

16. Bar and Wire Rod Mills/ Solution made by SMS group / SMS-group. – 2018. – 32 p. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: file:///C:/Users/volsa/Downloads/W3-311E_Bar_and_Wire_Rod_Mills.pdf
17. Zuccato M. The Bi Support Stand - An innovation for bar mills / M. Zuccato, M. Tomba // Steel Times international. – March 2011. – Vol 35. – № 2. – P. 26. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pertengineering.com/download/Steel%20Times%20International.pdf>
18. Sakiyama S. Progress of Bar and Wire Rod Rolling Process, and Improvement of Basic Quality / Shohhei Sakiyama, Takeshi Nakajima, Atsushi Aoyama, Keisuke Saitoh, Masahiro Ishimaru // Nippon Steel & Sumitomo Metal : [Technical report]. – №. 111. – march 2016. – P. 50 – 58.
19. 214 – The New 4-Roll Primetals Technologies Sizing Mill: the Evolution of Bar Sizing / M. Langè, A. Nardini, P. Menei, R. Albè / Primetals Technologies Italy Srl. – 2015. – 7 p. – ESTAD_2015_Evolution_bar_.pdf

УДК 539.3/4

ЧИГИРИНСКИЙ В. В., д.т.н., профессор
ПУТНОКИ А. Ю., к.т.н., докторант
ДЫЯ Г., д.т.н., профессор
КНАПИНСКИЙ М., к.т.н., профессор

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское, Украина
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина
Ченстоховский технический университет, г. Ченстохов, Польша

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ

Введение. В период захвата металла валками в главной линии стана возникают крутильные колебания, которые оказывают воздействие, на выходящую из очага деформации, внешнюю часть полосы. При этом возникает взаимодействие колеблющихся валков и металла в очаге деформации, которые затем передаются через полосу к предыдущей клети и т.д. Учет данного взаимодействия на динамические процессы в период захвата представляет не только теоретический, но и практический интерес. На рис.1 показаны изменения моментов сил упругости при взаимодействии клетей широкополосного стана в моменты захвата металла валками, [1].

Из рисунка видно, что при захвате металла в 6-ой клети наблюдается всплеск затухающих колебаний привода 5-ой клети, при захвате в 7-ой имеет место передача возбуждения через полосу к 6-ой и даже 5-той клети. При этом характер затухания колебаний смежных клетей показывает, что основное влияние на их динамические характеристики оказывают параметры полосы, расположенной в межклетьевом промежутке.

Для анализа переходных процессов в главных линиях непрерывных станов, в межклетьевом интервале возникает необходимость учета затухания колебаний не только в главной линии стана, но и в прокатываемой полосе. Это требует физического и математического обоснования моделей переходных процессов непрерывных листовых станов.

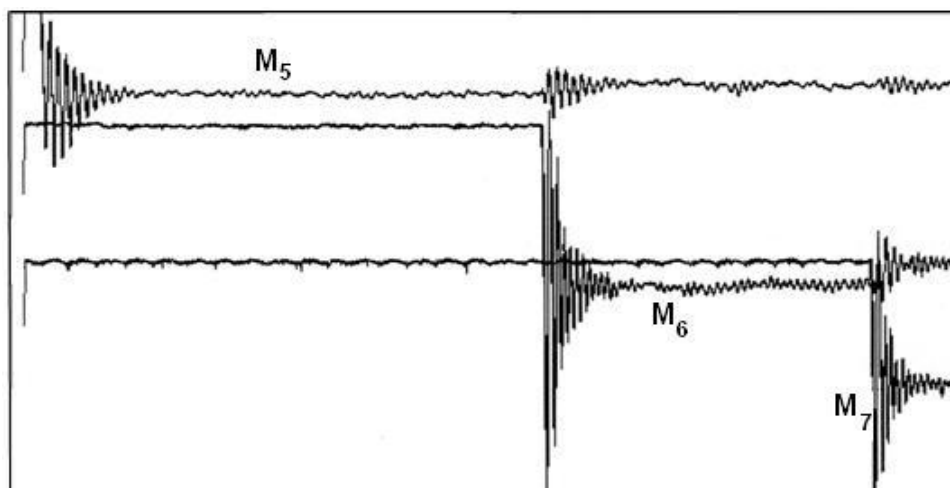


Рисунок 1 – Взаимосвязь колебаний моментов сил упругости в главных линиях клетей № 5, 6 и 7 (участок двигатель – редуктор)

