

УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСКОРЕНИЯ ПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ, КАК СПОСОБА ЗАКРЫТИЯ ЗАЗОРОВ

Выполнены моделирование и анализ результатов замыкания зазора на шпиндельном участке линии привода прокатной клетки способом ускоренного вращения двигателя перед захватом полосы.

Состояние вопроса

Известно, что открытое состояние угловых зазоров в линии главного привода прокатной клетки приводит к существенным ударным нагрузкам в период захвата заготовки валками [1,2,3]. Предложен ряд способов и устройств, цель которых сводится к тому, чтобы к моменту захвата зазоры были закрыты [4,5]. Например, путём незначительного подтормаживания валков или разгона привода. Однако, до настоящего времени известные технические решения не нашли широкого практического применения. Исключения составляют обжимные станы дуо. Благодаря реверсивному режиму работы здесь захват заготовки осуществляют в режиме ускорения привода верхнего и нижнего валков.

В первых чистовых клетях стана 2000 перед захватом полосы увеличивают скорость электродвигателя, предварительно уменьшив её в период холостого хода [5].

В клетях широкополосных станов при реконструкции устанавливают двигатели постоянного или переменного тока с регулируемой частотой вращения. В связи с этим возникает вопрос, насколько эффективно применение ускорения привода в этих станах с целью закрытия угловых зазоров. По сравнению с обжимными станами кинематические схемы главных линий клетей листовых станов более сложные. Они содержат шестерённую клетку и одно- или двухступенчатые редукторы со сравнительно большим приведенным моментом инерции колёс, структура клетки четырёхвалковая. Здесь большое количество зазорообразующих кинематических пар.

Постановка задачи.

Задача состоит в определении влияния ускоренного вращения привода на закрытие зазора в шпиндельном соединении перед захватом металла и на динамические нагрузки в контрольных точках линии (моторном и шпиндельном участках), что, в конечном итоге, даст возможность установить эффективность рассматриваемого способа закрытия зазора.

Метод решения задачи.

На примере конкретной линии привода клетки путём моделирования линии главного привода рассмотрены варианты расчетов с вариацией ускорений вращения двигателя и заданным, открытым перед захватом полосы угловым зазором $\Delta\varphi$ в шпиндельном участке, непосредственно испы-

тывающем ударные нагрузки. Основными оценочными параметрами эффективности вариантов являются упругие моменты на моторном и шпиндельном участках. Расчётная схема линии представлена в виде пятимассовой рядной эквивалентной расчётной схемы, включающей двигатель, редуктор, коренную муфту, шестерённые валки и валковую систему, и решена относительно упругих моментов с зазорами в связях между упомянутыми массами. Система перед захватом вращается в холостом режиме с постоянной угловой скоростью ω_1 .

Анализ решений

В качестве конкретного примера взята линия привода клетки № 4 черновой группы листопрокатного стана 1680 с двигателем постоянного тока, на котором сотрудниками Института чёрной металлургии НАНУ совместно с работниками стана были проведены экспериментальные исследования по ускоренному режиму вращения привода. На рис.1 представлены изменения момента упругости моторного вала M_m без ускорения привода (а) и с ускорением (б).

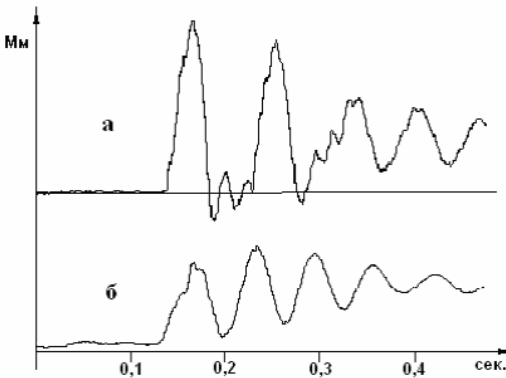


Рис. 1. Экспериментальные моменты на моторном валу M_m клетки № 4 стана 1680 без регулирования ускорения (а) и с ускорением привода в 1 об/с² (б).

Как видно из примера, ускоренный разгон привода способствует снижению экстремальных моментов, делая линию привода перед захватом более жёсткой.

Однако, характер изменения момента а) говорит о наличии зазора в редукторе или на участке моторного вала. При регулировании ускорением данные зазоры в первую очередь закрываются по мере следования инерционной нагрузки и моментов сопротивления трения от двигателя к валкам. Прокатные валки в передающей механической цепочке линии являются конечным звеном и при отсутствии нагрузки на валки возможно повторное открытие зазора до захвата полосы. Поэтому целесообразно выяснить возможные последствия ускоренного вращения привода на соединение шпинделя с валками при наличии между ними открытого перед захватом углового зазора.

