

С. Р. Рахманов /к. т. н./, В. Т. Вышинский /к. т. н./,
Л. А. Морозова, В. В. Поворотный, А. В. Силич
Национальная металлургическая академия
Украины

Исследование неравномерности хода главной силовой линии стана ХПТ

Приведены результаты исследования динамики главной силовой линии стана холодной прокатки труб (ХПТ). Составлена математическая модель для выбранной динамической модели силовой линии стана с учетом переменности параметров системы. Предложена методика определения неравномерности хода рассматриваемой рядной механической системы силовой линии стана. Установлены особенности формирования избыточных динамических нагрузок в силовой линии стана с учетом переменности величины момента инерции шатунов и рабочей клетки, приведенных к валу кривошипа. Обоснована возможность минимизации динамических нагрузок и в целом неравномерности хода силовой линии стана ХПТ. (Илл. 3. Табл. 1. Библиограф.: 5 назв.).

Ключевые слова: труба, холодная прокатка, динамика, силовая линия, неравномерность хода, динамическая модель, математическая модель, масса, рабочая клетка, момент инерции, уравнивающее устройство.

Results of research of dynamics of the main power line of a camp of the cold rolling of pipes (HPT) are given. The technique of determination of unevenness of the course of the considered line continual mechanical system is offered. The mathematical model for the chosen dynamic model of the power line of a camp taking into account variability of the moment of inertia of system is made. Features of formation of excess dynamic loadings in the power line of a camp taking into account variability of size of the moment of inertia of the rod and a working cage brought to a crank shaft are established. Possibility of minimizing of dynamic loadings and in general unevenness of the course of the power line of a camp of HPT is proved.

Key words: a pipe, cold rolling, dynamics, the power line, unevenness of the course, dynamic model, mathematical model, weight, a working cage, the inertia moment, the counterbalancing device.

Введение

Интенсификация технологических процессов холодной пильгерной прокатки труб сопровождается повышением скоростей и силовых воздействий на обрабатываемое изделие. Эти тенденции неизбежно выдвигают новые, более жесткие требования к станам холодной прокатки труб (ХПТ), прежде всего в отношении их надежности и долговечности. Изучение особенностей функционирования механизмов главной силовой линии стана ХПТ, установление влияния динамических параметров системы на формирование нагрузок при стационарных, неустановившихся и переходных процессах позволяет подобрать такое их сочетание, чтобы избыточные нагрузки не выходили за пределы, допускаемые заданной долговечностью для данного типа машин.

Постановка задачи

Действительные величины и характер изменения динамических нагрузок в трансмиссии стана ХПТ с учетом истинного движения начального звена устанавливаются на основании проведения достаточно корректных исследований при широком варьировании параметров меха-

низмов силовой линии и воздействий со стороны очага деформации. Увеличение надежности и долговечности элементов силовой линии как механизма периодического действия потребовало большей детализации расчетной схемы, развития основ расчета и разработки способов локализации зон действия избыточных динамических нагрузок в элементах главной силовой линии стана ХПТ. Это позволило установить некоторые особенности воздействия инерционных нагрузок от подвижных масс шатунов и рабочей клетки стана ХПТ на звенья силовой линии стана и обосновать возможность сведения к минимуму динамических нагрузок, например, избыточных инерционных сил. В связи с этим решение поставленной задачи по обоснованию установки ряда уравнивающих и выравнивающих устройств с рациональными параметрами, исключаящими передачу инерционных нагрузок на главный привод стана ХПТ или его отдельные узлы, может быть реализовано на основании детального анализа закономерностей функционирования сложной континуальной механической системы. Опыт эксплуатации большинства отечественных и зарубежных

станов ХПТ установлено, что при широком использовании уравнивающих и выравнивающих устройств с рациональными параметрами в главных силовых линиях станков повысилась долговечность отдельных ее механизмов и элементов. Однако дальнейшие исследования показали, что уравнивание подвижных масс главной силовой линии станков ХПТ оказалось неполным. Данные вопросы потребовали проведения дополнительных исследований силовой линии стана ХПТ. Кроме того, отсутствие приемлемых инженерных методик по определению неравномерности хода системы, на основе которых бы проектировались и монтировались современные уравнивающие устройства, потребовали пересмотра фундаментальных основ расчета динамики данных машин (рис. 1).

