

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ХОДА ГЛАВНОЙ СИЛОВОЙ ЛИНИИ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Предложена уточненная методика определения неравномерности хода главной силовой линии стана холодной прокатки труб (ХПТ). Проведено исследование динамики главной силовой линии стана ХПТ, как рядной многомассовой континуальной механической системы переменной структуры. Составлены дифференциальные уравнения движения для выбранной многомассовой динамической модели силовой линии стана с учетом переменной момента инерции и параметров электромеханической модели системы. Установлены особенности формирования избыточных динамических нагрузок в силовой линии стана. Обоснована возможность сведения к минимуму спектра динамических нагрузок и неравномерности хода элементов силовой линии стана ХПТ, путем оптимизации соотношения масс и жесткостей межмассовых связей системы.

Ключевые слова: холодная прокатка, труба, силовая линия, динамика, неравномерность хода, динамическая модель, математическая модель, масса, момент инерции, дифференциальные уравнения, ряд Фурье.

The specified technique of determination of unevenness of the course of the considered line continual mechanical system is offered by research of dynamics of the main power line of a camp of the cold rolling of pipes (CPT). The differential equations of the movement for the chosen mass dynamic model of the power line of a camp taking into account variability of the moment of inertia and parameters of electromechanically model of system are worked out. Features of formation of excess dynamic loadings in the power line of a camp are established. Possibility of minimizing dynamic a range of loadings and unevenness of the course of elements of the power line of a camp of CPT is proved.

Keywords: cold rolling, pipe, power line, dynamics, unevenness of the course, dynamic model, mathematical model, weight, inertia moment, differential equations, Fourier's number.

Введение. Современные технологические линии по производству холоднокатанных труб отличаются растущими темпами инновационных процессов. Реализация данных технологических процессов сопровождается повышением скоростей и силовых воздействий на обрабатываемое изделие. Эти тенденции развития производства труб высокого качества неизбежно выдвигают новые, более жесткие требования к станам холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ), прежде всего в отношении надежности и долговечности их функционирования. В связи с ростом скоростей и технологических нагрузок динамические процессы, определяющие долговечность тяжело нагруженных станов ХПТ, приобретают первостепенное значение.

Постановка задачи. Изучение закономерностей функционирования силовой линии станов ХПТ, установление влияния их параметров на формирование спектра динамических нагрузок при переходных,

неустановившихся и стационарных процессах позволяет подобрать такое сочетание их, чтобы амплитудные значения нагрузок не выходили за пределы, допускаемые заданной долговечностью для данного типа машин периодического действия, как силовые линии станов ХПТ.

В данных условиях возникающие в силовой линии станов ХПТ значительные знакопеременные силы инерции, наряду с другими нагрузками, формируют различные динамические эффекты.

Действия указанных сил в значительной мере определяются условиями работы главной силовой линии станов ХПТ, как машин периодического действия, а, следовательно, и влияют на их производительность.

Увеличение надежности и долговечности элементов главного привода стана ХПТ, как высокодинамичной системы, потребовало рассмотрения и уточнения ряда фундаментальных вопросов динамики машин.

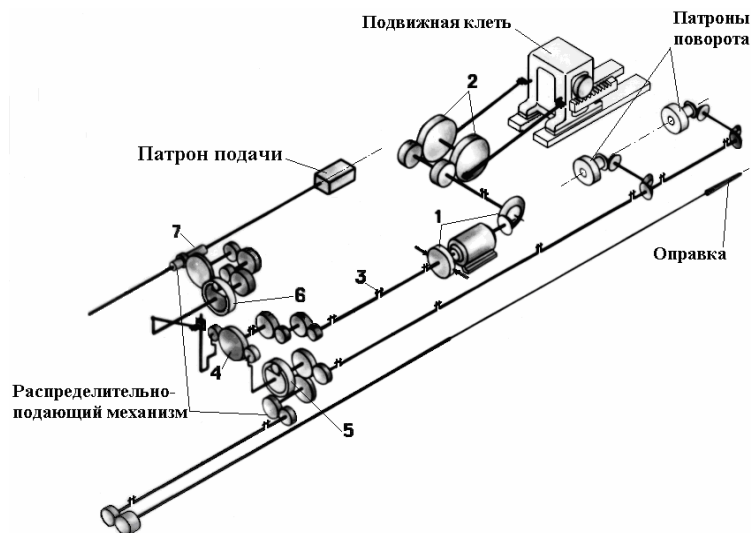


Рисунок 1 – Кинематическая схема стана ХПТ с типовым распределительно-подающим механизмом

