

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ

Жуков С.Ф., Шамрай А.А.

ДВНЗ «Донецкий национальный технический университет»

center@quantum.com.ua

**Введение в проблему.** Многодвигательные электроприводы промышленных установок выполняются с использованием электродвигателей переменного и постоянного тока. Многодвигательные электроприводы с индивидуальными управляемыми преобразователями (УП) на каждый электропривод применяются без ограничений по мощности и обеспечивают более гибкое управление промышленными установками при широком диапазоне регулирования скорости.

Локальные системы управления каждым электродвигателем выполняются по типовым схемам. Взаимосвязь локальных систем осуществляется по цепи нагрузки через общее обрабатываемое полотно и по цепи управления для задания общей скорости электроприводов и соотношения скоростей электроприводов отдельных секций.

Взаимосвязь локальных систем управления электроприводами через общее обрабатываемое полотно имеется в тех случаях, когда движение полотна в межсекционном промежутке происходит с определенным значением натяжения  $F$ . Разработка математической модели объекта имеющего взаимосвязанные многомассовые механические подсистемы, управление которыми осуществляется многодвигательным электроприводом, служит для формирования функциональной подсистемы для обеспечения показателей качества технологического процесса. Основные соотношения, характеризующие взаимосвязь электроприводов через полотно, могут быть установлены на основании схемы, представленной на рисунке 1.

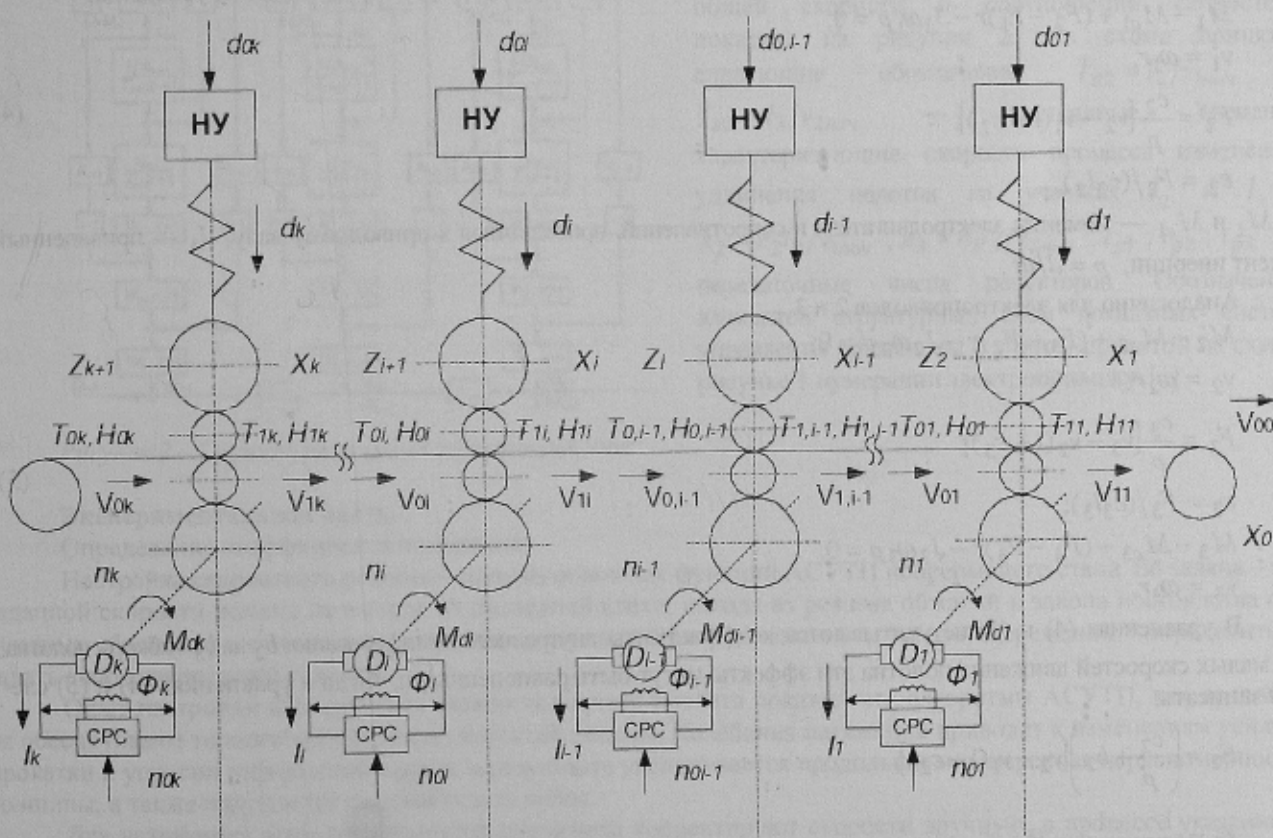


Рисунок 1 - блок-схема  $k$ -клетьевого стана и основные переменные, характеризующие работу стана