Известна методика определения неравномерности движения элементов главной силовой линии стана ХПТ как жесткого целого, которая в исходной постановке изложена М. И. Гриншпуном и В. И. Соколовским в монографии [1]. Данное направление в дальнейшем развито С. Н. Кожевниковым и А. С. Ткаченко в ряде работ [2; 5], посвященных динамике тяжело нагруженных машин для производства холоднокатаных труб. При проведении многочисленных экспериментальных исследований отечественных станков ХПТ выяснилось, что неравномерность хода реальной механической системы значительно превышает установленные требованиями долговечности ограничения, в рамках которых верна методика расчета динамических нагрузок [1]. Как показано в работе [3], неравномерность хода элементов главной силовой линии, например стана ХПТ-32-3-8, достигает при-

мерно 30 %, что далеко не соответствует проектным режимам функционирования рассматриваемой механической системы. Проявление этих динамических эффектов не позволяет вывести стан ХПТ-32-3-8 на проектный режим работы.

Метод решения задачи

Ниже в работе предложена уточненная методика определения неравномерности хода главной силовой линии стана ХПТ, в которой учтены недостатки предыдущих вышеперечисленных исследований [1–5] в рамках принятой динамической модели механической системы. Поскольку параметры выбранной многомассовой динамической модели механической системы различным образом влияют на неравномерность хода ведущих и ведомых звеньев главной силовой линии стана, то для учета этого влияния была детально проанализирована техническая документация основных элементов стана ХПТ-32-3-8. Рассмотрены базовые элементы силовой линии стана от рабочей клетки до вала кулачка РПМ и определены динамические характеристики: моменты инерции масс и жесткости межмассовых механических связей. По полученным данным составлена расчетная динамическая модель главной силовой линии стана ХПТ-32-3-8 как семимассовая рядная механическая система и исследована неравномерность её хода сначала по известной методике [1], а затем по уточненной, позволяющей оценить влияние каждого в отдельности взятого элемента.

По результатам этих исследований может быть обоснован комплекс мероприятий по рациональному использованию механизмов уравнивания, установки дополнительного ма-

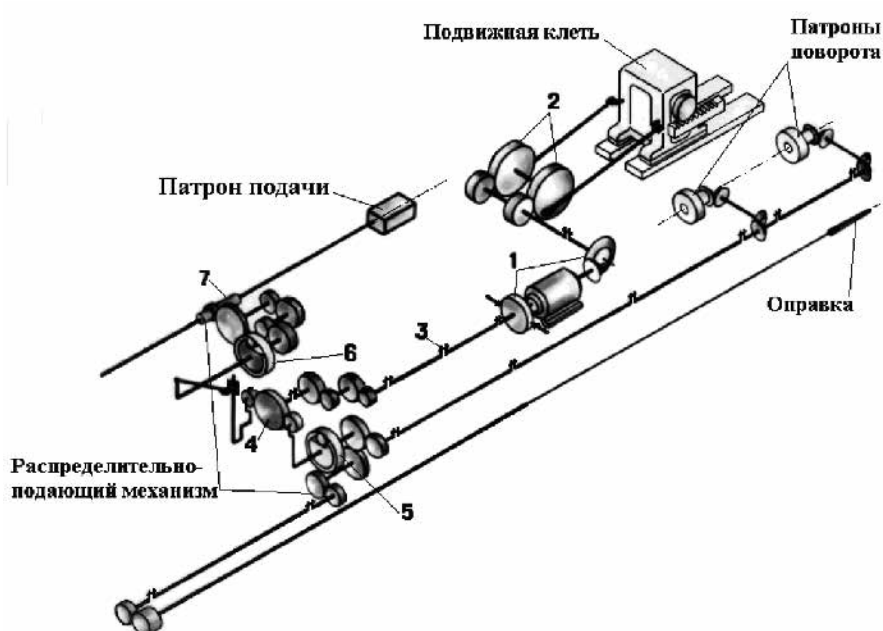


Рис. 1. Кинематическая схема главной силовой линии отечественного стана ХПТ

ховика, изменению значения момента инерции муфты-тормоза и регулирования жесткости упругих элементов линии стана, что в совокупности позволит существенно уменьшить нежелательные проявления динамических явлений, связанных с неравномерностью движения элементов силовой линии, неблагоприятно воздействующих в целом на работу всего стана ХПТ.