Наиболее актуальным является исследование динамики механизмов главной силовой линии стана ХПТ, когда ведомые звенья ряда механизмов перемещаются с переменными скоростями. На основании этих исследований устанавливаются действительные величины и характер изменения динамических нагрузок в трансмиссии стана с учетом истинного движения рабочей клетки и других звеньев. При этом, как правило, широко варьируем параметрами, как самих механизмов стана, так и силовыми воздействиями со стороны очага деформации.

В данных условиях определенный интерес представляет разработка теоретических основ расчета и способов локализации зоны действия избыточных динамических нагрузок в элементах главной силовой линии стана ХПТ, а также синтез устройств, реализующих эти способы. Это

позволяет изучить особенности воздействия инерционных нагрузок подвижных масс рабочей клетки и шатунов стана ХПТ на звенья силовой линии привода и обосновать возможность сведения к минимуму зоны действия избыточных динамических нагрузок.

Обоснование и решение поставленной задачи динамического синтеза достигается уравнивающими и выравнивающими устройствами с рациональными параметрами, исключающими передачу пиковых инерционных нагрузок на базовые элементы главной силовой линии стана ХПТ или его отдельные узлы, что возможно реализовать на основании детального изучения закономерностей движения элементов комплекса взаимосвязанных узлов и механизмов системы.

Отметим, что при этом необходимость в совершенствовании базовых механизмов силовой линии стана ХПТ, которые обладают оптимальными динамическими характеристиками (массами, жесткостями и т.д.), продиктована стабилизацией условий холодной пильгерной прокатки трубы.

Выбор основных направлений теоретических исследований и разработка технических решений по совершенствованию силовой линии стана в большинстве случаев обуславливает определенный рост быстроходности комплекса основных механизмов с одновременным качественным улучшением их динамических характеристик. Это в целом создает необходимые и достаточные условия для увеличения эксплуатационной надежности, долговечности и работоспособности узлов стана ХПТ.

Решение данного вопроса потребовало совершенствования методов динамического анализа и синтеза механизмов главной силовой линии стана ХПТ с заданными характеристиками и дальнейшее сравнение полученных результатов с данными базовых экспериментальных исследований, с целью реализации оптимальных вариантов модернизации силовой линии стана ХПТ. При решении данной проблемы учитывалось, что для реализации инновационной технологии производства и поддержания соответствующих показателей качества труб число звеньев механизмов силовой линии стана ХПТ и соответствующие их массы должны быть минимальными, а ведомые звенья механической системы должны перемещаться с высокой точностью и позиционированием.

Анализ литературных источников. Опыт эксплуатации, методы и результаты исследования отечественных станов ХПТ подробно изложены в трудах С.Н. Кожевникова и его учеников, В.И. Соколовского, М.И. Гриншпуна, Л.И. Цехновича, А.С. Ткаченко и др.

В частности, в трудах С.Н. Кожевникова получил дальнейшее развитие метод непосредственного определения динамических нагрузок при

стационарном и переходном режимах движения, в многомассовых динамических моделях механических систем с линейными и нелинейными характеристиками [2].

Вопросы исследования динамических явлений в станах с учетом переходных процессов и параметров электромеханической модели сложных механических систем широко освещены в работах С.Н. Кожевникова, Л.И. Цехновича и др. [6].

Результаты исследования взаимосвязи динамики станов ХПТ с технологическими параметрами процессов холодной пильгерной прокатки труб изложены в работах Ю.Ф. Шевакина, Ф.С. Сейдалиева, В.Ф. Фролова и др.[3, 4].

