

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ГЛАВНЫХ ЛИНИЙ ЛИСТОПРОКАТНОГО СТАНА

Приведены результаты анализа динамики главных линий чистовых клетей широкополосного стана горячей прокатки (ШСП) при различных его схемах и составе оборудования. Предлагается к реализации безредукторная схема линии привода чистовых клетей с двигателем переменного тока и удлиненным промежуточным валом, обеспечивающая минимальный уровень динамических нагрузок с коэффициентом динамичности в интервале $1,5 \leq K_d \leq 2,0$, что увеличит надежность работы линии привода прокатной клетки в целом.

широкополосный стан горячей прокатки, состав оборудования, главные линии, динамические нагрузки, надежность работы

Состояние вопроса и постановка задачи исследования.

Снижение энергозатрат на производство единицы продукции является важной задачей металлургического производства. По экономическим причинам останавливаются наиболее энергоёмкие производственные мощности, а на оставшихся внедряются энергосберегающие технологии. При горячей прокатке листа применяется транзитная (прямая) прокатка, без промежуточного подогрева в методических печах. Реализация технологии прокатки полос толщиной менее 2 мм, прокатки рулонов удвоенной массы, расширение марочного сортамента, увеличение скорости прокатки – все это вызывает дополнительные нагрузки в прокатном оборудовании. Указанные изменения технологического процесса приводят к увеличению нагрузок в прокатном оборудовании, которое требует реконструкции либо замены.

Наиболее простым решением в этом случае является соответствующее увеличение мощности главных приводов прокатных клетей. В чистовой группе клетей стана НТЛС 1680 ОАО «Запорожсталь» в период с 2002 по 2004 г. были установлены электродвигатели переменного тока. Двигатели переменного тока имеют меньший момент инерции ротора, более надежны в эксплуатации и требуют меньших затрат на обслуживание, по сравнению с двигателями постоянного тока.

Механическая часть линии привода прокатных валков чистовых клетей, содержащая силовой редуктор, осталась без изменений. Выбор электродвигателей производился по статическим параметрам (мощность, частота вращения, крутящий момент), при этом параметры, влияющие на динамику переходных процессов в линии привода, не учитывались. Вследствие чего амплитудно–частотные характеристики линий приводов остались не оптимальными, отношение собственных частот меньше 2 [1].

Динамические нагрузки в линии привода, определенные при промышленных исследованиях, по–прежнему имеют значительную

величину (рис.1), в частности, коэффициенты динамичности составляют: на шпиндельном участке 1,4–2,4; на моторном участке 2,0–4,0 [2–4]. Декремент затухания колебаний момента сил упругости уменьшился, длительность переходного процесса увеличилась (рис.1).

Клеть 5

Клеть 6

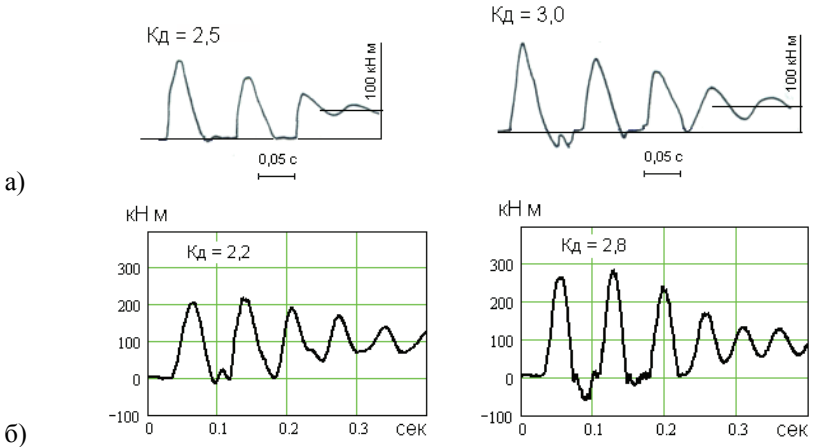


Рис.1. Моменты сил упругости на промежуточном валу клеток 5 и 6 при захвате полосы прокатными вальками: а) двигатель постоянного тока (1998 г.), б) двигатель переменного тока (2006 г.).

Зависимость динамических нагрузок от схемы, компоновки и конструкции линии привода, установленная теоретическими исследованиями рядом авторов [5–7], характеризуется длинами, податливостью и моментами инерции составляющих элементов. С целью уменьшения уровня динамических нагрузок рассмотрены рациональные варианты реконструкции действующих линий приводов прокатных клеток.

