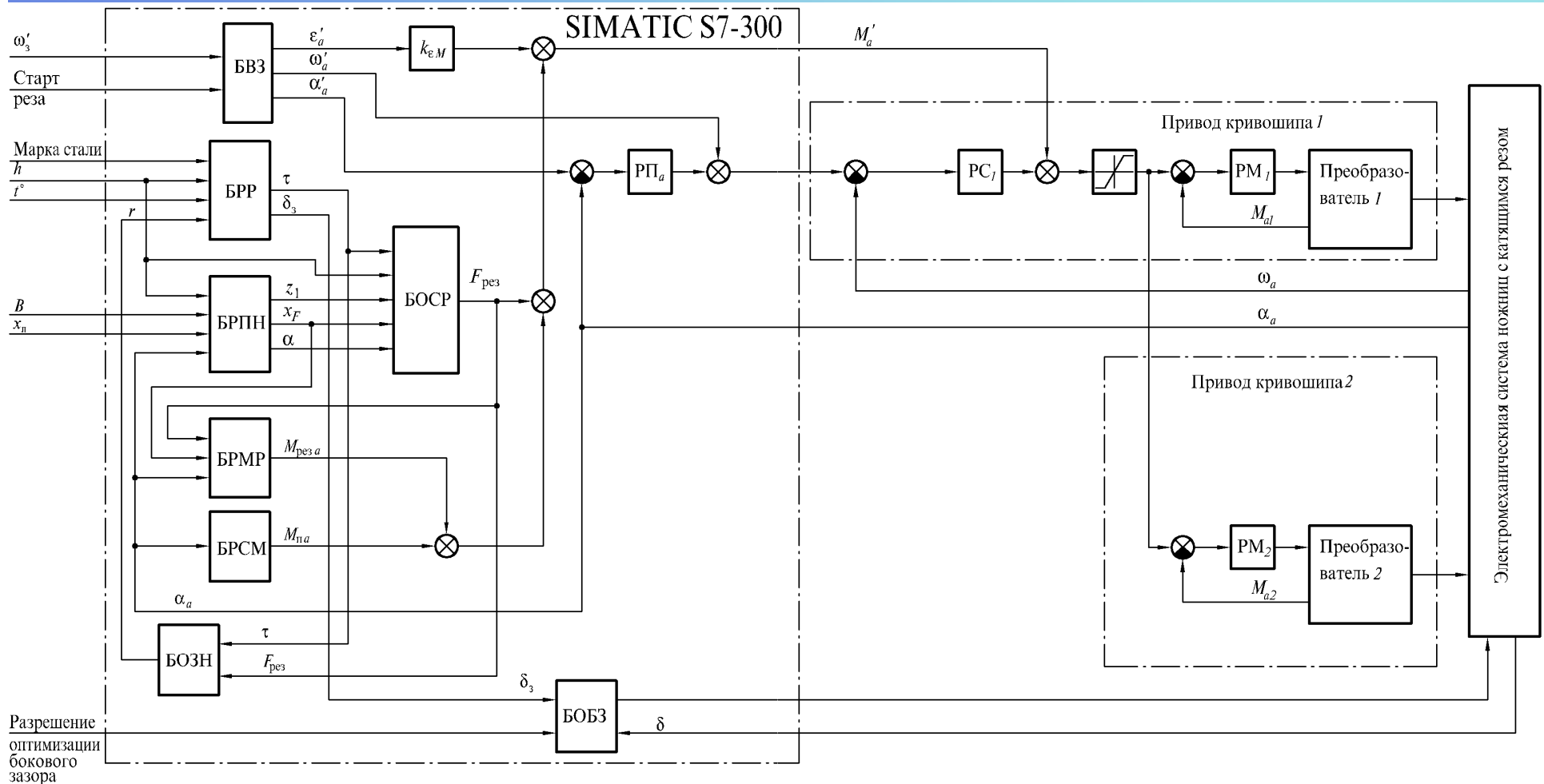
4 - оптимизированный вариант,  $t_{\text{ц}} = 4,78$  с;

5 - оптимизированный вариант,  $t_{\text{ц}} = 5,28$  с.

1 - энергозатраты при проектном варианте;

2 - энергозатраты при оптимизированных вариантах.