Динамические исследования силовой линии станов ХПТ, как машин периодического действия сводятся, в большинстве случаев, к рассмотрению нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Решение данной задачи в первом приближении получено использованием методики, которая предложена А.П. Бессоновым и в дальнейшем развита В.И. Соколовским [1, 5].

Дифференциальное уравнение движения одномассовой системы с переменным приведенным моментом инерции, обусловленным наличием в цепи исходной схемы кривошипно – ползунного или другого аналогичного (распределительно – подающего) механизма с индивидуальным приводом, решено различными приближенными методами, изложенными в работах С.Н. Кожевникова и др. авторов. Кроме того, известно частное решение подобной задачи в очередном приближении, полученное В.И. Соколовским в аналитическом виде [1, 6].

Ввиду сложности полученных результатов, установлено, что при этом с целью установление оптимальной зависимости между жесткостями и массами системы, использование компьютерных технологий для исследования движения сложной континуальной механической системы силовой линии стана ХПТ является актуальным.

Метод решения задачи. Используя известные методики исследования динамики машин периодического действия [1–5] переходим к исследованию неравномерности хода главной силовой линии стана ХПТ с учётом упругости звеньев, переменности момента инерции и параметров электромеханической системы.

Согласно принятой расчетной схемы в дальнейшем проанализируем результаты работ [1, 7] и представим развитое решение системы дифференциальных уравнений движения элементов многомассовой модели силовой линии стана ХПТ (рис. 2).

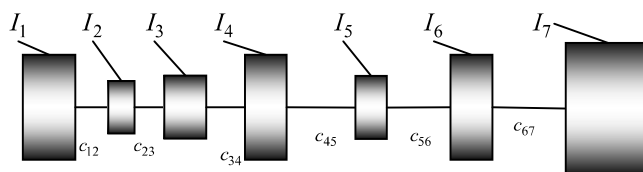


Рисунок 2 – Принятая многомассовая динамическая модель силовой линии стана ХПТ

Разделим уравнения системы на соответствующие коэффициенты при второй производной и вычтем каждое последующее уравнение из предыдущего. В результате получим систему дифференциальных уравнений относительно углов закручивания $\phi_{i-1,i} = \phi_{i-1} - \phi_i$ силовой линии стана ХПТ в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi}_{12} + C_{12} \left[\frac{1}{I_1(\phi_1)} + \frac{1}{I_2} \right] \phi_{12} - \frac{C_{23}}{I_2} \phi_{23} = \\ \frac{k_i m g + P_c r_2}{I_1(\phi_1)} \cdot \left[\frac{2}{\pi} + \frac{2\delta}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{30}\right) + \frac{4\lambda}{3\pi} \cos(\phi_1) + \frac{8}{3\pi} \sin(2\phi_1) - \left(\frac{4}{3\pi} + \frac{4\delta}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{30}\right) \right) \cos(2\phi_1) \right] \\ \ddot{\phi}_{23} + C_{23} \left(\frac{1}{I_2} + \frac{1}{I_3} \right) \phi_{23} + \frac{C_{23}}{I_3} \phi_{12} - \frac{C_{34}}{I_3} \phi_{34} = -\frac{ik}{I_3} (\omega_0 - \dot{\phi}_3 i) \\ \ddot{\phi}_{45} + C_{45} \left(\frac{1}{I_4} + \frac{1}{I_5} \right) \phi_{45} + \frac{C_{34}}{I_4} \phi_{34} - \frac{C_{56}}{I_5} \phi_{56} = 0 \\ \ddot{\phi}_{56} + C_{56} \left(\frac{1}{I_5} + \frac{1}{I_6} \right) \phi_{56} + \frac{C_{45}}{I_5} \phi_{45} - \frac{C_{67}}{I_6} \phi_{67} = 0 \\ \ddot{\phi}_{67} + C_{67} \left(\frac{1}{I_6} + \frac{1}{I_7} \right) \phi_{67} + \frac{C_{56}}{I_6} \phi_{56} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь, учитывая равнопеременное движение масс системы, вместо $\phi_i (i = I, 3)$ необходимо в решение задачи подставить выражение $\phi(t) = vt + \omega$. Отметим, что правые части и коэффициенты первого уравнения системы (1) представляют собой периодические функции, а остальные уравнения системы имеют соответствующие постоянные коэффициенты. Значение неравномерности вращения для выбранной семимассовой динамической модели главной силовой линии стана ХПТ, как абсолютно твердого тела, вычисленные по формуле

$$\omega / v = a_1 \cos(vt) - a_2 \sin(vt) + 2a_3 \cos(2vt) - 2a_4 \sin(2vt),$$

с использованием исходных данных базовой модели механической системы стана ХПТ 32-3 приведены в таблице 1.