С физической точки зрения при захвате металла валками в главной линии стана возникают затухающие крутильные колебания, которые, согласно представленному рисунку, передаются к предыдущей клетке непрерывного стана через упругую прокатываемую полосу, представляющую собой не сосредоточенную массу, а распределенную. Такой подход изменяет описываемые ранее модели взаимодействия клетей, через натяжения [2-4]. Следует отметить, что учет взаимодействия через натяжения, в общем, правильно описывает характер динамических процессов в системе клетей стана, однако имеют место некоторые особенности этого взаимодействия. К ним относятся: динамическое возбуждение передается от захватывающей клетки через полосу к смежным клетям стана; передача взаимодействия через полосу от клетки к клетке происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием; затухание динамического воздействия происходит не только в главной линии захватывающей клетки, но и в самой полосе, в период передачи возмущения. Отсюда физическая модель взаимодействия в полосе представляется в виде затухающего волнового процесса. Математическое описание данной физической модели достаточно охарактеризовать волновым уравнением, [5]. Однако при этом возникают определенные неудобства, которые связаны с передачей взаимодействия от валков к очагу деформации и от очага деформации к полосе межклетьевого промежутка. Использование натяжения во многих работах по динамике, включая [2-4], устраняет это достаточно принципиальное неудобство. Представляется, переменное натяжение или связанное с ним упругое перемещение на входе в очаг деформации использовать в виде краевых условий волновой задачи.

Постановка задачи. Постановка и решение предложенной задачи разбивается на два этапа. В первом, решается задача передачи затухающего возмущения от валков к очагу деформации. Во втором, передача возмущения к полосе и затем к валкам предыдущей клетки. Анализ литературных и экспериментальных данных показывает [6], [7], что вращательные колебания главной линии прокатного стана представляют собой затухающие вращательные колебания и могут быть представлены дифференциальным уравнением вида [8]

$$\ddot{\varphi} + 2b\dot{\varphi} + k^2\varphi = 0, \quad (1)$$

где b – параметр, учитывающий вязкое сопротивление среды; k – круговая частота колебаний механической системы. Решением (1) является уравнение затухающих вращательных колебаний главного привода, [8], т.е.

$$\varphi = \exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt). \quad (2)$$

Для оценки взаимодействия валков и полосы в очаге деформации на динамику захвата необходимо совместно рассмотреть кинематические и динамические характеристики валка и прокатываемой полосы. Запишем теорему об изменении кинетического момента системы в скалярном виде, [8]

$$\frac{dL_x}{dt} = \sum_{k=1}^n M_{kx}, \quad (3)$$

где L_x – проекция вектора кинетического момента системы на ось x ; M_{kx} – моменты сил относительно оси x .

Линейное волновое уравнение представляется в виде [5]

$$\frac{d^2 u_x}{dt^2} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где u_x – упругое затухающее перемещение в полосе межклетьевого промежутка; a – скорость перемещения фронта упругой волны.

Результаты работы. На первом этапе решения задачи воспользуемся результатами работы, [9]. Кинетический момент системы

$$L_x = I_x \omega + m v_1 R,$$

где I_x – осевой момент инерции валка относительно оси x ; $m v_1 R$ – момент количества движения полосы на выходе из очага деформации.

На выходе момент количества движения полосы равен

$$m \cdot v_1 \cdot R = m v_B \cdot (1 + S) \cdot R,$$

где v_B – окружная скорость валков; S – опережение при прокатке.