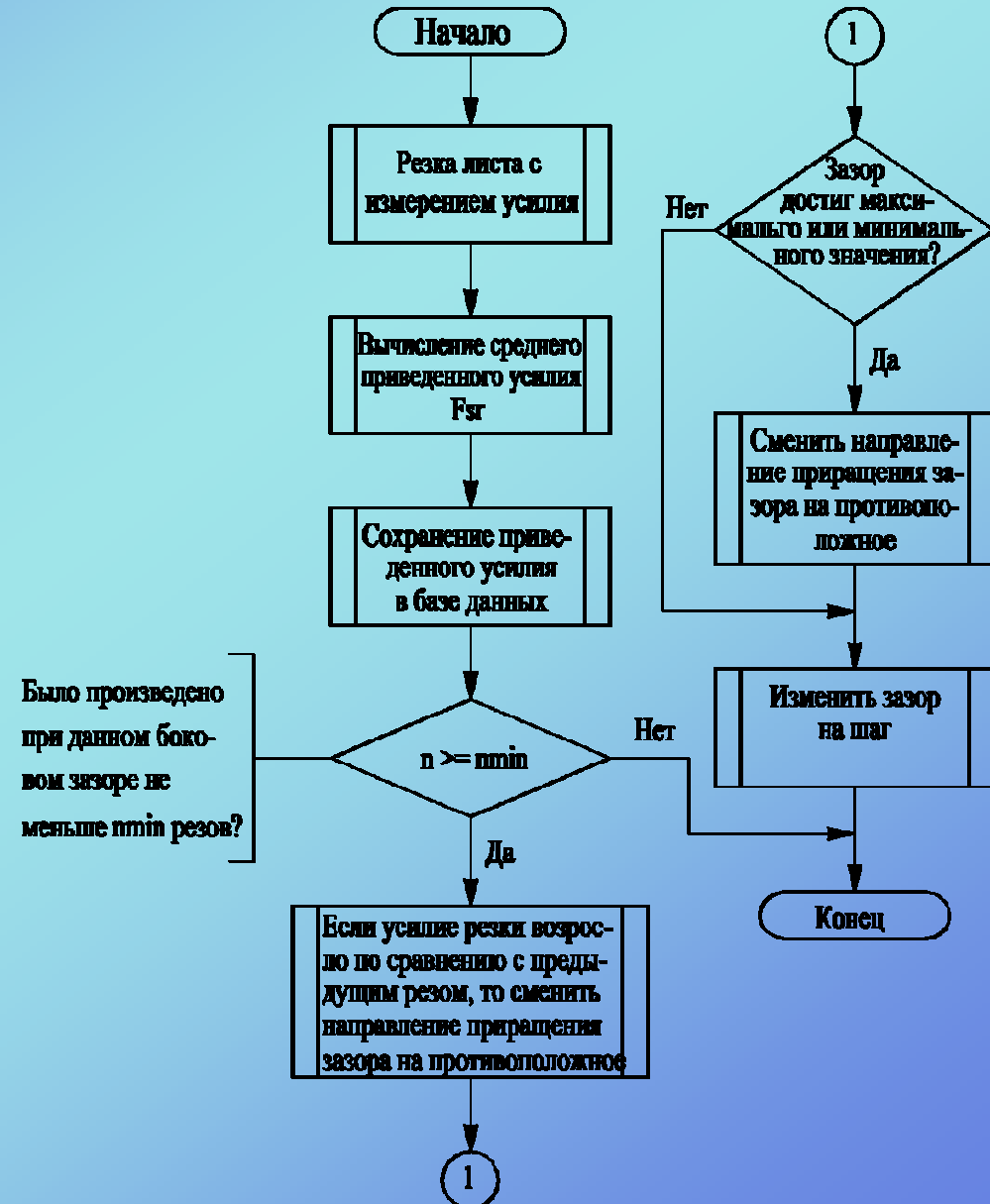
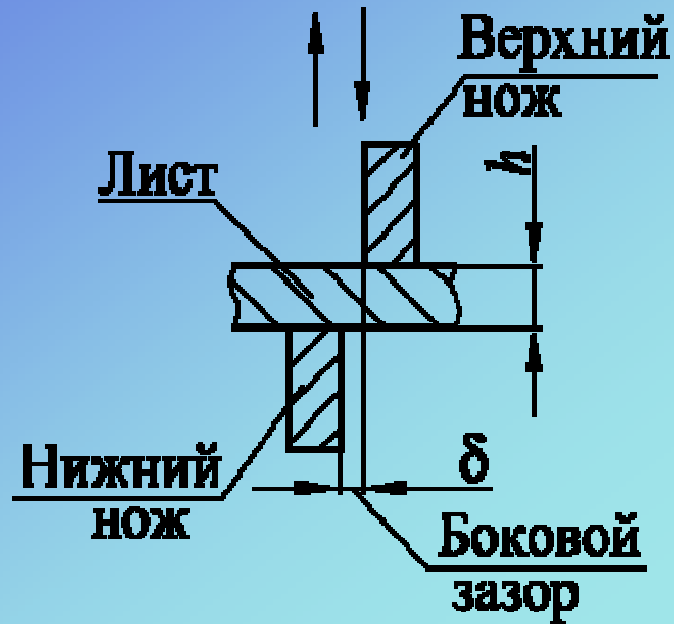
# Структура системы управления электроприводом однокривошипных ножниц



БВЗ - блок выработки задания; БРР - блок расчёта параметров резки; БФУР - блок формирования угла рассогласования; БРПН - блок расчёта положения точки реза  $x_F$  и угла реза  $\alpha$ ; БОСР - блок оценки силы реза  $F_{рез}$ ; БРМР - блок расчёта моментов реза; БРСМ - блок расчёта статических моментов от неуравновешенных масс.



# Алгоритм управления электроприводом устройства регулировки бокового зазора



# Расчёт приведённого значения силы реза

Приведённое усилие резки

$$F_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{рез}} \operatorname{tg} \alpha}{h^2 (1 + \Delta F(h, r))}$$

Среднее значение усилия определяется по формуле

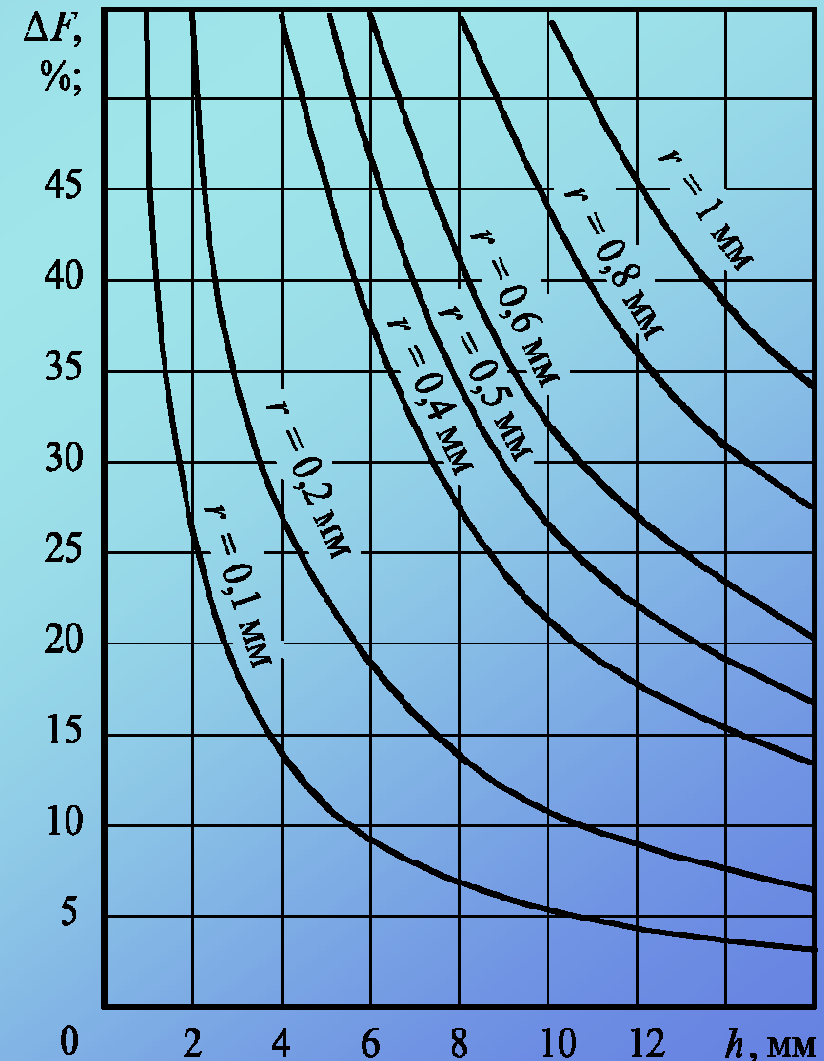
$$F_{\text{ср}} = F_{\text{ср}} + \frac{k}{i} (F_{\text{пр}} - F_{\text{ср}})$$