**Цель исследования** – по результатам проведенных исследований создать энергосиловую модель 4-х клетьевого стана. Сопоставить расчетные (теоретические) значения основных величин (мощности, усилия прокатки, толщины листа, натяжения и скорости в каждом промежутке между клетями) с экспериментальными данными. Провести анализ режимов прокатки по критериям энергосбережения, производительности и допустимого сортамента стана. Обосновать необходимость модернизации систем регулирования стана: системы регулирования толщины и натяжения (САРТИН), системы управления станом (СУС) и системы управления скоростными режимами стана (СУРС). Определить возможность оптимизации режима прокатки металла.

### Решение поставленных задач.

**Теоретическая часть.** Для простоты рассмотрения предполагается, что радиусы всех приводных валов одинаковы:

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r, \quad (1)$$

а упругие деформации в кинематической цепи «двигатель — приводной вал» каждого из электроприводов отсутствуют в рассматриваемой полосе частот.

При рассмотрении динамических процессов в натянутом в межсекционном промежутке полотне делаются следующие допущения:

- полотно однородно и имеет по всей длине одинаковую толщину и ширину;
- масса материала не влияет на его деформацию;
- деформация в полотне имеет упругий характер, причем равномерно распределяется по поперечному сечению;
- волновые процессы, связанные с распределением деформации по длине, несущественны;
- проскальзывание движущегося полотна относительно приводных валов отсутствует.

Состояние полотна на участке растяжения длиной  $l_2$  описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = [v_2 - v_1(1 + \varepsilon_2)] \frac{1}{l_2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon = \Delta l_2 / l_2$  — относительное удлинение ( $\Delta l_2$  — абсолютное значение растяжения);  $v_1$  и  $v_2$  — линейные скорости полотна в начале и в конце участка растяжения.

Натяжение, возникающее в материале,

$$F_2 = c_2 \Delta l_2 = c_2 l_2 \varepsilon_2, \quad (3)$$

где  $c_2$  — коэффициент жесткости полотна при растяжении.

Подставляя в (3) значение  $\varepsilon_2$  из уравнения (2) и записывая уравнение равновесия моментов в электроприводе для случая, когда параметры электропривода приведены к приводному валу, получим систему уравнений

$$\begin{aligned} M_1 - M_{c1} + (F_2 - F_1)r - J_1 \omega_1 p &= 0, \\ v_1 &= \omega_1 r, \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{c_2}{p} [v_2 - v_1(1 + \varepsilon_2)]$$

$$\varepsilon_2 = F_2 / (c_2 l_2),$$

где  $M_1$  и  $M_{c1}$  — моменты электродвигателя и сопротивлений, приведенные к приводному валу;  $J_1$  — приведенный момент инерции;  $p = d/dt$ .

Аналогично для электроприводов 2 и 3:

$$\begin{aligned} M_2 - M_{c2} + (F_3 - F_2)r - J_2 \omega_2 p &= 0, \\ v_2 &= \omega_2 r, \\ F_3 &= \frac{c_3}{p} [v_3 - v_2(1 + \varepsilon_3)], \\ \varepsilon_3 &= F_3 / (c_3 l_3), \\ M_3 - M_{c3} + (F_4 - F_3)r - J_3 \omega_3 p &= 0, \\ v_3 &= \omega_3 r. \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) не учитываются коэффициенты внутреннего демпфирования  $b_2$  и  $b_3$  гибкого полотна. Для малых скоростей движения полотна эти эффекты могут быть равноценными, тогда в уравнениях (4) и (5) следует записать:

$$\begin{aligned} F_2 &= \left( \frac{c_2}{p} + b_2 \right) [v_2 - v_1(1 + \varepsilon_2)], \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{l_2} \frac{1}{c_2 + b_2 p} F_2, \\ F_3 &= \left( \frac{c_3}{p} + b_3 \right) [v_3 - v_2(1 + \varepsilon_3)], \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{l_3} \frac{1}{c_3 + b_3 p} F_3 \end{aligned} \quad (6)$$