Постановка задачи

Как известно из работы [1], поведение механизмов силовой линии стана ХПТ описывается уравнением движения относительно угла поворота кривошипа φ в виде:

$$I(\varphi) \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{1}{2} \frac{dI}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = M_{ДВ}(\varphi) - M_{comp}(\varphi), \quad (1)$$

где $I(\varphi) = mr^2 \left[\sin\varphi + \frac{\cos\varphi(\lambda \sin\varphi - \delta)}{\sqrt{1 - (\lambda \sin\varphi - \delta)^2}} \right]^2 + I_0$, - сумма приведенных к кривошипу переменного момента инерции массы клетки m и постоянно-го момента инерции I_0 масс остальных элементов главной силовой линии стана, заканчивающейся валом кулачка РПМ; $M_{ДВ}$ и M_{comp} - приведенный к кривошипу момент на валу двигателя главного привода стана, обладающий линейной механической характеристикой и момент сил технологического сопротивления системы.

$$M_{comp} = P_{cz} r \left[\sin(\varphi) + \frac{\cos(\varphi)(\lambda \sin(\varphi) - \delta)}{\sqrt{1 - (\lambda \sin(\varphi) - \delta)^2}} \right] \quad (2)$$

Здесь P_{cz} - горизонтальная составляющая усилия от давления металла валки ($P_{cz} > 0$ - для хода клетки из крайнего переднего положения в заднее; $\lambda = \frac{r}{l_{ш}}$, $\delta = \frac{a}{l_{ш}}$ - геометрические параметры кривошипно-ползунного механизма; a - дезаксиал главного привода); r - расстояние от места крепления шатуна до центра кривошипного колеса; $l_{ш}$ - длина шатуна главного привода стана.

Причем скорость движения рабочей клетки определяется формулой, согласно работе [5]:

$$V(\varphi) = r\dot{\varphi} \left[\sin\varphi + \frac{\cos\varphi(\lambda \sin\varphi - \delta)}{\sqrt{1 - (\lambda \sin\varphi - \delta)^2}} \right]. \quad (3)$$

Уравнение (4) описывает кинематику движения части силовой линии - главного привода стана как автономной механической системы с одной степенью свободы.

Неравномерность вращения узла кривошипного механизма стана в установившемся процессе прокатки трубы определяется переменной средней угловой скоростью $\dot{\varepsilon}$. Причем угол

поворота элементов силовой линии стана можно выразить в виде:

$$\varphi = vt + \varepsilon. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1) получаем нелинейное дифференциальное уравнение с периодическими коэффициентами относительно ε :

$$I(vt)\ddot{\varepsilon} + \frac{1}{2} \frac{dI(vt)}{d(vt)} (2\dot{\varepsilon}v + \dot{\varepsilon}^2) - M_{\delta\beta 1}\dot{\varepsilon} + M_{comp}\varepsilon = \\ = M_{\delta\beta}(v) - M_{comp}(vt) - \frac{v^2}{2} \frac{dI(vt)}{d(vt)} \quad (5)$$

Учитывая, что механическая характеристика электродвигателя главного привода стана линейная, то следует:

$$M_{\delta\beta}(\varphi) = M_{\delta\beta}(v) + \dot{\varepsilon}M_{\delta\beta 1}. \quad (6)$$

Если параметр ε предполагается малым, то момент сил технологического сопротивления для механической системы всей силовой линии стана определяем в виде:

$$M_{comp}(vt + \varepsilon) = M_{comp}(vt) + \varepsilon M_{1comp}(vt).$$

Необходимо подчеркнуть, что дифференциальное уравнение (6) описывает поведение системы под действием технологической нагрузки:

$$M_{\delta\beta}(v) = M_{comp}(vt) - \frac{v^2}{2} \frac{dI(vt)}{d(vt)}.$$

Тогда решение задачи будет периодичным, если работа внешних сил механической системы за один полный цикл прокатки трубы на стане будет равна нулю.

$$M_{\delta\beta}(v)2\pi = \int_0^{2\pi} M_{comp}(\varphi) d\varphi. \quad (7)$$

Это условие определяется тангенсом угла наклона касательной к механической характеристике электродвигателя главного привода стана в плоскости M, w :

$$M_{\delta\beta} = ik(w_0 - iw). \quad (8)$$

Здесь i - передаточное отношение силовой линии стана; w_0 - угловая скорость электродвигателя при идеальном холостом ходе.