$$k = \begin{cases} k + k_0, & \text{при } |s| > s_0 \text{ и } k + k_0 < i; \\ k - k_0, & \text{при } |s| < s_0 \text{ и } k - k_0 > 1; \\ 1, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$s = \begin{cases} s + \operatorname{sign}(F_{\text{пр}} - F_{\text{ср}}), & \text{при } |s + \operatorname{sign}(F_{\text{пр}} - F_{\text{ср}})| > |s|; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

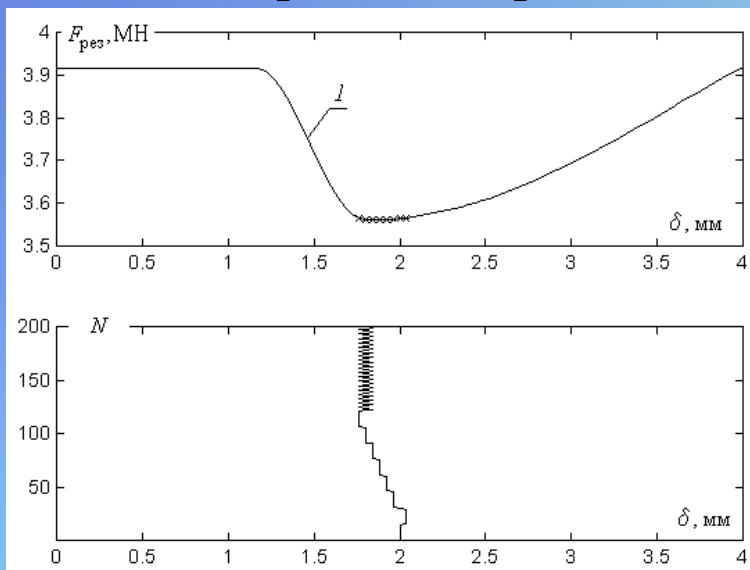
$$i = \begin{cases} i + 1, & \text{при } i < n; \\ n, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Зависимость увеличения силы реза от радиуса затупления ножей

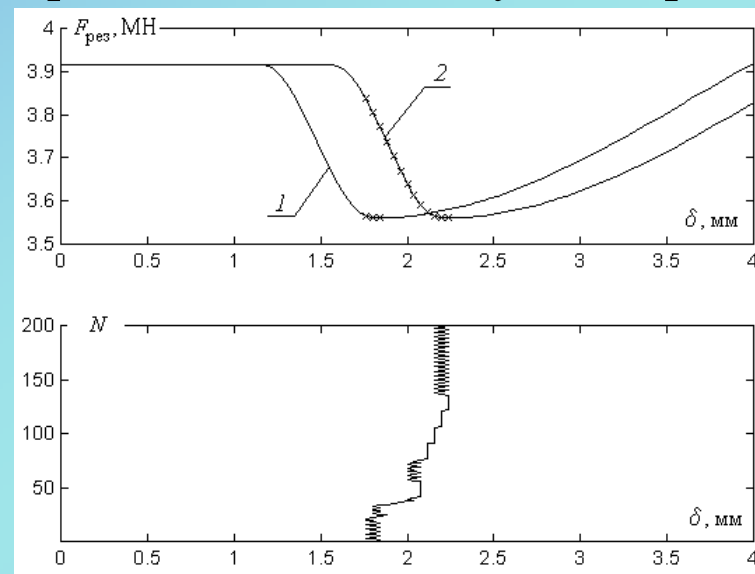


# Подстройка зазора без случайных возмущений

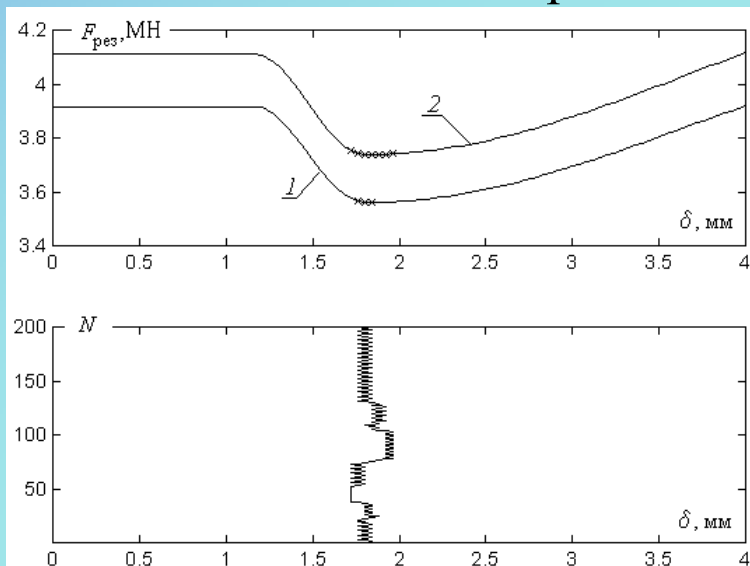
## Подстройка зазора



## Отработка изменения усилия реза



## Отработка изменения оптимального зазора



На графиках обозначены

$F_{рез}$  - усилие реза;

$\delta$  - боковой зазор между ножами;

$N$  - число резов.