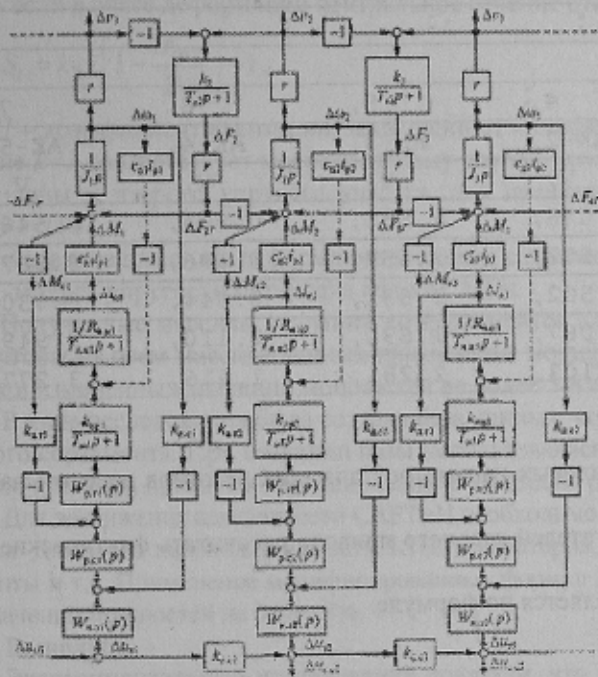
Системы уравнений (4) и (5) являются нелинейными из-за наличия произведений  $v_1 \varepsilon_2$  и  $v_2 \varepsilon_3$ . Рассматривая переходные процессы в приращениях координат относительно начальных значений, можно записать системы уравнений в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta M_1 - \Delta M_{c1} + (\Delta F_2 - \Delta F_1)r - J_1 \Delta \omega_1 p &= 0; \quad \Delta v_1 = \Delta \omega_1 r; \\ \Delta F_2 = \frac{c_2}{p} [\Delta v_2 - \Delta v_1(1 + \varepsilon_{2нач}) - v_{1нач} \Delta \varepsilon_2]; \quad \Delta \varepsilon_2 = \frac{\Delta F_2}{c_2 l_2}; \\ \Delta M_2 - \Delta M_{c2} + (\Delta F_3 - \Delta F_2)r - J_2 \Delta \omega_2 p &= 0; \quad \Delta v_2 = \Delta \omega_2 r; \\ \Delta F_3 = \frac{c_3}{p} [\Delta v_3 - \Delta v_2(1 + \varepsilon_{3нач}) - v_{2нач} \Delta \varepsilon_3]; \quad \Delta \varepsilon_3 = \frac{\Delta F_3}{c_3 l_3}; \\ \Delta M_3 - \Delta M_{c3} + (\Delta F_4 - \Delta F_3)r - J_3 \Delta \omega_3 p &= 0; \quad \Delta v_3 = \Delta \omega_3 r. \end{aligned} \quad (7)$$

где  $v_{1нач}, v_{2нач}$  — начальные значения линейных скоростей движения полотна;  $\varepsilon_{2нач}, \varepsilon_{3нач}$  — начальные значения относительных удлинений.

В связи с тем что начальные значения относительных удлинений  $\varepsilon_{2нач}, \varepsilon_{3нач}$  значительно меньше 1, можно в уравнениях системы (7) считать справедливыми приближенные равенства:

$$(1 + \varepsilon_{2нач}) \approx 1; \quad (1 + \varepsilon_{3нач}) \approx 1. \quad (8)$$



Структурная схема трех электроприводов постоянного тока, взаимосвязанных движущимся полотном, полученная на основании системы уравнений (7) с учетом (8) и дополненная структурными схемами локальных систем управления, взаимосвязанных по цепям задания общей скорости и соотношений скоростей, показана на рисунке 2. На схеме приняты следующие обозначения:  $T_{\varepsilon 2} = l_2 / v_{1нач}$ ;  $T_{\varepsilon 3} = l_3 / v_{2нач}$  — постоянные времени, характеризующие скорость процесса изменения удлинения полотна на участках  $l_2$  и  $l_3$ ;  $k_2 = c_2 l_2 / v_{1нач}$ ;  $k_3 = c_3 l_3 / v_{2нач}$ ;  $i_{p1}$ ;  $i_{p2}$ ;  $i_{p3}$  — передаточные числа редукторов. Обозначения элементов структурных схем локальных систем управления применены с учетом принятой на схеме рисунке 1 нумерации электроприводов. [1]

Рисунок 2 – Структурная схема электроприводов

**Экспериментальная часть.**

**Определение коэффициента опережения.**

Настройка скоростного режима – одна из основных функций АСУТП непрерывного стана. Её задача – по заданной скорости полосы на выходе из последней клетки, исходя из режима обжатий и запаса постоянства секундных объемов, рассчитать скорость полосы в каждой клетке, а затем – с учетом опережений – определить и задать скорости вращения валков.