Далее переходим к детальному анализу методики определения неравномерности вращения элементов главной силовой линии стана ХПТ в рамках выбранной динамической модели с учетом наиболее важных параметров электромеханической системы.

Отметим, что уравнение (5) отличается от известного уравнения движения механической си-

стемы, приведенного в работе [1], учетом относительного скольжения электродвигателя главного привода и наличием слагаемой $M_{comp}(vt)\varepsilon$. Отбрасывание этого члена в уравнении (5) означало бы пренебрежение параметром ε по сравнению с $\dot{\varepsilon}$, что допустимо для переходного режима. Однако данная гипотеза не приемлема для установившегося процесса прокатки труб или режима холостого хода электродвигателя главного привода стана ХПТ.

Следует подчеркнуть, что в известной методике [2] в расчетах неравномерности хода элементов главной силовой линии стана ХПТ отсутствует необходимое и достаточное условие функционирования системы (7). Предполагая заранее, что электродвигатель главного привода стана работает на естественной механической характеристике, авторы работ [1; 5] должны были бы использовать условие (7) для определения рациональных режимов прокатки труб на стане ХПТ.

Преодолевая силы технологического сопротивления P_c , электродвигатель главного привода в сочетании с узлами поворотно-подающего комплекса стана в установившемся режиме работает на следующей его естественной характеристике:

$$K = \frac{M_N}{w_o - w_N}; M_N = \frac{P_N}{w_N},$$

где P_N, M_N, w_N – номинальные мощности, момент и угловая скорость электродвигателя ($w_N = iv$).

Из вышеизложенного видно, что громоздкость коэффициентов в уравнении (6) зависит от структуры выражения (4). Преимущественно данное выражение подвергается упрощению путем разложения знаменателя в степенной ряд и последующего удержания первого члена этого разложения:

$$\sin \varphi + \frac{\cos \varphi (\lambda \sin \varphi - \delta)}{\sqrt{1 - (\lambda \sin \varphi - \delta)^2}} \cong \sin \varphi + \lambda \sin 2\varphi - \delta \cos \varphi. \quad (9)$$

Действительно, выполнение данного действия в (9) может быть принято с точностью до 0,01. Очевидно, что данная оценка сделана на

$$S = I \frac{w_o}{iv} \left\{ \frac{w_o mr^2}{2I} \left(-\frac{\lambda}{4} \left[1 + \left(\frac{w_o}{iv} - 1 \right) \frac{1mr^2}{2I} \right] \frac{\frac{B}{v}}{\left[1 + \left(\frac{B}{v} \right)^2 \right]} \sin(\varphi - \beta_1) + \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{w_o}{iv} - 1 \right) \frac{mr^2}{2I} \right] \right. \right. \\ \left. \left. \frac{\frac{B}{2v} - 2\delta}{\left[1 + \left(\frac{B}{v} \right)^2 \right] \cos \beta_2} \right) \sin(2\varphi - \beta_2) + \frac{\lambda}{32} \left(\frac{w_o}{iv} - 1 \right) \frac{mr^2}{I} \frac{\frac{B}{3v} - 1}{\left[1 + \left(\frac{B}{3v} \right)^2 \right]} \frac{\sin(3\varphi - \beta_3)}{\cos \beta_3} + \frac{\delta}{2} \left(\frac{w_o}{iv} - 1 \right) \frac{mr^2}{I} - \right.$$

основании сравнения значений точного и приближенного выражений (9).

Заметим, что в работе [1] имеется неточность в знаке перед δ в упрощенном выражении и нет разъяснения относительно изменения знака горизонтального составляющего усилия прокатки трубы в течение одного полного цикла работы стана.