Изложение основных материалов исследования.

Рассмотрим и сравним три варианта схем компоновки линии привода чистовой группы клеток НТЛС 1680 ОАО “Запорожсталь”: 1) – существующая схема привода, состоящая из электродвигателя, зубчатой моторной муфты с промежуточным валом, горизонтального одноступенчатого редуктора, зубчатой коренной муфты, шестеренной клетки и двух шпинделей (рис.2а); 2) – возможная безредукторная схема привода, состоящая из тихоходного электродвигателя переменного тока ($M_n = 1000$ кНм), установленного вместо существующего двигателя, промежуточного вала (т.н. «главного шпинделя») длиной около 8 метров и диаметром, равным диаметру хвостовика шестеренной клетки и далее по схеме (рис.2б); 3) – возможная безредукторная схема привода, состоящая из тихоходного электродвигателя переменного тока ($M_n = 1000$ кНм),

установленного непосредственно на место редуктора, промежуточного вала длиной около 1-го метра соединенного с шестеренной клетью и диаметром, равным диаметру хвостовика шестеренной клетки и далее по схеме (рис.2в). Длины промежуточных валов выбраны исходя из предполагаемого расположения двигателя и шестеренной клетки, диаметр – по прочностной характеристике.

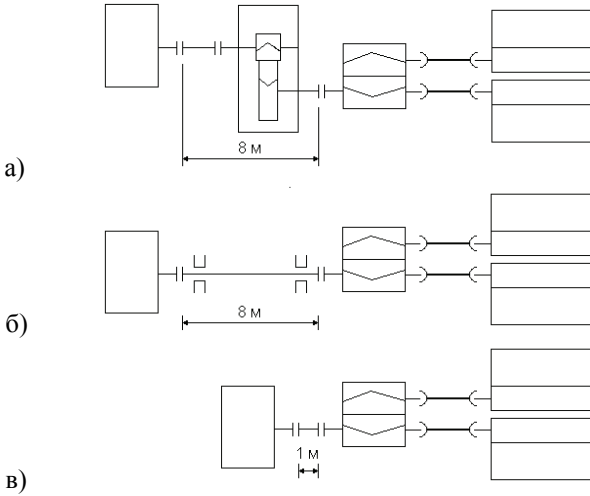


Рис.2. Схема линий привода прокатных клетей чистой группы: а) существующая схема с редуктором, б) замена редуктора длинным промежуточным валом, длиной 8 м, в) установка электродвигателя непосредственно на место редуктора, промежуточный вал длиной 1 м.

В основу математической модели линии привода принята 3-х массовая крутильная система с сосредоточенными упруго-массовыми параметрами. Такими параметрами являются: Q_1, Q_2, Q_3 – моменты инерции ротора электродвигателя, редуктора и шестеренной клетки, валковой системы; C_{12}, C_{23} – жесткости моторного и шпиндельного участков соответственно.

Исходные данные и результаты расчетов динамических нагрузок, возникающих в линии привода при захвате металла валками, по рассматриваемым вариантам приведены в табл.1.

Величины момента сил технологического сопротивления ($M_{пр}$) и частоты вращения прокатных валков ($w_{вал}$) получены на основании промышленных исследований в чистой группе клетей стана 1680 [4]. Действие прокатной нагрузки моделируется путем ступенчатого приложения момента сил технологического сопротивления к валковой системе линии привода. Поскольку на величины динамических нагрузок существенное влияние оказывают угловые зазоры в сочленениях линии привода, моделирование выполнено с их учетом. Рассмотрены следующие

варианты состояния угловых зазоров на шпиндельном и моторном участках: 0 – оба зазора закрыты, Δ_{23} – зазор открыт на шпиндельном участке, Δ_{12} , Δ_{23} – зазор открыт как на шпиндельном так и моторном участке. Реальные величины зазоров взяты из агрегатного журнала механического оборудования стана 1680 и пересчитаны в угловые. Определялись собственные частоты колебаний линии привода (β_1 , β_2 – первая и вторая), их отношения $n = \beta_2/\beta_1$ и коэффициенты динамичности (Кд12 и Кд23) соответственно на моторном и шпиндельном участках.