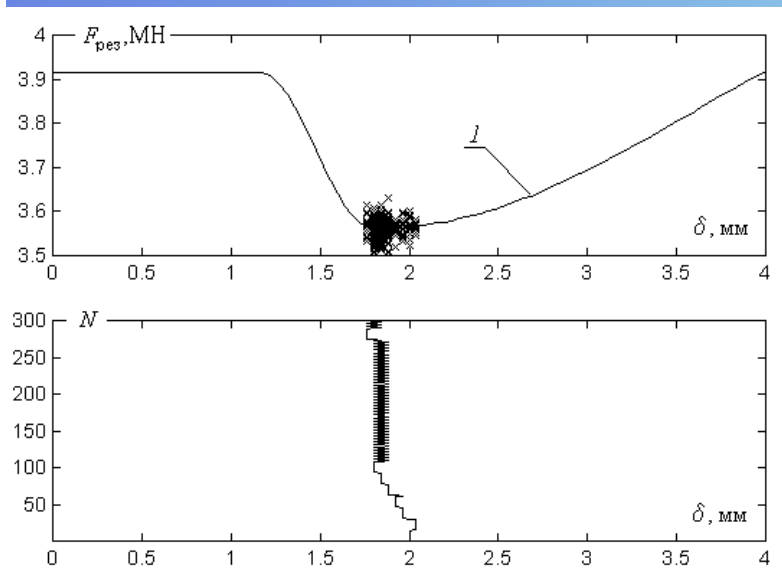
1 - график зависимости силы реза от бокового зазора в начале моделирования;

2 - график зависимости силы реза от бокового зазора в конце моделирования;

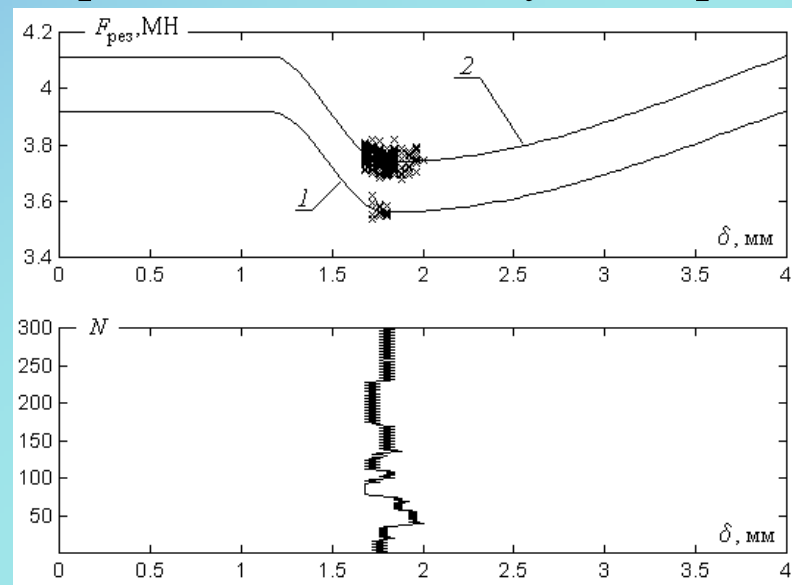
× - измеренное значение силы реза.

# Подстройка зазора при наличии случайных возмущений

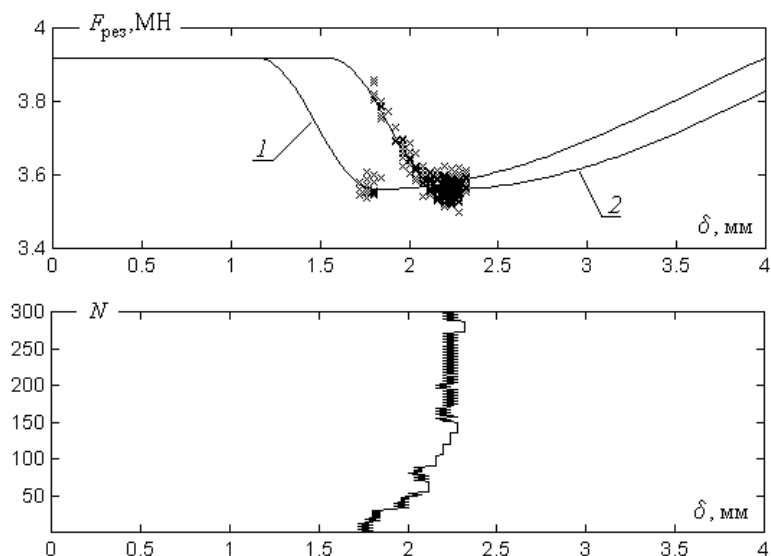
## Подстройка зазора



## Отработка изменения усилия резки



## Отработка изменения оптимального зазора



На графиках обозначены

$F_{рез}$  - усилие реза;

$\delta$  - боковой зазор между ножами;