Уравнение (6) может быть линеаризовано так же, как это реализовано в работе [1], пренебрежением $\dot{\varepsilon}^2$ по сравнению с $2v\dot{\varepsilon}^2$, т. к. v – средняя угловая скорость кривошипа, а $\dot{\varepsilon}$ предполагается малой добавкой ($\dot{\varepsilon} < v$). В результате получаем линейное дифференциальное уравнение с периодическими коэффициентами, замкнутое решение которого может быть найдено методом вариаций произвольного постоянного.

При интегрировании дифференциального уравнения движения силовой линии стана ХПТ авторы работы [1] необоснованно пользовались предположением о том, что $w_o \approx iv$, что является далеко не корректным.

С целью сравнения существующей [1] и предлагаемой ниже приближенных методов было проведено интегрирование упрощенного уравнения [1] с учетом высказанных замечаний и предложений. В результате выполнения вышеизложенного в конечном итоге имеет место:

$$I(vt) \frac{dS}{dt} + \left(\frac{w_o}{i} \frac{dI(vt)}{d(vt)} + \frac{i^2}{w_o} \frac{M_N}{S_N} \right) S = \\ = \frac{w_o}{2i} \frac{dI(vt)}{d(vt)} + \frac{P_c}{w_o} \left(\sin vt + \frac{\lambda}{2} \sin 2vt - \delta \cos vt \right). \quad (10)$$

Здесь $S = 1 - i \frac{v + \varepsilon}{w_o}$ – скольжение электродвигателя (постоянного тока) главного привода стана ХПТ.

Решение уравнения (10), удовлетворяющее произвольному условию (при $t = 0$), состоит из общего решения однородного дифференциального уравнения, экспоненциально затухающего с течением времени, и периодического частного решения, описывающего установившийся режим функционирования силовой линии стана (при стремлении t к ∞). Ввиду вышеизложенного для силовой линии стана окончательно находим:

$$\begin{aligned}
 & -\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{I}\frac{\frac{B}{16v}+\delta}{\left[1+\left(\frac{B}{4v}\right)^2\right]\cos\beta_4}\sin(4\varphi-\beta_4)+\frac{1}{w_0v}P_{cr}\frac{\left[1+\frac{3}{2}\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{2I}\right]\frac{B}{v}+\delta\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{2I}\right]}{\left[1+\left(\frac{B}{v}\right)^2\right]\cos\beta_5} \\
 & \cdot\sin(\varphi-\beta_5)+\frac{\lambda}{4}\frac{i}{w_0v}\left[1+\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{2I}\right]\frac{\frac{B}{v}}{\left[1+\left(\frac{B}{2v}\right)^2\right]\cos\beta_6}\sin(2\varphi-\beta_6)+\left(\frac{w_0}{2i}-1\right)\frac{mr^2}{4I} \\
 & \cdot\frac{\delta-\frac{B}{9v}}{\left[1+\left(\frac{B}{3v}\right)^2\right]\cos\beta_7}\sin(3\varphi-\beta_7)-\frac{\lambda}{32}\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{I}\frac{\frac{B}{4v}}{\left[1+\left(\frac{B}{4v}\right)^2\right]\cos\beta_8}\sin(4\varphi-\beta_8)
 \end{aligned} \tag{11}$$

где $B = \frac{i^2 M_N}{w_0 S_N} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{mr^2}{n} \sum_i I_i}}$; $tg\beta_1 = \frac{v}{B}$; $tg\beta_2 = \frac{1 + \frac{B}{v}\delta}{\frac{B}{2v} - 2\delta}$; $tg\beta_3 = \frac{1 + \frac{B}{3v}}{\frac{B}{3v} - 1}$; $tg\beta_4 = \frac{1 - \frac{B}{v}}{\frac{B}{4v} + 4\delta}$;

$tg\beta_5 = \frac{\frac{B}{v}\delta\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{2I}\right] - \left[1 + \frac{3}{2}\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{2I}\right]}{\left[1 + \frac{3}{2}\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{2I}\right]\frac{B}{v} + \delta\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{w_0}{iv}-1\right)\frac{mr^2}{2I}\right]}$; $tg\beta_6 = \frac{2v}{B}$; $tg\beta_7 = \frac{1 + \frac{B}{v}\delta}{3\delta - \frac{B}{3v}}$; $tg\beta_8 = \frac{4v}{B}$ - параметры выбранной динамической модели силовой линии стана.