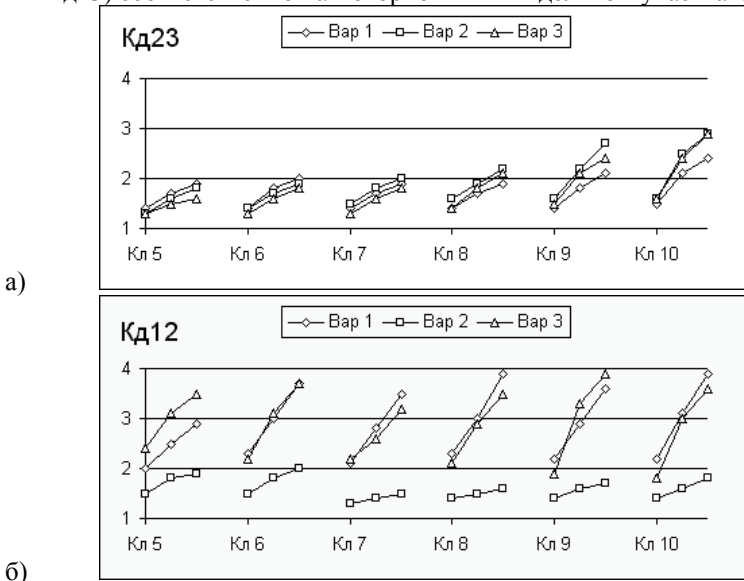


Рис.3. Коэффициенты динамичности (Кд23, Кд12) при различных схемах компоновки линии привода чистовых клеток (Вар 1, Вар 2, Вар 3) и величине угловых зазоров (см. табл.1): а) – на шпиндельном участке, б) – на моторном участке.

Таблица 1а. Исходные данные и результаты расчетов динамических нагрузок, возникающих в линии привода при захвате металла валками, по варианту 1 схемы привода чистовой группы клеток (рис.2а).

	Клеть 5	Клеть 6	Клеть 7	Клеть 8	Клеть 9	Клеть 10
$Q1, \text{т} \cdot \text{м}^2$	331	135	47	25	15	12
$Q2, \text{т} \cdot \text{м}^2$	170	40	12	5	3	2,4
$Q3, \text{т} \cdot \text{м}^2$	2,5	2,5	2,5	2,2	2,2	2,2
$C12, \text{МНм/рад}$	1664	690	214	128	69	56
$C23, \text{МНм/рад}$	34	34	34	32	32	32
$M_{пр}, \text{кНм}$	700	500	400	250	150	90
$w_{взд}, \text{рад/с}$	1	2	3	4	5	6
$\beta_1 / \beta_2, \text{Гц}$	18 / 20	18,1 / 24,6	17,2 / 26,2	17,5 / 31,6	16,5 / 32,7	16,2 / 34
n	1,11	1,36	1,52	1,81	1,98	2,09

$\Delta_{12} / \Delta_{23}$, рад	0,0015 / 0,01	0,002 / 0,01	0,0035 / 0,01	0,005 / 0,01	0,0065 / 0,01	0,007 / 0,01
	Кд23					
0	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5
Δ_{23}	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,9
Δ_{12}, Δ_{23}	1,9	2	1,9	1,9	2,1	2,4
	Кд12					
0	2,0	2,3	2,1	2,3	2,2	2,2
Δ_{23}	2,5	3,0	2,8	3,0	2,9	3,1
Δ_{12}, Δ_{23}	2,9	3,7	3,5	3,9	3,6	3,9

Таблица 16. Исходные данные и результаты расчетов динамических нагрузок, возникающих в линии привода при захвате металла валками, по варианту 2 схемы привода чистовой группы клетей (рис.2б).

	Клеть 5	Клеть 6	Клеть 7	Клеть 8	Клеть 9	Клеть 10
Q1, т·м ²	17	17	17	17	17	17
Q2, т·м ²	10	10	8	8	8	8
Q3, т·м ²	2,5	2,5	2,5	2,2	2,2	2,2
Φ вала, мм	470	470	400	400	400	400
C12, МНм/рад	47	47	25	25	25	25
C23, МНм/рад	34	34	34	32	32	32
Mпр, кНм	700	500	400	250	150	90
wвал, рад/с	1	2	3	4	5	6
β_1 / β_2 , Гц	12,3 / 21,6	12,3 / 21,6	9,6 / 21,8	9,7 / 22,2	9,7 / 22,2	9,7 / 22,2
n	1,76	1,76	2,27	2,29	2,29	2,29
$\Delta_{12} / \Delta_{23}$, рад	0,01 / 0,01					
	Кд23					
0	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6
Δ_{23}	1,5	1,6	1,7	1,8	2,2	2,5
Δ_{12}, Δ_{23}	1,8	1,9	2,0	2,2	2,7	3,1
	Кд12					
0	1,5	1,5	1,3	1,4	1,4	1,4
Δ_{23}	1,8	1,8	1,4	1,5	1,5	1,6
Δ_{12}, Δ_{23}	1,9	2,0	1,5	1,6	1,7	1,8

Таблица 1в. Исходные данные и результаты расчетов динамических нагрузок, возникающих в линии привода при захвате металла валками, по варианту 3 схемы привода чистовой группы клетей (рис.2в).