Таблице 1

Неравномерность вращения силовой линии стана ХПТ 32-3-8,
как абсолютно твердого тела

vt , град	ω / v	vt , град	ω / v
0°	0,0666	180°	0,0710
1°	0,0666	182°	0,0710
2°	0,0665	185°	0,0704
5°	0,0658	190°	0,0676
10°	0,0628	200°	0,0564
20°	0,0511	210°	0,0385
30°	0,0331	220°	0,0163
40°	0,0108	225°	0,0043
45°	-0,0009	230°	-0,0077
50°	-0,0131	240°	0,0305
60°	-0,0356	250°	-0,0494
70°	-0,0541	260°	-0,0621
80°	-0,0619	270°	0,0671
88°	-0,0703	280°	-0,0639
90°	-0,0705	290°	-0,0529
92°	-0,0704	300°	-0,0354
100°	-0,0665	310°	-0,0136
110°	-0,0546	315°	-0,0019
120°	-0,0362	320°	0,0098
130°	-0,0134	330°	0,0320
135°	-0,0013	340°	0,0503
140°	0,0110	350°	0,0623
150°	0,0341	355°	0,0655
160°	0,0531	360°	0,0666
170°	0,0660		

Решение системы дифференциальных уравнений (1) проводим путем уточнения методики, которая приведена в работе [5]. Разложением в ряд

Фурье представим функцию $\phi_{i,i+1} (i = 1, 2 \dots 6)$ в виде соответствующих отрезков

$$\left. \begin{aligned} \phi_{12} &= b_0 + b_1 \sin(vt) + b_2 \cos(vt) + b_3 \sin(2vt) + b_4 \cos(2vt); \\ \phi_{23} &= c_0 + c_1 \sin(vt) + c_2 \cos(vt) + c_3 \sin(2vt) + c_4 \cos(2vt); \\ \phi_{34} &= d_0 + d_1 \sin(vt) + d_2 \cos(vt) + d_3 \sin(2vt) + d_4 \cos(2vt); \\ \phi_{34} &= e_0 + e_1 \sin(vt) + e_2 \cos(vt) + e_3 \sin(2vt) + e_4 \cos(2vt); \\ \phi_{45} &= g_0 + g_1 \sin(vt) + g_2 \cos(vt) + g_3 \sin(2vt) + g_4 \cos(2vt); \\ \phi_{56} &= r_0 + r_1 \sin(vt) + r_2 \cos(vt) + r_3 \sin(2vt) + r_4 \cos(2vt). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Умножим уравнение (1) на $I_1(\varphi_1)$ и подставим (2) в (1). Далее разложив в первом уравнении произведения тригонометрических функций в ряды Фурье, ограничиваясь в этих разложениях вторыми гармониками и приравнявая, справа и слева от знака равенства коэффициенты при одинаковых гармониках, получаем систему линейных алгебраических уравнений 30-ого порядка. Т.к. в последних трех уравнениях системы (1) отсутствует значимая технологическая нагрузка, то выражая r_i через g_i из последнего уравнения, g_i через e_i и из предпоследнего уравнения e_i через d_i из следующего от конца уравнения.