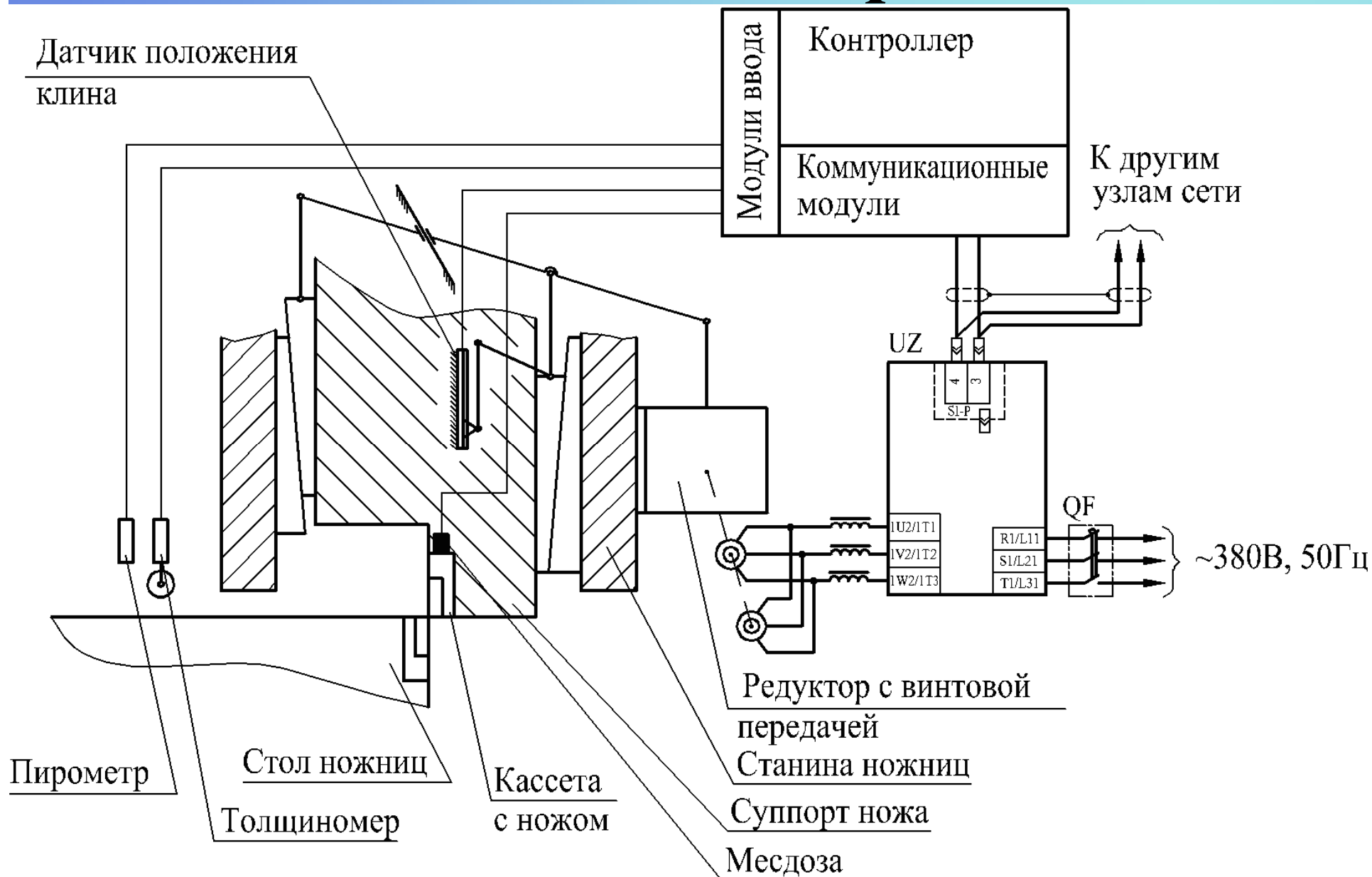
$N$  - число резов.

1 - график зависимости силы реза от бокового зазора в начале моделирования;

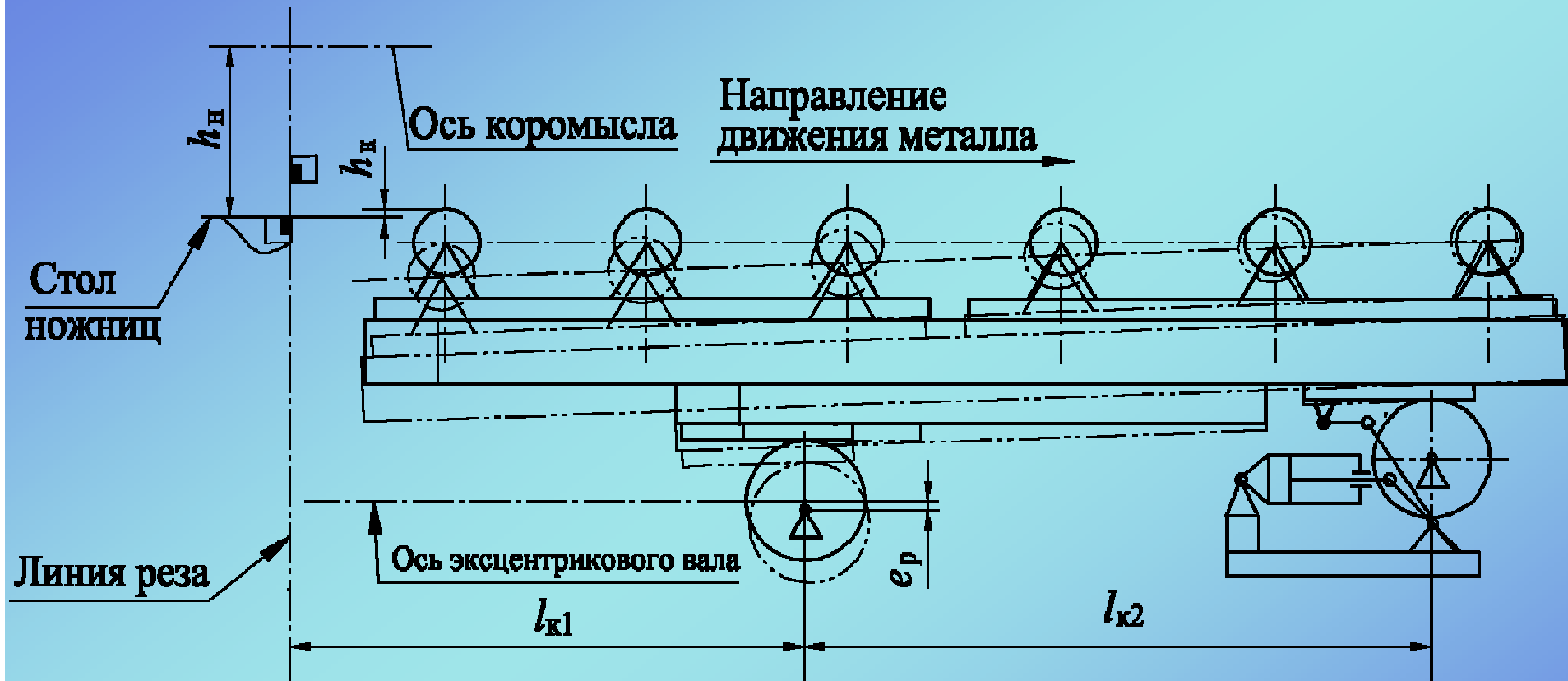
2 - график зависимости силы реза от бокового зазора в конце моделирования;