	Клеть 5	Клеть 6	Клеть 7	Клеть 8	Клеть 9	Клеть 10
Q1, т·м ²	17	17	17	17	17	17
Q2, т·м ²	10	10	8	8	8	8
Q3, т·м ²	2,5	2,5	2,5	2,2	2,2	2,2
Φ вала, мм	470	470	400	400	400	400
C12, МНм/рад	378	378	198	198	198	198
C23, МНм/рад	34	34	34	32	32	32
Mпр, кНм	700	500	400	250	150	90
wвал, рад/с	1	2	3	4	5	6
β_1 / β_2 , Гц	19 / 39,9	19 / 39,9	18,4 / 32,2	18,9 / 32,2	18,9 / 32,2	18,9 / 32,2
n	2,1	2,1	1,75	1,7	1,7	1,7
$\Delta_{12} / \Delta_{23}$, рад	0,01 / 0,01					
	Кд23					

0	1,3	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6
Δ_{23}	1,4	1,5	1,5	1,7	2	2,4
Δ_{12}, Δ_{23}	1,6	1,8	1,8	2,1	2,4	2,9
Кд12						
0	2,4	2,2	2,2	2,1	1,9	1,8
Δ_{23}	3,1	3,1	2,6	2,9	3,3	3,0
Δ_{12}, Δ_{23}	3,5	3,7	3,2	3,5	3,9	3,6

Сравнение трех вариантов схем компоновки линии привода проведено по собственным частотам колебаний линии привода, их отношению и коэффициентам динамичности на моторном и шпиндельном участках. На рис.3 коэффициенты динамичности соответствуют трем сочетаниям угловых зазоров в линии привода: без зазоров (0), зазор на шпиндельном участке (Δ_{23}), зазор на моторном и шпиндельном участке (Δ_{12}, Δ_{23}). Рассмотрим результаты моделирования для представленных трех схем привода.

В варианте 1 (существующая редукторная схема линии привода, рис. 2а) при прочих равных условиях коэффициент динамичности на моторном валу для всех клетей больше коэффициента на шпиндельном участке (табл. 1а). Отношение двух низших частот $n = \beta_2/\beta_1$ монотонно увеличивается от 1,10 до 2,09 (от 5-й клетки к 10-й), при этом первая частота находится в диапазоне 16,2–18 Гц.

В варианте 2 (безредукторная схема линии привода с длинным промежуточным валом, рис. 2б) коэффициенты динамичности на шпиндельном и моторном участках в клетях 5, 6 находятся на одном уровне (отношение частот $n = 1,76$), а в последующих клетях динамическая нагрузка на шпиндельном участке увеличивается по сравнению с таковой на моторном участке (отношение частот $n = 2,29$). Первая низшая частота составляет для клетей 5 и 6 – 12,3 Гц, для клетей 7...10 – 9,6 Гц (табл. 1б).

В варианте 3 (безредукторная схема линии привода с коротким промежуточным валом, рис. 2в) при прочих равных условиях коэффициент динамичности на моторном валу для всех клетей больше коэффициента на шпиндельном участке (табл.1в). Отношение двух низших частот составляет $n = 2,1$ (для 5 и 6 клетки), $n = 1,7$ – для остальных клетей. Первая частота составляет 18,5–19 Гц, вторая – 32,2 и 39,9 Гц.

В клетях 5–8 коэффициент динамичности на шпиндельном участке для всех вариантов компоновки и величин зазоров находится в диапазоне 1,3 – 2,1. В 9 и 10 клетки этот показатель достигает 2,8 – 3,0, однако при небольших статических нагрузках, абсолютные значения динамических нагрузок находятся на одном уровне с таковыми в предыдущих клетях. Различия в компоновке в большей степени отражаются на величинах коэффициента динамичности на моторном участке. Компоновка линии привода по варианту 3 (рис.2в) чувствительна к угловым зазорам, в ней наблюдается более существенное увеличение коэффициента

динамичности на моторном участке. Это видно по увеличенному углу наклона зависимостей на рис.3б.