Далее приравниваем соответствующие коэффициенты при $\sin(jvt)$ и $\cos(jvt)$ и подставляем их в остальные уравнения (1). Следовательно, получаем систему уравнений 15-го порядка, содержащую неизвестные постоянные $b_i, c_i, d_i (i = 0, 1, 2, 3, 4)$. Относительно определителя полученной системы уравнений известно, что он явно невыраженный, т.к. низшая собственная частота для выбранной базовой семимассовой динамической системы (рис. 2), описывающей упругую линию стана ХПТ 32-3 порядка 180 рад/сек. (28,6 Гц) в то время как частота вынуждающей силы при номинальном режиме функционирования силовой линии (78 дв.ход./мин) $\nu = 8,1886 \text{ рад / сек} (1,3 \text{ Гц})$ т.е. меньше собственной частоты механической системы главного привода в 22 раза.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) реализовано численно методом Рунге – Кутта с применением компьютерных технологий для номинального режима работы силовой линии и исходной характеристики звеньев стана ХПТ 32 3.

Расчет динамики силовой линии стана ХПТ 32 проведен в соответствии с данными таблицы 2.

Таблица 2

Динамические параметры силовой линии стана ХПТ 32

I	1	2	3	4	5	6	7
I, кгм ²	52,94	32,36	1151,9	25,6	64,6	2,9	5,6
СЧ10 ⁻⁵ , Н/м	51,54	256	54,5	65	13,5	22,4	-----

Расчетные значения коэффициентов, входящие в соответствующее решение уравнений (1) и (2), приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов уравнения (2)

I	1	2	3	4
<i>a</i>	-0.007465	-0.000038	-0.002140	-0.000020
<i>c</i>	-0.000226	-0.000129	0.000812	0.000556
<i>d</i>	0.003789	0.000313	-0.001801	-0.001271
<i>e</i>	-0.002258	-0.000186	0.001074	0.000758
<i>g</i>	-0.000636	0.000024	-0.000140	-0.000099
<i>r</i>	-0.000253	-0.000010	0.000056	0.000039

Расчетные значения скоростей и относительных углов закручивания звеньев $\dot{\phi}_{i,i+1}/v$ ($i = 1, 2 \dots 6$) главной силовой линии стана ХПТ 32-3 за цикл прокатки трубы, по маршруту $\varnothing 38 \times 1,8 \rightarrow \varnothing 25 \times 0,8$, материал Х18Н10Т, приведены в таблице 4

Таблица 4

Значения скоростей и относительных углов закручивания звеньев главной силовой линии стана ХПТ 32-3 за один цикл прокатки трубы

νt .град	$\dot{\phi}_{12}/v$	$\dot{\phi}_{23}/v$	$\dot{\phi}_{34}/v$	$\dot{\phi}_{45}/v$	$\dot{\phi}_{56}/v$	$\dot{\phi}_{67}/v$
0°	-0,00428	0,00162	-0,00360	0,00215	0,00020	0,00011
5°	-0,00422	0,00160	-0,00355	0,00211	-0,00028	0,00011
10°	-0,00402	0,00153	-0,00338	0,00202	-0,00026	0,00010
20°	0,00328	0,00124	-0,00276	0,00065	-0,00021	0,00009
30°	0,00214	0,0008	-0,00180	0,00107	-0,00014	0,00006
40°	0,00074	0,00028	-0,00062	0,00037	-0,00005	0,00002
50°	-0,00074	-0,00028	0,00063	-0,00037	0,00015	-0,00002
60°	-0,00214	-0,00081	0,00180	-0,00107	-0,00014	-0,00006
70°	-0,00328	-0,00124	0,00276	-0,00165	0,00021	-0,00009
80°	0,00402	-0,00153	0,00338	-0,00202	0,00026	-0,00010
90°	0,00428	-0,00162	0,00360	-0,00214	0,00028	-0,00011
100°	0,00402	-0,00153	-0,00338	-0,00202	0,00026	-0,00010
110°	0,00328	-0,00124	0,00276	-0,00164	0,00021	-0,00009
120°	0,00214	-0,00081	0,00180	-0,00107	0,00014	-0,00006
130°	0,00074	-0,00028	0,00063	-0,00037	0,000049	-0,00002
140°	-0,00074	0,00028	-0,00063	0,00037	-0,00005	0,00002
150°	-0,00214	0,00081	-0,00180	0,00107	-0,00014	0,00006
160°	-0,00328	0,00124	0,00276	0,00165	-0,00021	0,00009
170°	-0,00402	0,00153	-0,00338	0,00202	-0,00026	0,00010
180°	-0,00428	0,00162	-0,00360	0,00215	-0,00028	0,00011
190°	-0,00402	0,00153	-0,00338	0,00202	-0,00026	0,00010
200°	-0,00328	0,00124	-0,00276	0,00164	-0,00021	0,00009
210°	-0,00214	0,00081	-0,00180	0,00107	-0,00014	0,00006
220°	-0,00074	0,00028	-0,00063	0,00037	0,000049	0,00002
230°	-0,00007	-0,00028	0,00062	-0,00037	0,00005	-0,00002
240°	0,00214	-0,00081	0,00180	-0,00107	0,00014	-0,00006
250°	0,00328	-0,00124	0,00276	-0,00164	0,00021	-0,00009
260°	0,00402	-0,00153	0,00338	-0,00202	0,00026	-0,00010