× - измеренное значение силы реза.

# Структура системы оптимизации бокового зазора



# Оптимизация взаимного перемещения ножниц и рольганга качающегося



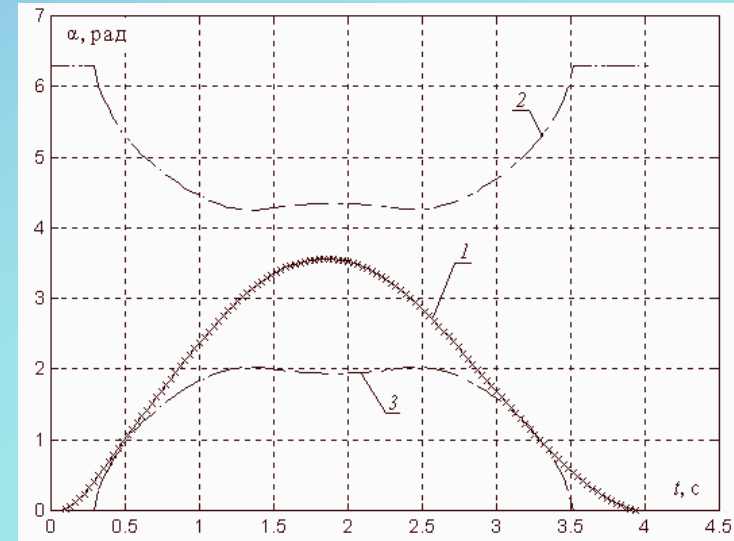
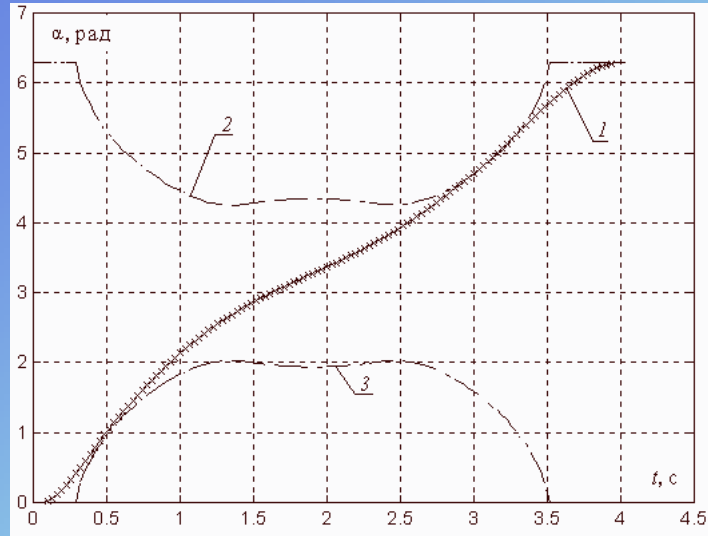
Положение края рольганга у линии реза

$$y_{pk} = \frac{l_{k1} + l_{k2}}{l_{k2}} e_p (\cos \alpha_p - 1) + h_k + h_H$$

Ограничения, накладываемые на угол поворота эксцентрикового вала

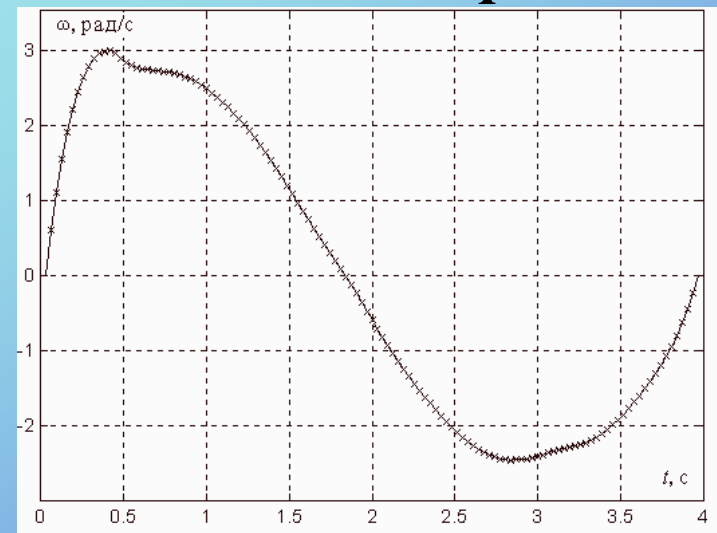
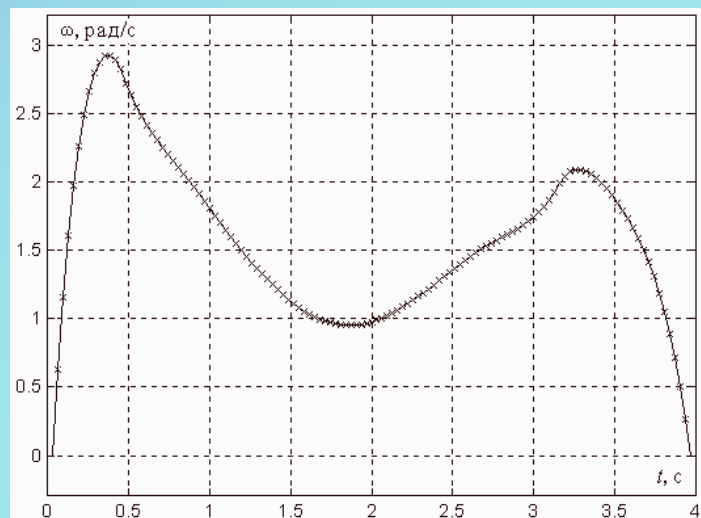
$$\cos \alpha_p \leq 1 + \frac{(y_M - h - \Delta h' - h_k - h_H) l_{k2}}{(l_{k1} + l_{k2}) e_p}$$