Проводим некоторое сравнение существующей методики с предлагаемой схемой расчета динамики и неравномерности функционирования силовой линии стана ХПТ. Для этого были вычислены значения характеристик неравномерности вращения-скольжения электродвигателя главного привода по формулам (11) и переменной составляющей угловой скорости $\varepsilon = w_0 - iv - w_0S$ при заданных исходных данных стана ХПТ 32-3-8: $\lambda = 0,122$, $\delta = 0,119$, $i = 6,65$ и следующих его динамических характеристиках, приведенных в табл. 1.

Таблица 1
Динамические характеристики силовой линии стана ХПТ-32-3-8

I , кгм ²	mr^2 , кгм ²	w_0 , рад/сек	v , рад/сек	M_N , Нм	P_{cr} , Н
1336	133	55,9	8,19	1285,4	16427,9

Изменение относительной скорости вращения главной силовой линии стана ХПТ-32-3-8 за цикл прокатки трубы как абсолютно твердого тела с учетом характеристик электромеханической системы по известной [1] и по уточненной методикам соответственно приведены на рис. 3.

Расчеты, представленные на рис. 2, показывают, что неравномерность вращения силовой линии стана с учетом скольжения электродвигателя главного привода и при исходных динамических характеристиках механической системы заметно отличаются.

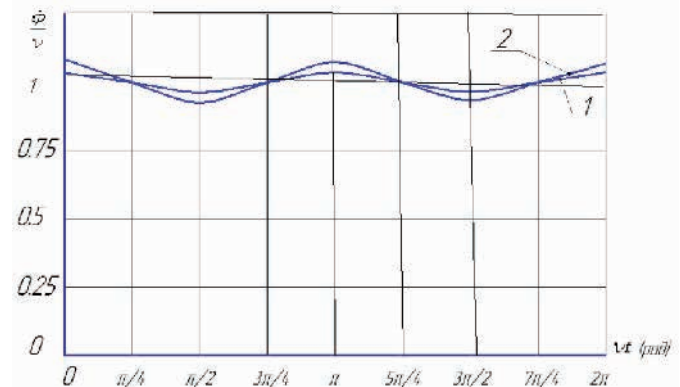


Рис 2. Изменение относительной скорости вращения звена-приведения главной силовой линии стана ХПТ-32-3-8 за цикл прокатки трубы как абсолютно твердого тела переменной момента инерции: 1 - по методике В. И. Соколовского; 2 - по уточненной методике с учетом параметров электромеханической системы

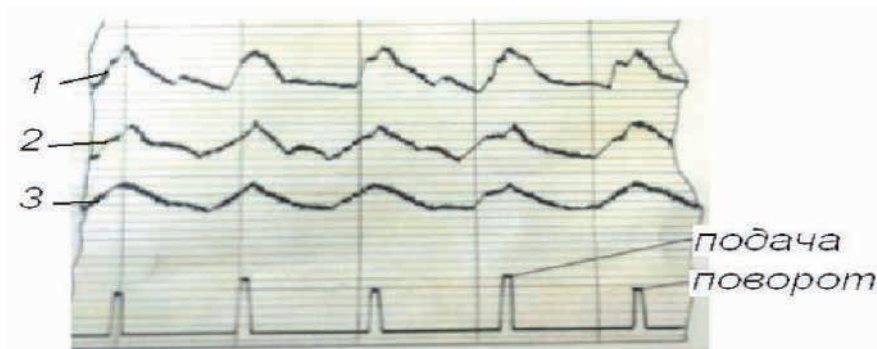


Рис 3. Осциллограмма изменения частоты вращения элементов главной силовой линии стана ХПТ за несколько циклов прокатки трубы:

- 1 – частота вращения входного вала механизма подачи; 2 – частота вращения вала кривошипа;
3 – частота вращения ротора электродвигателя

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований силовой линии стана ХПТ-32-3-8 [5]. Осциллограмма изменения частоты вращения базовых элементов главной силовой линии стана ХПТ-32-3-8 за несколько циклов прокатки трубы приведена на рис. 3.