Опыт настройки непрерывных станов холодного проката показал, что алгоритмы АСУТП, как правило, не обеспечивают точного определения скоростей полосы. Колебания натяжений приводят к изменениям усилий прокатки и упругих деформаций валков, в результате увеличивается продольная и поперечная неравномерность толщины, а также нарушается плоскостность полос.

Для устранения этих погрешностей операторы корректируют скорости вручную, в процессе указанных корректировок часть длины полос прокатывают с увеличенными отклонениями от заданных размеров и плоскостности.

Причина описанной особенности процесса настройки состоит в том, что из-за отсутствия на станах датчиков, непосредственно измеряющих скорость движения полосы, её скорости по клетям в АСУТП определяются по окружным скоростям рабочих валков.

Для количественной оценки расхождения скорости полосы и окружной скорости валков используют коэффициент опережения:

$$S_i = \frac{V_i - V_{Bi}}{V_{Bi}} = \frac{V_i}{V_{Bi}} - 1, \quad (9)$$

где  $S_i$  – коэффициент опережения в  $i$ -й рабочей клетке;

$V_i$  – скорость полосы на выходе из валков  $i$ -й рабочей клетки (скорость прокатки);

$V_{Bi}$  – скорость вращения валков  $i$ -й рабочей клетки.

В качестве исходных данных принимаем параметры режима прокатки и характеристики материала полосы и валков, диаметр бочки рабочего валка, модули упругости и коэффициенты Пуассона полосы и валков. Среднее сопротивление деформации определяют по справочным данным. В таблице 1 показаны полученные предварительные результаты расчетов энергосиловой модели.

Таблица 1 – Расчетные данные экспериментов

ЦХП, N274, RPUSK274.21C						
3, АК-1, Ток 4 кл БР2 К9,						
4, АК-2, Напр 4 кл ВВД К5,						
5, АК-3, Скорость 4 кл БД К9,						
6, АК-4, Ток моталки ВВД К8,						
7, АК-5, Напр моталки ВВД К5,						
1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,
N,	t,	AK-1,	AK-2,	AK-3,	AK-4,	AK-5,
,	s,	V,	V,	V,	V,	V,
1,	0.000000,	-1.481,	5.086,	2.831,	0.904,	8.546,
2933,	29.320393,	-1.285,	6.502,	3.657,	0.996,	8.887,
3166,	31.650424,	-1.285,	6.502,	3.631,	0.944,	8.730,
14027,	140.261880,	-2.097,	3.067,	1.691,	2.110,	2.949,
22451,	224.503010,	-1.363,	4.103,	2.281,	1.416,	3.277,

#### Алгоритм расчета.

С помощью модели технологических и энергосиловых параметров для всех режимов рассчитываются значения мощностей двигателей рабочих клеток,  $N_{дв(р)}$

Через измеряемые электрические параметры двигателей главного привода рассчитать фактические значения мощностей по следующей методике.

Фактическая мощность двигателя  $i$ -й клетки определяется по формуле:

$$N_{дв(ф)} = 0,105 * M_{дв} * n, \quad (10)$$

где  $M_{дв}$  – момент на валу двигателя, Н\*м;

$n$  – частота вращения вала двигателя, мин<sup>-1</sup>.

Момент на валу двигателя определяется по формуле:

$$M_{дв} = N_{эм} / \omega, \quad (11)$$

где  $N_{эм}$  – электромагнитная мощность машины постоянного тока с независимым возбуждением, кВт;

$\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>:  $\omega = \pi n / 30$ .

Электромагнитная мощность рассчитывается по формуле:

$$N_{эм} = E_n * I_n, \quad (12)$$

где  $E_n$  – электродвижущая сила (ЭДС) якоря, В;

$I_n$  – ток якоря двигателя главного привода рабочей клетки, А.

При постоянной скорости прокатки (не учитываются периоды разгона и торможения) ЭДС определяется по формуле:

$$E_n = U_n - I_n * R_n, \quad (13)$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение на якоре;

$R_n$  – полное сопротивление цепи якоря двигателя.