После преобразований и подстановки, распишем выражение (3)

$$\frac{dL_x}{dt} = I_x \cdot \frac{d\omega}{dt} + m \cdot R \cdot \left[R \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot (1 + S') + R \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt} \right] = -M_{пр} - M_{уп} - M_c,$$

где $M_{пр}$ – момент прокатки; $M_{уп}$ – момент сил упругости; M_c – момент сил вязкого сопротивления; S' – переменное опережение в очаге деформации во время заполнения его металлом.

Последнее выражение можно представить в виде

$$\frac{dL_x}{dt} = \left[I_x + R \cdot (1 + S') \cdot m \cdot R \right] \frac{d\omega}{dt} + m \cdot R^2 \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt} = -M_{пр} - C_{уп} \cdot \varphi - \mu \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

где μ – условный коэффициент вязкости среды; $C_{уп}$ – коэффициент жесткости восстанавливающего момента. После приведения

$$I_{пр} \cdot \ddot{\varphi} + 2b' \cdot \dot{\varphi} + C_{уп} \cdot \varphi = -M_{пр}, \quad (5)$$

где

$$I_{пр} = I_x + R \cdot (1 + S') \cdot m \cdot R, \quad 2b' = m \cdot R^2 \cdot \frac{dS'}{dt} + \mu,$$

или в окончательном виде уравнение (5)

$$\ddot{\varphi} + 2b \cdot \dot{\varphi} + k^2 \cdot \varphi = -\frac{M_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}, \quad (6)$$

где

$$2b = \frac{2b'}{I_{\text{пр}}}, \quad k^2 = \frac{C_{\text{уп}}}{I_{\text{пр}}}.$$

Сопоставляя (1) и (6) практически получаем один тип дифференциальных уравнений, в котором коэффициент b , учитывающий сопротивление среды, определяется опережением в очаге деформации. Отсюда следует влияние опережения на характер затухания вращательных колебаний привода.

Решение дифференциального уравнения (6) несколько отличается от решения уравнения (1), действительно

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (7)$$

где φ_1 – решение однородного дифференциального уравнения (1); φ_2 – частное решение уравнения (6). При этом

$$\varphi_2 = \text{const}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6), после преобразований имеем

$$\varphi_2 = -\frac{M_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}} \cdot k^2} = -\frac{M_{\text{пр}}}{C_{\text{уп}}}.$$

С учетом последнего общее решение имеет вид

$$\varphi = \exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos k \cdot t + B \cdot \sin k \cdot t) - \frac{M_{\text{пр}}}{C_{\text{уп}}}. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает вращательные затухающие колебания главного привода рабочей клетки в период захвата металла валками, которые являются возмущением, передающиеся на упругую полосу в межклетьевом промежутке. Определим толчковый характер этого возмущения на полосу. Имеем скорость на выходе из очага деформации

$$v_1 = v_B \cdot (1 + S)$$

или

$$\frac{du_1}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt} (1 + S),$$

где u_1 – периодически изменяющееся во времени удлинение или укорочение полосы на выходе из очага деформации. После упрощений и интегрирования получим

$$u_1 = R\varphi \cdot (1 + S),$$

Подставляя (9), имеем

$$u_1 = R(1 + S) \left[\exp(-bt) (A \cos kt + B \sin kt) - \frac{M_{\text{пр}}}{C_{\text{уп}}} \right]. \quad (10)$$

Выражение (10) можно рассматривать, как краевое условие динамической задачи для упругой полосы в межклетьевом промежутке, и представляет собой нестациона-

рное затухающее воздействие. При этом, постоянные интегрирования A , B определяются начальными условиями, которые должны быть заданы. Если величину u_1 умножить на коэффициент жесткости для полосы, то получим периодически изменяющуюся силу упругости в полосе, определенную с учетом взаимодействия валков и прокатываемого металла в очаге деформации.