270°	0,00428	-0,00162	0,00360	-0,00215	0,00028	-0,00011
280°	0,00402	-0,00153	0,00338	-0,00202	0,00026	-0,00010
290°	0,00328	-0,00124	0,00276	-0,00165	0,00021	-0,00009
300°	0,00214	-0,00081	0,00180	-0,00107	0,00014	-0,00006
310°	0,00074	-0,00028	0,00062	-0,00037	0,000049	-0,00002
320°	-0,00074	0,00028	-0,00063	-0,00037	-0,00005	-0,00002
330°	-0,00214	0,00081	-0,00180	0,00107	0,00014	0,00006
340°	-0,00328	0,00124	-0,00276	0,00164	-0,00021	0,00009
350°	-0,00402	0,00153	-0,00338	0,00202	-0,00026	0,00010

Подставляя решение (2) для $\phi_{i,i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) в исходную систему согласно (1), получаем несвязные уравнения относительно ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, 7$). При этом достаточно проинтегрировать одно из них, например, уравнение для угла поворота массы электродвигателя главного привода стана ХПТ. Расчетные значения переменной составляющей угловых скоростей $\dot{\phi}_i/v$ ($i = 1, 2, \dots, 7$) элементов цепи силовой линии стана ХПТ 32 – 3 за один цикл его работы, по маршруту $ш38x1,8 \rightarrow ш25x0,8$, материал Х18Н10Т, приведены в таблице 5.

Таблица 5

Значения переменной составляющей угловых скоростей элементов цепи главного привода за один цикл работы стана ХПТ 32-3

vt , град	$\dot{\phi}_1/v - 1$	$\dot{\phi}_2/v - 1$	$\dot{\phi}_3/v - 1$	$\dot{\phi}_4/v - 1$	$\dot{\phi}_5/v - 1$	$\dot{\phi}_6/v - 1$	$\dot{\phi}_7/v - 1$
0°	0,0639	0,0682	0,0666	0,0650	0,0658	0,0654	0,0655
10°	0,0491	0,0643	0,0528	0,0594	0,0614	0,0612	0,0613
20°	0,0318	0,0523	0,0511	0,0489	0,0490	0,0486	0,0487
30°	0,0103	0,0339	0,0331	0,0313	0,0324	0,0322	0,0323
40°	-0,0141	0,0111	0,0108	0,0102	0,0106	0,0105	0,0105
50°	-0,0386	-0,0134	-0,0131	-0,0125	-0,0128	-0,0127	-0,0127
60°	-0,0586	-0,0364	-0,0356	-0,0338	-0,0349	-0,0350	-0,0351
70°	-0,0594	-0,0553	-0,0541	-0,0513	-0,0530	-0,0528	-0,0529
80°	-0,0678	-0,0634	-0,0619	-0,0585	-0,0605	-0,0603	-0,0604
90°	-0,0640	-0,0721	-0,0705	-0,0669	-0,0690	-0,0688	-0,0689
100°	-0,0526	-0,0680	-0,0665	-0,0699	-0,0719	-0,0716	-0,0717
110°	-0,0349	-0,0558	-0,0546	-0,0518	-0,0535	-0,0533	-0,0534
120°	-0,0129	-0,0370	-0,0362	-0,0344	-0,0355	-0,0353	-0,0354
130°	-0,0106	-0,0137	-0,0134	-0,0128	-0,0131	-0,0131	-0,0131
140°	0,0328	0,0113	0,0110	0,0104	0,0107	-0,0107	-0,0107
150°	0,0511	0,0349	0,341	0,0323	0,0334	0,0332	0,0333
160°	0,0635	0,0543	0,0531	0,0503	0,0520	0,0518	0,519
170°	0,0683	0,0675	0,0660	0,0626	0,0646	0,0644	0,0645
180°	0,0651	0,0726	0,0710	0,0674	0,0696	0,0693	0,0694
190°	0,0544	0,0691	0,0676	0,0642	0,0622	0,0660	0,0661
200°	0,0372	0,0576	0,0564	0,0536	0,0553	0,0551	0,0552
210°	0,0158	0,0393	0,0385	0,0367	0,0378	0,0376	0,0377