Осуществление управления скоростью валков можно реализовать формированием момента $M_{\text{дв}}$ на двигателе постоянного тока:

$$\dot{M}_{\text{дв}} = -a \cdot M_{\text{дв}} + b \cdot (\omega_0 - \omega_{\text{дв}}), \quad (1)$$

где a, b – постоянные коэффициенты – характеристики двигателя,
 $\omega_{0в}$ – угловая скорость вала двигателя.

Для имитации регулирования темпом задания скорости ω_0 на двигателе постоянного тока (1) принята зависимость:

$$\omega_0 = K t + \omega_{1,}$$

где ω_1 – пониженная холостая скорость валков,

$K = (\omega_0 - \omega_1) / t_0$ – темп увеличения скорости (ускорение), который зависит от t_0 – времени достижения рабочей скорости прокатки ω_0 .

Скорость холостого хода принята равной $\omega_1 = \varepsilon \omega_0$, где ε – доля понижения скорости холостого хода относительно рабочей. В дальнейших примерах ε принята равной 0,9.

По прошествии времени t_0 валки нагружаются технологическим моментом прокатки, пропорциональным времени захвата, составляющим 0,7 сек. (рис.2,а).

Рассчитаны варианты с ускорением вращения двигателя к моменту захвата. Результаты некоторых из них представлены на рис.2. Для каждого варианта приводятся моменты на моторном и шпиндельном участках и траектория изменения относительного углового положения шпинделя и валков – $\Delta\varphi = \varphi_{ш} - \varphi_{в}$ в поле зазора, который составляет для всех вариантов 0,01 радиан. Моменты приложения технологической нагрузки $M_{пр}$ обозначен на временной шкале чертой (рис.2), а начало ускорения – «х».

Изменение $\Delta\varphi$ в период ускоренного вращения привода, приложения момента прокатки, замыкания зазора (нулевое значение $\Delta\varphi$) и соответствующие этим периодам экстремальные значения момента упругости на моторном и шпиндельном участках иллюстрируют эффективность предлагаемого управления двигателем.

При захвате полосы без предварительного ускорения привода (рис.2,а) происходит закрытие зазора приложением технологической нагрузки. Динамический момент на моторном валу превышает его величину при установившемся движении в 1,7 раза. Процесс закрытия зазора происходит сразу после приложения момента прокатки.

При минимальном ускорении (рис.2,б) на моторном валу в период разгона среднее значение момента равно силам инерции звеньев передачи, а экстремальная величина достигает отрицательного значения. Последний эффект характерен в переходный период смены ускоренного движения заданием технологической нагрузки (рис.2,б,в,г). За период разгона зазор успевает закрыться и перед захватом полосы второй раз раскрыться.

При повышении ускорения в два раза (рис.2,в) зазор закрывается раньше, чем приложена нагрузка. Динамический момент M_m в период приложения технологической нагрузки уменьшается по сравнению с вариантом а), но увеличивается в фазе разгона.

Дальнейшее повышение ускорения (рис.2,г) ведёт к увеличению динамического момента на моторном участке, обусловленное инерцией редуктора, коренной муфты, шестерённой клетки.