Сравнение существующей методики с предлагаемой схемой расчета, на примере силовой линии стана ХПТ-32-3-8, показывает некоторые отличительные особенности формирования неравномерности хода и условий функционирования всей механической системы.

Следует подчеркнуть, что вследствие наличия упругих промежуточных звеньев в главной силовой линии стана ХПТ 32-3-8 угловые скорости масс цепи силовой линии стана в каждый момент времени отличаются друг от друга. Причем неравномерность вращения элементов на валу двигателя главного привода стана примерно совпадает с неравномерностью вращения главной линии как абсолютно твердого целого и составляет 14,2 % от средней скорости вращения привода при номинальном режиме работы стана (78 дв.х./мин).

Заметим, что масса двигателя и муфты тормоза из-за большой величины их момента инерции находится в узле колебания формы, происходящего с нижней собственной частотой. Неравномерность вращения элементов главной силовой линии стана ХПТ 32 – 3 = 8, со стороны которой приложен возмущающий момент, несколько меньше и составляет 13,6 % от средней скорости вращения привода.

Неравномерность вращения масс с постоянным моментом инерции ведомого звена РПМ составляет 13,8 %. Заметим, что т. к. при номинальном режиме двигатель работает на естественной механической характеристике, то неравномерность хода стана сравнительно небольшая. Она может возрастать при других режимах работы (например, при 100–120 дв.х./мин, когда

двигатель работает на искусственных механических характеристиках.

Математическое моделирование динамических процессов показывает, что при этом имеет место значительное снижение избыточной нагрузки на главный привод не только от переменной составляющей момента инерции механической системы, но и сил технологического сопротивления. Это достигается путем незначительного переуравновешивания (на 10 %) подвижных масс главного привода стана ХПТ.

Снижения неравномерности вращения элементов главной силовой линии следует достигать выбором рациональных параметров базового выравнивающего и уравновешивающего устройств подвижных масс механической системы. Это может быть реализовано на базе предложенной математической модели.

Выводы

1. Уточнена методика исследования динамики главной силовой линии стана ХПТ и предложена схема определения неравномерности хода механической системы на базе развития выбранной электромеханической модели. Составлено дифференциальное уравнение движения кривошипа или звена привода для выбранной динамической модели механической системы силовой линии стана ХПТ.

2. Выявлено, что при номинальном режиме работы электродвигателя главного привода неравномерность хода силовой линии стана сравнительно небольшая. Она может возрастать при других режимах работы, когда электродвигатель работает на искусственных механических характеристиках. Расчетным путем установлено, что неравномерность вращения элементов главной силовой линии стана ХПТ-32-3-8 составляет 13,6 % от средней скорости вращения системы. Обоснована возможность сведения к минимуму избыточных динамических нагрузок в механической системе.

3. Моделированием динамических процессов выявлено, что управление неравномерностью вращения элементов главной силовой линии следует производить при помощи базового уравновешивающего устройства подвижных масс системы. Предложена схема монтажа базового уравновешивающего устройства на кривошипном валу силовой линии стана ХПТ.

4. Установлено, что для уменьшения нежелательных динамических явлений в механической системе и элементах силовой линии стана ХПТ необходимо увеличить жесткость вала шестерни приводного механизма до расчетной величины.

Библиографический список

1. Гриншпун М. И. Станы холодной прокатки труб / М. И. Гриншпун, В. И. Соколовский // Машиностроение. – 1967. – 239 с.

2. Кожевников С. Н. Модернизация стана холодной прокатки / С. Н. Кожевников, А. С. Тка-

ченко, Г. И. Хаустов // Вестник машиностроения. – 1984. – № 4. – С. 62–65.

3. Кожевников С. Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С. Н. Кожевников. – Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.

4. Вышинский В. Т. Исследование и особенности упрощения динамических моделей рядных механических цепей / В. Т. Вышинский // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 6. – С. 35–37.

5. Ткаченко А. С. Исследование статически определимого привода клетки стана холодной прокатки труб / А. С. Ткаченко, Р. П. Ермакович, Г. Э. Гохберг, В. Т. Вышинский, И. В. Мураш // Металлург. – 1970. – № 8. – С 44–45.

Поступила 03.11.2015