Используя начальные условия задачи, имеем постоянные в решении (10), в виде, т.е.

$$A = \frac{u_0}{R \cdot (1+S)} + \frac{M_{\text{пр}}}{C_{\text{уп}}}, \quad B = \frac{\dot{u}_0 + b \cdot u_0}{R \cdot k \cdot (1+S)} + \frac{M_{\text{пр}} \cdot b}{C_{\text{уп}} \cdot k}. \quad (11)$$

где u_0 , \dot{u}_0 – начальное удлинение и начальная скорость изменения длины на выходе из очага деформации.

Выражение (10) возможно использовать, как краевое условие для волновой задачи для упругой полосы в межклетьевом промежутке. Из выражения (10) видны определяющие функции, которые должны присутствовать в решении волнового уравнения применительно к переходным процессам непрерывных широкополосных станов.

На втором этапе воспользуемся дифференциальным уравнением (4). Решение волнового уравнения определяем с помощью метода аргумент функций [10]. Краевые условия (10) показывают, что искомое выражение должно содержать экспоненту и тригонометрическую функцию, т.е.

$$u = C \cdot \exp \theta \cdot \cos A \Phi, \quad (12)$$

где аргумент-функции θ , $A \Phi$ подлежат определению решением задачи.

Подставим (12) в (4), с учетом того, что указанные функции допускают вторые производные, имеем

$$a^2 u_{xx} = Ca^2 \exp \theta \left[\left(\theta_{xx} + \theta_x^2 - A \Phi_x^2 \right) \cos A \Phi - \left(2 \theta_x A \Phi_x + A \Phi_{xx} \right) \sin A \Phi \right],$$

$$u_{tt} = C \cdot \exp \theta \cdot \left[\left(\theta_{tt} + \theta_t^2 - A \Phi_t^2 \right) \cdot \cos A \Phi - \left(2 \theta_t \cdot A \Phi_t + A \Phi_{tt} \right) \cdot \sin A \Phi \right],$$

тогда после преобразований имеем

$$\left[\left(a^2 \theta_{xx} - \theta_{tt} \right) - \left(a^2 A \Phi_x^2 - A \Phi_t^2 \right) + \left(a^2 \theta_x^2 - \theta_t^2 \right) \right] \cdot \cos A \Phi - \left[\left(a^2 A \Phi_{xx} - A \Phi_{tt} \right) - 2 \left(a^2 \theta_x A \Phi_x - \theta_t A \Phi_t \right) \right] \cdot \sin A \Phi = 0. \quad (13)$$

Рассмотрим случай, когда круглые скобки первого оператора равны нулю, т.е.:

$$a^2 \theta_x^2 - \theta_t^2 = (a \theta_x + \theta_t)(a \theta_x - \theta_t) = 0,$$

$$a^2 A \Phi_x^2 - A \Phi_t^2 = (a A \Phi_x + A \Phi_t)(a A \Phi_x - A \Phi_t) = 0$$

В этом случае имеет место несколько вариантов. После анализа можно записать окончательное решение задачи линейного волнового уравнения в виде

$$u = C_1 \cdot \exp \theta_1 \cdot \left(C_1' \cdot \sin A_1 \Phi_1 + C_1'' \cdot \cos A_1 \Phi_1 \right) + C_2 \cdot \exp \theta_2 \cdot \left(C_2' \cdot \sin A_2 \Phi_2 + C_2'' \cdot \cos A_2 \Phi_2 \right) + C \quad (14)$$

при условии существования соотношений для аргумент-функций:

$$\begin{aligned} a\theta_{1x} &= \pm\theta_{1t}, \quad aA_1\Phi_{1x} = \pm A_1\Phi_{1t}, \\ a\theta_{2x} &= \pm\theta_{2t}, \quad aA_2\Phi_{2x} = \pm A_2\Phi_{2t}, \\ a^2\theta_{1xx} - \theta_{1tt} &= 0, \quad a^2A_1\Phi_{1xx} - A_1\Phi_{1tt} = 0, \\ a^2\theta_{2xx} - \theta_{2tt} &= 0, \quad a^2A_2\Phi_{2xx} - A_2\Phi_{2tt} = 0. \end{aligned}$$