## Графики оптимизированных заданий положений эксцентриков при нереверсивном и реверсивном движении

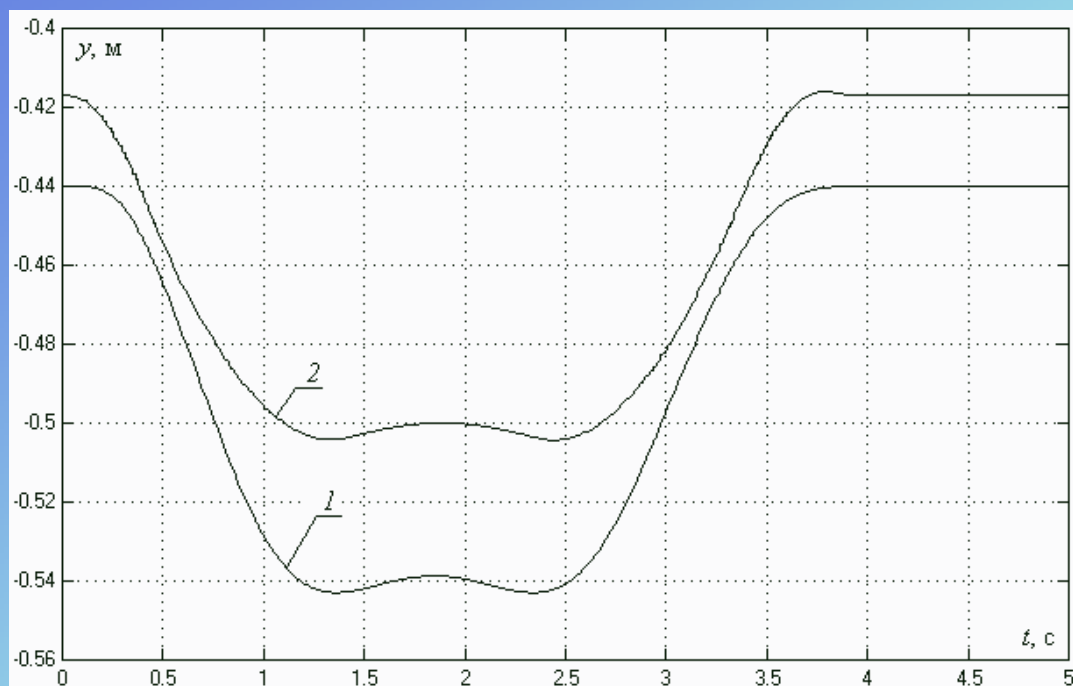


1 - задание положения кривошипа;  
2, 3 - верхнее и нижнее ограничения угла поворота эксцентрика.

## Графики оптимизированных заданий скорости



## Положение края рольганга у линии реза при реверсивном вращении эксцентрика



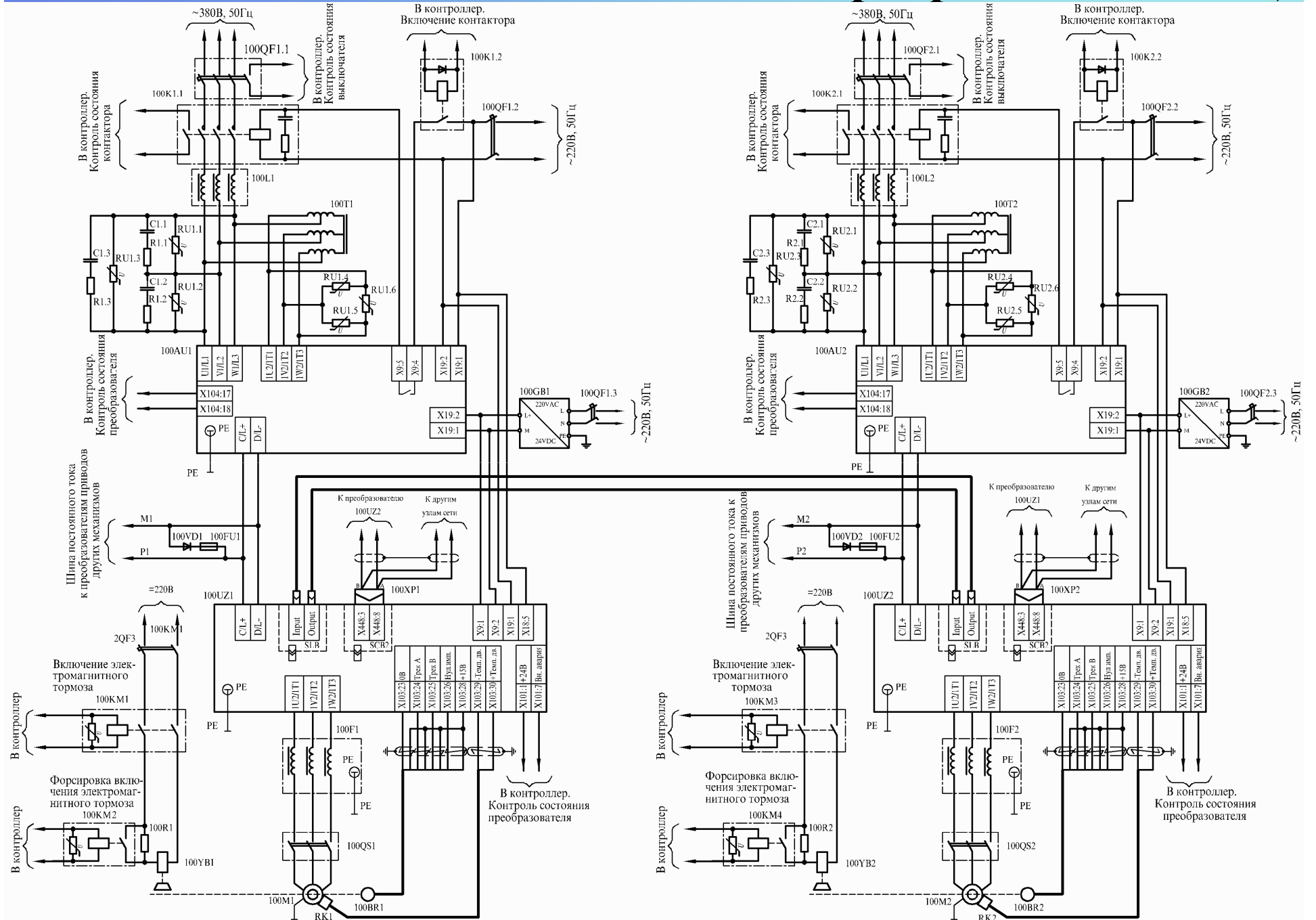
1 - положение края рольганга у линии реза;  
2 - положение нижней кромки листа.