220°	-0,0081	0,0166	0,0163	0,0157	0,0160	0,0160	0,0160
230°	-0,0292	-0,0080	-0,0077	-0,0071	-0,0075	0,0074	0,0074
240°	-0,0474	-0,0313	-0,0305	-0,0287	-0,0298	-0,0296	-0,0297
250°	-0,0596	-0,0506	-0,0494	-0,0466	-0,0483	-0,0481	-0,0482
260°	-0,0644	-0,0636	-0,0621	-0,0587	-0,0607	-0,0605	-0,0606
270°	-0,0614	-0,0687	-0,0671	-0,0637	-0,0659	-0,0656	-0,0657
280°	-0,0509	-0,0654	-0,0639	-0,0605	-0,0625	-0,0623	-0,0624
290°	-0,0341	-0,0541	-0,0529	-0,0501	-0,0518	-0,0516	-0,0517
300°	-0,0131	-0,0362	-0,0354	-0,0336	-0,0347	-0,0345	-0,0346
310°	-0,0093	-0,0139	-0,0136	-0,0130	-0,0134	-0,0133	-0,0133
320°	-0,0307	0,0101	0,0098	0,0092	0,0088	0,0088	-0,0088
330°	0,0482	0,0328	0,0320	0,0302	0,0313	0,0311	0,0312
340°	0,0598	0,0515	0,0503	0,0475	0,0492	0,0490	0,0491
350°		0,0638	0,0623	0,0589	0,0609	0,0607	0,0608

Изменение относительной скорости вращения элементов главной силовой линии стана ХПТ-32-3 за цикл прокатки трубы по выбранному маршруту (заготовка диам. $\varnothing 38 \times 1,8$ готовая труба диам. $\varnothing 25 \times 0,8$, материал Х18Н10Т), как абсолютно твердого тела переменного момента инерции по методике В. И. Соколовского [1] и по уточненной методике с учетом параметров электромеханической системы приведены на рисунке 3.

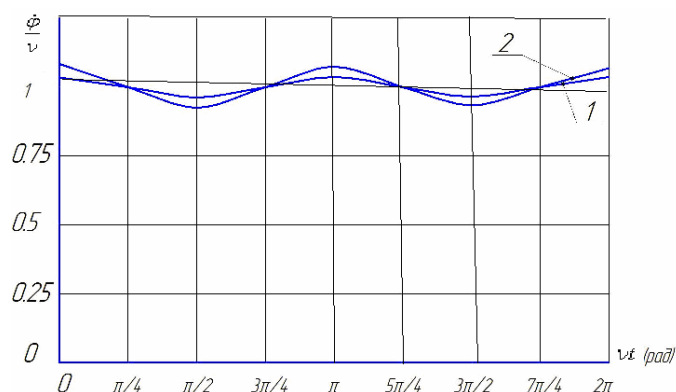


Рисунок 3 – Изменение относительной скорости вращения главной силовой линии стана ХПТ-32-3-8 за цикл прокатки трубы по маршруту $\varnothing 38 \times 1,8 \rightarrow \varnothing 25 \times 0,8$, материал нержавеющей сталь Х18Н10Т, как твердого тела переменного момента инерции: 1 – по методике В. И. Соколовского; 2 – по уточненной методике с учетом параметров электромеханической системы