Решение (14) состоит из двух слагаемых т.к. в дифференциальных соотношениях присутствуют противоположные знаки. Решение (14) обозначает не саму разрешающую функцию, а условия ее существования, что позволяет получить «спектр» функций, определяемых разными краевыми условиями. Удовлетворяя дифференциальным соотношениям (14), имеем с учетом полученных аргумент функций

$$\begin{aligned} u &= C_1 \cdot \exp A_1 A_6(x + a \cdot t) \cdot \left[C_1' \cdot \sin A_1 A_3(x + at) + C_1'' \cdot \cos A_1 A_3(x + at) \right] + \\ &+ C_2 \cdot \exp A_2 A_{10}(x - a \cdot t) \cdot \left[C_2' \cdot \sin A_2 A_7(x - a \cdot t) + C_2'' \cdot \cos A_2 A_7(x - a \cdot t) \right] + C. \quad (15) \end{aligned}$$

Выражение (15) можно интерпретировать, как частный случай решения Даламбера [5], в котором присутствуют, как возрастающие по времени, так и убывающие зависимости.

При затухающем воздействии, очевидно $C_1 = 0$, тогда выражение (15) запишется в виде

$$u = C_2 \cdot \exp A_2 A_{10}(x - a \cdot t) \cdot \left[C_2' \cdot \sin A_2 A_7(x - a \cdot t) + C_2'' \cdot \cos A_2 A_7(x - a \cdot t) \right] + C. \quad (16)$$

В решение (16) вписываются начальные условия (10), (11),

$$u_1 = C^0 \cdot \left[\exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) - \frac{M_{\text{пр}} \mp M_{\text{вн.3}}}{C_{\text{уп}}} \right],$$

где

$$C^0 = \frac{R}{\lambda} \cdot (1 + S).$$

Следовательно, эта зависимость подходит для характеристики нестационарного импульсного воздействия на упругую полосу. Сопоставляя (16) и (10) убеждаемся, что решение и граничные условия находятся в соответствии друг с другом, это и определяло цель выше представленных теоретических исследований. Если записать граничные условия для (16), $x = 0$, тогда

$$\begin{aligned} u|_{x=0} &= C_2 \cdot \left\{ \left(\exp A_2 A_{10}(-a \cdot t) \right) \cdot \left[C_2' \sin A_2 A_7(-a \cdot t) + \right. \right. \\ &\left. \left. + C_2'' \cos A_2 A_7(-a \cdot t) \right] \right\} + C. \end{aligned}$$

На границе, между перемещениями на входе в очаг деформации и перемещениями в полосе, должно выполняться равенство, т.е.

$$u|_{x=0} = u_1.$$

Для обеспечения выше приведенного равенства имеют место следующие соотношения

$$C_2 = C^0, \quad A_2 A_{10} = \frac{b}{a}, \quad k = A_2 A_7 \cdot a,$$

$$A = -C_2', \quad B = C_2'', \quad C = -C^0 \frac{M_{\text{пр}} \mp M_{\text{вн.3}}}{C_{\text{уп}}}.$$

После подстановки коэффициентов имеем

$$u|_{x=0} = C^0 \exp(-bt) \cdot [A \cdot \sin(kt) + B \cdot \cos(kt)] - C^0 \frac{M_{\text{пр}} \mp M_{\text{вн.3}}}{C_{\text{уп}}}. \quad (17)$$

Из (17) видно, что первое слагаемое характеризует затухающую динамическую составляющую, вторая стационарную неизменяющую. Начало координат расположено на входе в очаг деформации захватывающей клетки, с направлением координаты x по ходу прокатки. Отсюда перемещения в упругой полосе в межклетьевом промежутке запишутся в виде

$$u = C^0 \left\{ \exp\left(\frac{b}{a} \cdot (x - a \cdot t)\right) \left[-A \cdot \sin\frac{k}{a} \cdot (x - a \cdot t) + B \cdot \cos\frac{k}{a} \cdot (x - a \cdot t) \right] - \frac{M_{\text{пр}} \mp M_{\text{вн.3}}}{C_{\text{уп}}} \right\} \quad (18)$$