Наименьшие значения коэффициентов динамичности получены в схеме привода по варианту 2 (промежуточный вал меньшей жесткости, рис.2б). Даже при открытых угловых зазорах в линии привода коэффициент динамичности на обоих участках составляет 1,5–2,0, в то время как для других вариантов компоновок он достигает 3,5–4,0. К тому же электродвигатель расположен в машинном зале, что облегчает его установку и техническое обслуживание.

Схема компоновки линии привода (вариант 3) выгодно отличается своей простотой и компактностью. Однако имеет два недостатка: а) достаточно жесткий участок короткого промежуточного вала, который в процессе захвата металла валками испытывает большие динамические нагрузки; б) электродвигатель расположен в станovém пролете (в непосредственной близости от шестеренной клетки), что негативно отразится на его работе и техническом обслуживании.

Низкооборотный двигатель для непосредственного привода нижнего вала шестеренной клетки, имеет гораздо больший момент инерции, чем быстроходный двигатель в схеме линии привода с редуктором. Однако кинетическая энергия безредукторной линии привода в несколько раз меньше, поскольку она не имеет редуцирующего звена. В такой линии привода динамические процессы протекают более спокойно, сама линия является менее инерционной, что увеличивает быстродействие и улучшает качество регулирования привода. К тому же момент инерции главного привода можно уменьшить, используя два или три электродвигателя, соединенных между собой и обеспечивающих достаточную мощность для деформации металла.

В недалеком прошлом стоимость такого тихоходного двигателя была гораздо больше, поэтому использовались более дешевые быстроходные двигатели с редукторным приводом. В настоящее время разрабатываются и изготавливаются достаточно мощные синхронные двигатели переменного тока, которые по технико-экономическим показателям приближаются к системе быстроходный двигатель – редуктор. Следует отметить, что редуктор линии привода прокатной клетки довольно дорогой и требует постоянного технического обслуживания, подвергается частым поломкам и выходу из строя. При исключении его из состава силового оборудования повышается надежность линии привода прокатной клетки в целом, т.к. надежность линии привода тем больше, чем меньше (по количеству) агрегатов, передающих момент привода прокатным валкам.

Выводы. На основании проведенного сравнительного анализа динамики переходных процессов (при захвате металла валками) предлагается к реализации безредукторная схема линии привода чистовых клеток с двигателем переменного тока и удлиненным промежуточным валом, обеспечивающая минимальный уровень динамических нагрузок с

коэффициентом динамичности в интервале $1,5 \leq K_d \leq 2,0$, что увеличит надежность работы линии привода прокатной клетки в целом.

1. *Динамические перегрузки в приводах клеток широкополосных станов / В.В.Веренев, В.И.Большаков, Ю.Н.Белобров и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 1. – С.72–75.*
2. *Вибродинамические процессы в клетях ШПС 1680 / С.В.Мацко, Д.В.Телюк, А.С.Шелудченко и др. // Тезисы докладов МНТК. Ред. В.В. Чигиринский и др. – Запорожье: ЗНТУ, 2007. – С.56–57.*
3. *Переходные процессы в главных приводах чистовых клеток стана 1680 / А.П.Даличук, В.В.Коренной, С.В.Мацкои др. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – № 1 (19). – С.304–307.*
4. *Опыт исследования динамических процессов в клетях ШПС 1680 / В.В.Веренев, В.В.Коренной, О.В.Симененко и др. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – № 1 (20). – С.316–320.*
5. *Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев: Наукова думка, 1986. – 288с.*
6. *Динамика процессов прокатки / С.Л.Коцарь, В.А.Третьяков, А.Н.Цупров, Б.А.Поляков. – М.: Металлургия, 1997. – 225 с.*
7. *Артюх В.Г. Проблемы защиты тяжелых машин от поломок. // Металл и литье Украины. – 2004. – № 12. – С. 36–39.*

*Статья рекомендована к печати:
академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

В.В.Коренной

Порівняльний аналіз динаміки різних схем головних ліній листопрокатного стану

Приведені результати аналізу динаміки головних ліній чистових клітей широкоштабового стану гарячої прокатки. Розглянуті найбільш раціональні варіанти реконструкції діючих ліній приводів прокатних клітей при різних їх схемах і складі обладнання. Пропонується до реалізації безредукторна схема лінії приводу чистових клітей з двигуном змінного струму і подовженим проміжним валом, що забезпечує мінімальний рівень динамічних навантажень з коефіцієнтом динамічності в інтервалі $1,5 \leq K_d \leq 2,0$, що збільшить надійність роботи лінії приводу прокатної кліті в цілому.