### Результат работы алгоритма

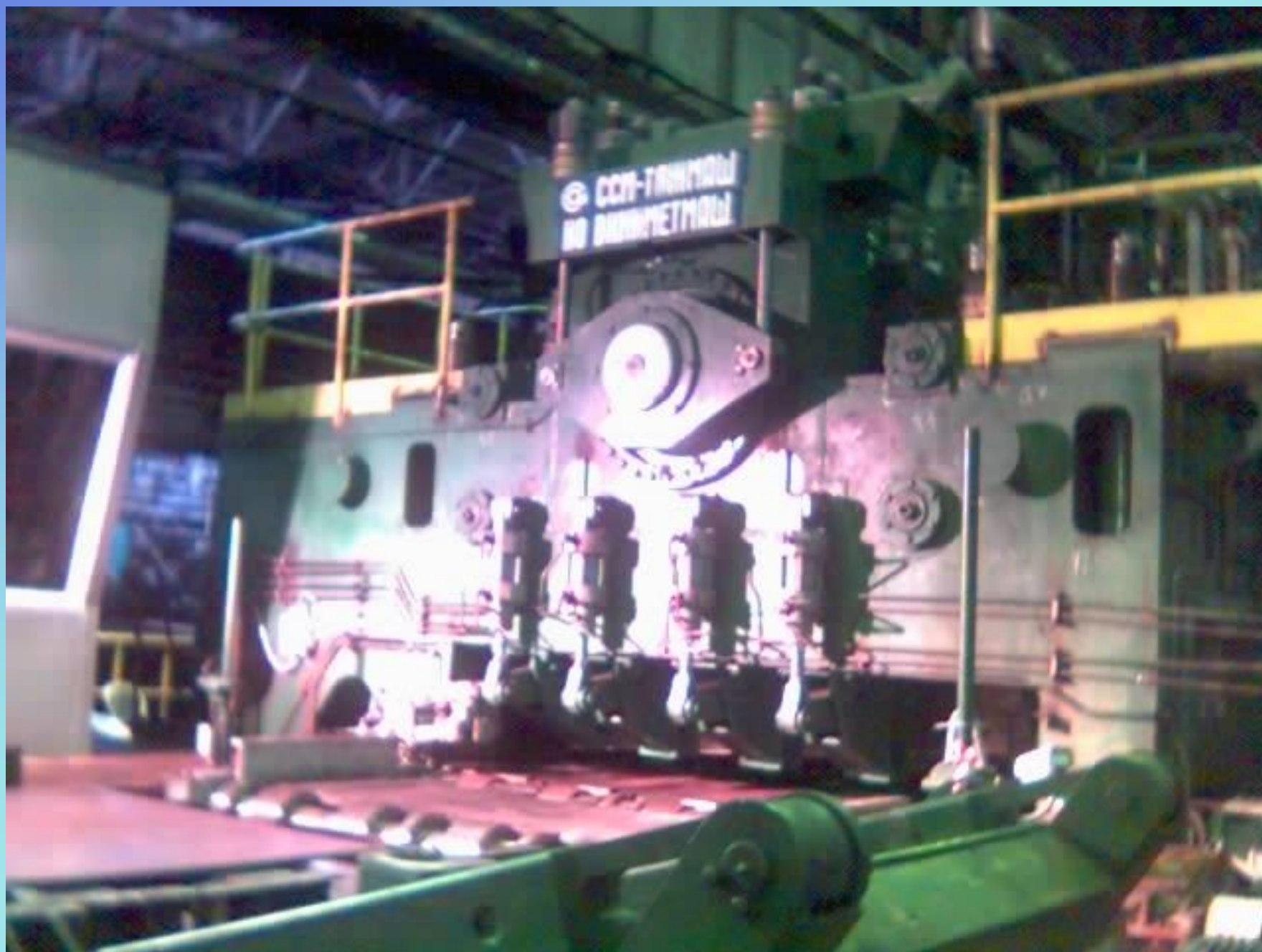
Величина	Вариант графика задания положения		
	Проектный	Первый	Второй
Загрузка по нагреву при цикле 10 с, %	90,8	73,9	63,2
Эквивалентный момент при цикле 10 с, Н м	276,8	225,5	192,8
Энергозатраты за цикл резки, кДж	13,08	10,59	9,592



# Схема силовой части главного электропривода ножницы



## *Однокривошипные ножницы поперечной резки*



# Структура разработанных программных средств