С появлением в решении (18) координаты x можно определить перемещения в любой точке полосы. Выражение (18) характеризует изменение перемещения в упругой среде в зависимости от положения точки в пространстве и времени. При $x = 0$ получаем граничную зависимость (17), функцией только времени. При $t = 0$, имеем начальные условия, которые показывают перемещения в зависимости от координаты x . Имеем

$$u|_{t=0} = C^0 \left\{ (\exp b \cdot (x)) \cdot \left[-A \cdot \sin\frac{k}{a} \cdot (x) + B \cdot \cos\frac{k}{a} \cdot (x) \right] - \frac{M_{\text{пр}} \mp M_{\text{вн.3}}}{C_{\text{уп}}} \right\}. \quad (19)$$

Учитывая, что координата может принимать, как отрицательные значения, так и положительные, функция может быть возрастающей и убывающей. В случае (18) характер изменения функции определяется разностью $(x - a \cdot t)$. Представляет интерес режим затухания колебаний в упругой полосе. Это возможно при заданной функциональной зависимости от времени и координаты. Кроме этого характер затухания резко меняется, когда координата принимает отрицательное значение. На противоположном конце полосы, при $x = -L$, получим перемещение в зависимости от времени, т.е. граничные условия для следующей задачи.

$$u|_{x=-L} = C^0 \left\{ (\exp b \cdot (-L - a \cdot t)) \cdot \left[-A \cdot \sin\frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) + B \cdot \cos\frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) \right] - \frac{M_{\text{пр}} \mp M_{\text{вн.3}}}{C_{\text{уп}}} \right\} \quad (20)$$

где L – длина межклетьевого промежутка. Знак минус выбран, т.к. координата взята в направлении противоположном направлению прокатки.

Из анализа формулы (20) видно, с удалением от источника возмущения (захватывающей клетки) процесс затухания колебаний усиливается. Однако воздействие полосы на валки предыдущей клетки все-таки имеет место, рис. 1. При этом возникает необходимость определения влияния затухающего импульса захватывающей клетки на

динамику системы предыдущей клетки. При этом предполагается, что динамический процесс в этой клетке отсутствует.

Запишем граничные условия для предыдущей клетки на выходе из очага деформации. При $x=-L$, $u_{1пр} = u|_{x=-L}$, можно записать

$$u_{1пр} = R_{пр} \cdot \varphi_{пр} \cdot (1 + S_{пр}) = C^0 \left\{ (\exp b \cdot (-L - a \cdot t)) \cdot \left[-A \cdot \sin \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) + B \cdot \cos \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) \right] - \frac{M_{пр} \mp M_{вн.3}}{C_{уп}} \right\}.$$

Отсюда угловые колебания привода предыдущей клетки примут вид

$$\varphi_{пр} = \frac{R(1+S)}{\lambda \cdot R_{пр} \cdot (1+S_{пр})} \cdot \left\{ (\exp b \cdot (-L - a \cdot t)) \cdot \left[-A \cdot \sin \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) + B \cdot \cos \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) \right] - \frac{M_{пр} \mp M_{вн.3}}{C_{уп}} \right\}. \quad (21)$$

Отношение углов поворота приводов главных линий для захватывающей клетки и для предыдущей, (9) и (21)

$$\frac{\varphi}{\varphi_{пр}} = \frac{\left\{ (\exp b \cdot (-a \cdot t)) \cdot \left[-A \cdot \sin \frac{k}{a} \cdot (-a \cdot t) + B \cdot \cos \frac{k}{a} \cdot (-a \cdot t) \right] - \frac{M_{пр} \mp M_{вн.3}}{C_{уп}} \right\}}{\frac{R(1+S)}{\lambda \cdot R_{пр} \cdot (1+S_{пр})} \cdot \left\{ (\exp b \cdot (-L - a \cdot t)) \cdot \left[-A \cdot \sin \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) + B \cdot \cos \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) \right] - \frac{M_{пр} \mp M_{вн.3}}{C_{уп}} \right\}} \dots$$