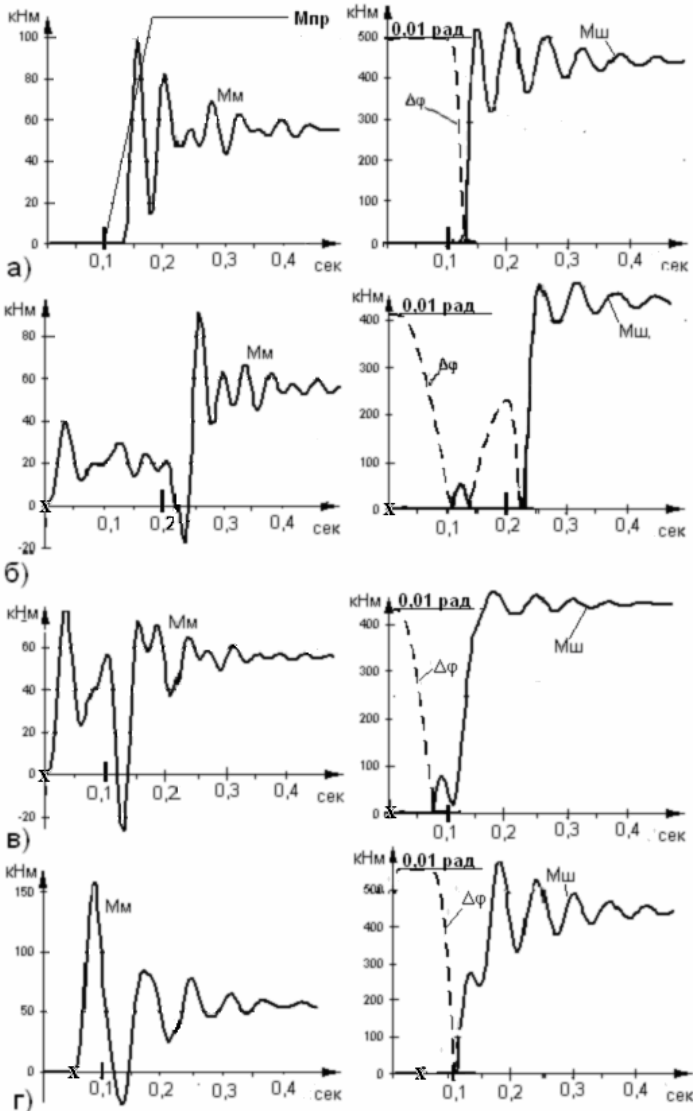


Рис. 2. Динамические моменты на моторном валу (Мм), шпиндельном соединении (Мш) и угловое расстояние прокатного вала относительно шпинделя в поле зазора при рабочем режиме задания скорости ω_0 (а) и с линейным ускорением валков равными: $K = 0,15 \text{ м/с}^2$ (б), $K = 0,3 \text{ м/с}^2$ (в), $K = 0,6 \text{ м/с}^2$ (г).

В результате достигается трёхкратное динамическое превышение момента над его установившемся значением $M_{пр}$ на моторном валу. Во всех вариантах изменения момента M_m на шпиндельном участке незначительны по сравнению с моторным, на который ложится вся нагрузка по преодолению сил инерции линии привода.

Как видно из примера (рис.2), регулирование ускорения перед захватом полосы ведёт к дополнительному возмущению в передаточных звеньях линии привода хотя зазор перед захватом металла закрывается и иногда уменьшается амплитуда колебаний на шпиндельном и моторном участках, однако, они носят неоднозначный характер. Из трёх вариантов применения ускоренного вращения двигателя наиболее оптимален вариант в) с точки зрения величин максимальных нагрузок в период начала прокатки. Следовательно, возможен оптимальный вариант в предварительном управлении приводом перед захватом полосы.

Для определения закономерности и качественной оценки связи ускорений, моментов масс передаточных звеньев привода с возможными максимальными значениями моментов в связях, ограничим пятимассовую систему двухмассовой: $J_{\partial e}$ – приведенными двигателем с передаточными звеньями и валков J_b , соединённых упругой связью в шпинделе $M_{12}K$ массе $J_{дв}$ приложен движущий момент $M_{дв}$, который разгоняет две массы от угловой скорости $-\omega_1$ до рабочей ω_0 с ускорением K .

Предположим, двигатель разгоняет линию привода с валками до рабочей скорости за время t_0 . При наличии зазора $\Delta\varphi$ между двумя массами скорость массы $J_{\partial e}$ при завершении закрытия зазора составляет:

$$\omega_{\partial e} = Kt_1 + \omega_1, (2)$$

где время закрытия зазора $\Delta\varphi$ определяется из зависимости:

$$\Delta\varphi = 0,5 \cdot K \cdot t_1^2 + \omega_1 \cdot t_1.$$

Таким образом, скорость двигателя в момент контакта с валками:

$$\omega_{\partial e} = \sqrt{\omega_1^2 + \Delta\varphi \cdot K^2}. (3)$$

При аналитическом решении двухмассовой расчётной схемы получим динамическое приращение на шпиндельном участке от удара при закрытии зазора:

$$M_{12} = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot J_{\partial e} \cdot \alpha}{1 + \alpha}} (\omega_{\partial e} - \omega_1) \cdot \sin(\beta t).$$

где: $\beta^2 = C_{12} (1/J_e + 1/J_{\partial e})$, $\alpha = J_e/J_{\partial e}$

t – время совместного перемещения масс двигателя и валков, отсчитываемое от момента контакта.