Вследствие наличия упругих промежуточных звеньев в главной силовой линии стана ХПТ угловые скорости масс цепи 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 (78дв.х./мин). Заметим, что масса

двигателя и муфты тормоза из-за большой величины их момента инерции находится в узле колебания. Это соответствует нижней собственной частоте механической системы.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований силовой линии стана ХПТ-32-3. Сравнительный анализ осциллограмм изменения частоты вращения элементов главной силовой линии стана ХПТ-32-3 за несколько циклов прокатки трубы, приведенные в работах [7, 8], указывает на некоторые погрешности расчетов (в пределах 10–12%), что подтверждает высокую достоверность результатов исследований.

Расчеты показывают, что т.к. при номинальном режиме двигатель работает на естественной механической характеристике, то неравномерность хода стана сравнительно небольшая. Она может возрасти при других режимах работы, когда двигатель работает на искусственных механических характеристиках. Неравномерность вращения элементов главной силовой линии стана ХПТ, со стороны которой приложен возмущающий момент, несколько меньше и составляет 16,3% от средней скорости вращения привода. Неравномерность вращения масс с постоянным моментом инерции ведомого звена РПМ составляет 13,8%

Исследования динамических процессов силовой линии показывают то, что для снижения неравномерности вращения элементов силовой линии стана ХПТ необходимо оптимизировать соотношения масс и жесткостей механической системы. Из многолетнего опыта эксплуатации ряда станов ХПТ видно, что для комплексного решения поставленной задачи, помимо всего, необходимо использовать уравнивающие устройства подвижных масс (рабочей клетки, шатунов и др. масс) главного привода. Отметим, что только при этом достигается стабилизация основного спектра пиковых нагрузок на главном приводе не только от переменной составляющей момента инерции, но и нестационарных сил технологического сопротивления.

Выравнивание инерционных нагрузок подвижных масс рабочей клетки и шатунов главного привода стана ХПТ приводит к значительному снижению неравномерности хода силовой линии стана и стабилизации технологических процессов производства труб.

Выводы

1. Путем развития электромеханической модели механической системы уточнена методика определения неравномерности хода главной силовой линии стана ХПТ. Составлены дифференциальные уравнения движения для выбранной многомассовой динамической модели силовой линии стана ХПТ с учетом параметров электромеханической модели и переменности момента инерции механической системы.

2. Выявлено, что при номинальном режиме работы электродвигателя главного привода неравномерность хода силовой линии стана сравнительно

небольшая. Она может возрасти 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 16,3% от средней скорости вращения системы.

3. Моделированием динамических процессов установлено, что для уменьшения нежелательных динамических явлений в механической системе и элементах силовой линии стана ХПТ необходимо увеличить жесткость приводного вала до расчетной величины.

4. Обоснована возможность сведения к минимуму избыточных динамических нагрузок в механической системе силовой линии стана ХПТ. Установлено, что активное управление неравномерностью вращения элементов главной силовой линии следует производить при помощи базового уравнивающего устройства подвижных масс системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриншпун М.И. Станы холодной прокатки труб/ М.И. Гриншпун, В.И. Соколовский// М: Машиностроение, 1967. – 239 с.
2. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.
3. Шевакин Ю.Ф. Станы холодной прокатки труб /Ю.Ф. Шевакин, Ф.С. Сейдалиев// М: Металлургия, 1966. – 212 с.
4. Фролов В.Ф. Холодная прокатка труб/ В.Ф. Фролов, В.Н. Данченко, Я.В. Фролов// Монография, – Днепропетровск: Пороги, 2005 – 255 с.
5. Бессонов А. П. Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев. /А.П. Бессонов – М.: Наука, 1967. – 267 с.
6. Кожевников С.Н. Модернизация стана холодной прокатки /С.Н.Кожевников, А.С. Ткаченко, Г.И. Хаустов //Вестник машиностроения, 1984.-№ 4. С. 62-65.
7. Вышинский В.Т. Исследование и особенности упрощения динамических моделей рядных механических цепей. // Теория и практика металлургии.1999. №6. – С.35 – 37
8. 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//Металлургия – 1970.-№8. – С 44 – 45