Подставив (11) – (13) в (10), получим следующее выражение для определения фактической мощности двигателя:

$$N_{дв(ф)} = 3 * 15 * I_n * (U_n - I_n * R_n) / \pi, \quad (14)$$

Рассчитанные значения мощности электродвигателей  $N_{дв(р)}$  сопоставить с фактическими  $N_{дв(ф)}$ , получив ряд погрешностей расчета:

$$(N_{дв(ф)} - N_{дв(р)}) / N_{дв(ф)} * 100\%. \quad (15)$$

В данном случае коэффициентами адаптации являются:

а)  $k_{см}$  – коэффициент учитывающий природу смазки, входящий в формулу коэффициента трения:



$$\mu_1 = \frac{k_{CM} \cdot [1 + (0,4 + 0,01 \cdot \varepsilon_i) \cdot R_a]}{1 + 0,25 \cdot \sqrt{v_{50}} - 0,005 \cdot v_{50}} \left[ 0,07 - \frac{0,1 \cdot V_i^2}{2 \cdot (1 + V_i) + 3 \cdot V_i^2} \right], \quad (16)$$

где:  $\varepsilon_i$  – частное относительное обжатие в клетке, %;

$R_a$  – средняя высота микронеровностей на поверхности валка, мкм;

$v_{50}$  – кинематическая вязкость смазки при 50 °С, сСт;

$V_i$  – скорость прокатки, м/с.

б) коэффициент опережения, рассчитываемый по формулам (17) или (18):

- если в очаге деформации имеется нейтральное сечение:

$$S_i = k_1 \cdot \frac{h_{H1}}{h_i \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \frac{\alpha}{2}}} - 1, \quad (17)$$

где  $k_1$  – коэффициент, значение которого уточняется при адаптации технологических и энергосиловых параметров;

$h_{H1}$  – толщина полосы в нейтральном сечении, мм;

$h_i$  – толщина полосы на выходе из  $i$ -й клетки, мм;

$\alpha/2$  – угол, характеризующий очаг деформации.

- если в очаге деформации нейтральное сечение отсутствует:

$$S_i = k_2 \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{\Phi 2}}{E_n} \right) - 1, \quad (18)$$

где  $k_2 \leq 1$  – коэффициент адаптации, зависящий от коэффициента трения в очаге деформации. Максимальное его значение  $k=1$  соответствует маловероятному случаю, когда нейтральное сечение совпадает с границей пластической зоны и второго упругого участка, для предварительной настройки стана рекомендуется принимать  $k_2=0,96-0,98$ .

$\sigma_{\Phi 2}$  – среднее для очага деформации значение сопротивления пластической деформации, МПа;

$E_n$  – модуль упругости материала полосы, МПа.

Полученные массивы значений коэффициентов адаптации  $k_{CM}$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  обработать статистическими методами, чтобы на всем массиве данных применение модифицированных формул обеспечивало погрешность расчетных и измеренных значений мощностей не более 5-8%.

В ходе исследования была создана база данных, которая содержит основные сведения о процессе проката типового сортамента. При создании базы использовалась существующая АСУТП. Основные электрические показатели процесса прокатки зафиксированы с помощью регистратора.

Для достижения адекватности САРТИН необходимо провести ряд приближений к реальному объекту регулирования. Для этого необходимо учесть, КПД генераторов, двигателей, механических передач, передаточные коэффициенты и т.д. Применение модифицированных формул должно обеспечивать погрешность расчетных и измеренных значений мощностей не более 8%.

#### Выводы.

Экспериментальные исследования показали, что возможности стана не используются на полную мощность. В процессе ручных корректировок скорости часть длины полос прокатывают с увеличенными отклонениями от заданных размеров и плоскостности. Колебания натяжений приводят к изменениям усилий прокатки и упругих деформаций валков, в результате увеличивается продольная и поперечная неравномерность толщины, а также нарушается плоскостность полос.

Адаптация электротехнического комплекса СУРСа, САРТИНа и СУСа к объекту исследования с применением предложенной концепции регулирования позволит улучшить:

- скоростные режимы прокатки, режимы обжатий, натяжений и усилий;
- стабилизировать толщину конечного проката;
- увеличить производительность стапа;
- настроить режим прокатки стана для максимального использования его функциональных возможностей.

Направление дальнейшего исследования стана связаны с увеличением устойчивости процесса прокатки и адаптацией предложенной концепции САРТИН к существующей системе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Непрерывные станы как объект автоматизации. Дружинин Н.Н. М., «Металлургия», 1975, 336с.
2. Автоматизация технологических процессов холодной прокатки листов/ Лямбах Р.В., Шишкинский В.И. – М.: Metallurgia, 1981. 264 с.