Если двигатель после закрытия зазора не достиг рабочей скорости, когда $t_0 > t_1$, то с учётом значения скорости первой массы в момент замыка-

ния зазора (3) и при замене частоты β через период колебаний $T = 2\pi / \beta$ динамическое приращение M_{12} представимо в виде:

$$M_{12} = \omega_1 \cdot (\sqrt{1 + \Delta\phi \cdot K / \omega_1^2} - 1) \cdot \sqrt{\frac{C_{12} \cdot J_{об} \cdot \alpha}{1 + \alpha}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T}\right). \quad (4)$$

В идеальном случае, если не учитывать сопротивление трения в опорах валков и время повторного ударного взаимодействия валков и шпинделя, нарушение контакта валками и двигателем возможно при $t = n T$, где n – целое число. Поэтому при времени набора рабочей скорости $t_0 > T$ возможно повторное открытие зазора, как это представлено в варианте рис. 2б, где время t_0 в три раза больше периода собственных колебаний (0,7 сек.) привода.

Практически соотношение $\Delta\phi \cdot K / \omega_1^2$ меньше единицы и поэтому второй сомножитель в (4) можно разложить в ряд, оставив первых два члена, заменив таким образом первые два сомножителя на $\Delta\phi \cdot K / \omega_1$. Исходя из последнего соотношения видно, что максимальная амплитуда динамического момента в холостом режиме прямо пропорциональна величине ускорения K и обратно пропорциональна скорости ω_1 . Если сравнить варианты рис. 2б, в, то повышение ускорения в два раза не влечёт повышения момента на шпиндельном участке, как следовало бы по упомянутой зависимости, а скорее наоборот в два раза снижается в период загрузки технологическим моментом. Это можно объяснить тем, что время ускоренного режима холостого хода практически совпадает с периодом собственных колебаний привода, т.е. когда момент M_{12} достигает минимального значения. Для варианта рис. 2г характерно увеличение динамического момента за счёт увеличения момента на валопроводе в период разгона, во-вторых время приложения нагрузки соответствует половине периода собственных колебаний привода.

Следует отметить, что уменьшение величины предварительного ускорения вращения снижает динамические нагрузки в линии привода, но содержит в себе опасность повторного раскрытия зазоров в шпинделе. С другой стороны, повышение ускорения увеличивает относительную скорость соударения валков и привода, а следовательно моменты на моторном валу и шпиндельном участке (рис. 2г). Поэтому оптимальным вариантом для динамики переходного процесса в приводе является минимальное значение M_{12} к моменту захвата полосы, т.е. при задании ускорения:

$$K = \frac{\omega_0 - \omega_1}{n \cdot T}. \quad (5)$$

На практике рассматриваемый способ закрытия зазора возможно осуществить только автоматическим регулированием вращения двигателя постоянного тока с учётом динамических свойств линии привода. При расчётной оценке периода колебаний T следует учесть и характеристики самого двигателя (1).

Выводы

1. Замыкание зазора на шпиндельном участке методом ускоренного вращения привода возможно автоматическим регулированием момента на двигателе с учётом динамических свойств всей линии привода, включая и динамические характеристики двигателя.

2. Время выхода скорости вращения привода на рабочий режим к моменту захвата полосы должно быть кратно наибольшему периоду собственных колебаний линии привода.

1. *Смирнов В.В., Яковлев Р.А.* Механика приводов прокатных станов. – М., «Металлургия», 1977. – 216 с.
2. *Веревев В.В.* Закономерности изменения коэффициента динамичности в линии привода прокатной клетки в процессе её работы. //Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. Сб. ИЧМ НАНУ. – 2005. – Вып.№10. – С.292–299.
3. *Веревев В.В., Большаков В.И.* Особенности проявления зазоров в главных линиях прокатных клеток.// Защита металлургических машин от поломок.– Мариуполь, 1999. – Вып. №4. – С.26–36.
4. *Динамика процессов прокатки.*/С.Л.Коцарь, В.А.Третьяков, А.Н.Цупров, Б.А.Поляков. – М.: Металлургия, 1997. – 255 с.
5. *А.с. № 279748 СССР.* МКИ В21В 35/02. Способ управления электродвигателем привода валков непрерывного прокатного стана.

*Статья рекомендована к печати чл.-корр.НАН Украины
В.И. Большаковым.*