Для анализа выражение можно упростить. Углом закручивания привода $\frac{M_{пр} \mp M_{вн.3}}{C_{уп}}$ пренебрегаем, отношение принимаем равным единицы, т.е.

$$\frac{R(1+S)}{R_{пр} \cdot (1+S_{пр})} \approx 1,$$

тогда

$$\frac{\varphi}{\varphi_{пр}} = \frac{\lambda \cdot \exp b \cdot (-a \cdot t) \left[-A \cdot \sin \frac{k}{a} \cdot (-a \cdot t) + B \cdot \cos \frac{k}{a} \cdot (-a \cdot t) \right]}{\exp b \cdot (-L - a \cdot t) \left[-A \cdot \sin \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) + B \cdot \cos \frac{k}{a} \cdot (-L - a \cdot t) \right]}.$$

Из последнего соотношения видно, что размахи затухающих колебаний предыдущей клетки, примерно, в $\frac{1}{\lambda} \exp(bL)$ раз меньше размахов колебаний захватывающей клетки.

Таким образом, физическая модель и математическая позволяют качественно и количественно определить взаимодействие клеток в виде волнового процесса передачи возмущения от одной клетки к другой. Данные теоретические разработки подтверждены экспериментальными данными работ [1] и [6].

Выводы.

1. Динамическое взаимодействие между смежными клетями непрерывного стана представляются в виде волнового процесса в упругой полосе расположенной в межклетьевом промежутке.
2. Рассмотрена затухающая модель крутильных колебаний главной линии стана захватывающей клетки.
3. Определены математические зависимости толкающего воздействия очага деформации на полосу в межклетьевом промежутке.
4. Получено решение линейного волнового уравнения в упругой зоне с использованием метода аргумент функций.
5. Показано, что затухание импульсного воздействия со стороны валков захватывающей клетки определяется динамическими процессами в полосе расположенной в межклетьевом промежутке.
6. Проведен сопоставительный анализ крутильных колебаний захватывающей и смежной клетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веренев В. В. Переходные процессы при непрерывной прокатке / В. В. Веренев, А. Ю. Путноки, Н. И. Подобедов. – Днепр : «ЛІТОГРАФ», 2017. – 114 с.
2. Выдрин В. И. Динамика прокатных станов / В. И. Выдрин. – Свердловск : Metallurgizdat, 1960. – 226 с.
3. Беньковский М. А. Автоматизированные широкополосные станы, управляемые ЭВМ / М. А. Беньковский, Ю. В. Ананьевский, Ю. В. Коновалов и др. – М. : Metallurgiya, 1984. – 240 с.
4. Полухин В. П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов / В. П. Полухин. – М. : Metallurgiya, 1972. – 512 с.
5. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 735 с.
6. Путноки А. Ю. Вибродинамические процессы в клетях ШПС 1680 / А. Ю.Путноки // Обработка металлов давлением. – 2014. – № 1(38). – С. 233–239.
7. Кожевников С. Н. Динамика машин с упругими звеньями / С. Н. Кожевников. – Киев : Изд-во АН УССР, 1961. – 160 с.
8. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Высшая школа, 1998. – 409 с.
9. Чигиринский В. В. Моделирование динамических процессов в период захвата металла / В. В. Чигиринский, А. Ю. Путноки // Вісник Нац. техн. ун-та «Харківський політ-й інст-т». – 2017. – № 36. – С. 78–82.
10. Chigirinsky V. Development of a dynamic model of transients in mechanical systems using argument-functions / V. Chigirinsky, A. Putnoki // Eastern-European JOURNAL of enterprise technologies. – 2017. – № 3/7(87). – P. 11–21.