

УДК 621.771.2.06.681.3

Путники А. Ю.

**ВИБРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КЛЕТЯХ ШПС 1680**

Для рационального проектирования таких уникальных машин, как прокатные станы, и их эксплуатации необходимы натурные исследования, накопление, систематизация и анализ экспериментальных данных о фактических переходных процессах и динамических перегрузках.

Анализ последних публикаций [1–5] показывает, что исследованию динамических процессов одновременно во всех клетях одного стана не уделяется должного внимания. Существенно уменьшилось количество публикаций по исследованиям энергосиловых параметров при разных режимах прокатки и работы оборудования. Особенно это относится к опытно-промышленным измерениям на прокатных станах [1, 2]. В работе [5] динамические процессы рассмотрены с информативно-диагностической точки зрения. Рассматриваются варианты компьютерного моделирования задачи взаимодействия клетей через прокатываемую полосу [3]. При кажущейся на первый взгляд общности технологий в разных ШПС (горячая прокатка, толстая (черновые клетки) и тонкая (чистовые клетки) полоса, сравнимый диапазон скоростей прокатки) и кинематических схем главных линий (клетки кварто, редукторный (безредукторный) привод через шестеренную клетку) установлено существенное отличие переходных процессов как в клетях одного стана, так и между станами в целом. Поэтому постановка задачи создания динамического «портрета» или «образа» прокатных станов как в целом, так и его составляющих, т. е. клетей, имеет большое практическое значение для проектантов оборудования и служб эксплуатации.

Целью работы является обобщение данных экспериментальных исследований динамических процессов в клетях стана 1680, выполненных в последние годы, дать описание характера колебательных процессов в оборудовании, привести количественные их характеристики (коэффициент динамичности, частоту и декремент колебаний, время затухания) и установить их связь с параметрами оборудования и технологии.

Потребность в подаче такой информации обусловлена, в частности, следующими двумя факторами. Внедрение на стане новых технологий, несмотря на частичную реконструкцию, привело к заметному росту в клетях статических и динамических нагрузок, действующих в период захвата полосы валками. Это в целом отрицательно повлияло на стойкость механического оборудования. В связи с этим появилась необходимость определить фактические нагрузки в клетях и параметры переходных процессов, прежде всего в крутильной системе линии главного привода. Необходимо было, выяснить в каких динамических режимах работает оборудование всех клетей, и дать им сравнительную оценку. Наличие такого материала по широкополосным станам позволяет разработать концепцию поиска наиболее эффективных путей снижения ударных нагрузок и на ее основании предложить конкретные технические решения.

Изложение материала. Собственно прокатный стан 1680 состоит из 15 последовательно расположенных клетей: две клетки дуо (черновой и чистовой окалиноломатели), 10 клетей кварто (№ 1–10) и три клетки-эджеры для обжатия полосы по ширине. Отличительной чертой стана является то, что все горизонтальные клетки содержат редукторный привод, при этом в черновой клетке дуо два редуктора. Изначально главный привод черновых клетей составляли двигатели переменного тока (синхронные), чистовых клетей – двигатели постоянного тока. В последнее десятилетие на стане проведена существенная реконструкция главных линий клетей. В клетях № 1 и № 2 устаревшие двигатели переменного тока заменены новыми (также синхронными). В черновых клетях дуо, № 3 и № 4 установлены двигатели постоянного тока. Двигатели чистовых клетей заменены двигателями переменного тока с частотным регулированием.

На стане 95 % слябов прокатывается транзитом. Освоена прокатка полос толщиной 1,5 мм. В 2001 г. в парах клетей дуо – № 1, № 2–№ 3 и № 3–№ 4 внедрена непрерывная прокатка транзитом слябов удвоенной длины (массы) по схеме «слиток-рулон» «Транзит-2». В результате черновой группы стана 1680, не рассчитанной изначально на такую технологию, стали присущи две нетрадиционные особенности. Во-первых, сочетание пар клетей непрерывной прокатки с разными приводами: дуо и № 1 соответственно постоянного и переменного тока с нерегулируемой частотой вращения; клетки № 2 и № 3 переменного и постоянного тока, клетки № 3 и № 4 постоянного тока. Во-вторых, взаимодействие клетей дуо и 1 осуществляется через толстую полосу (~140 мм) при длине межклетевого промежутка 6,25 м, в то время как толщина полосы между клетями № 2 и № 3, № 3 и № 4 составляет 40–55 мм при достаточно большом межклетевом расстоянии (19 и 25 м). В настоящее время на стане ведется прокатка слябов толщиной 150–168 мм шириной 980–1500 мм на полосу толщиной до 1,5 мм.

Измерения моментов выполнены по единой методике с использованием бесконтактной системы передачи сигнала с вращающегося вала, разработанной в ИЧМ. Моменты сил упругости измеряли на промежуточных валах клетей дуо № 10. Наряду с моментами измеряли вибрацию корпуса прокатной и шестеренной клетей и редуктора в различных точках.

Одним из основных параметров, которым характеризуют перегрузки по моменту, усилию прокатки, току или мощности во время переходных процессов, возникающих в оборудовании клетей при захвате металла валками, является коэффициент динамичности – отношение максимальной пиковой нагрузки к нагрузке в установившемся режиме прокатки. Этот параметр чаще всего употребляется применительно к моменту сил упругости в линии главного привода:  $K = M_{\max} / M_{\text{ст}}$ . Его исследованию и определению уделяется наибольшее внимание. Если известны закономерности изменения коэффициента динамичности, то определив момент, развиваемый электродвигателем в установившемся режиме прокатки  $M_{\text{ст}}$ , легко вычислить максимальный момент сил упругости  $M_{\max} = K \cdot M_{\text{ст}}$ . Другими параметрами являются частота, период и декремент колебаний. Измерения выполняли по несколько часов в течение 2–3-х суток таким образом, чтобы охватить основной прокатываемый сортамент.

Черновые клетки. Захват металла валками в клетях дуо и № 1 (рис. 1) сопровождается существенными колебаниями момента сил упругости. В клетки дуо наибольшие коэффициенты динамичности отмечены на валу двигателя:  $K_{\max}=5,1$ ,  $K_{\text{ср}}=4,0$ . Несколько меньшие значения  $K$  на промежуточном валу:  $K_{\max}=3,1$ ,  $K_{\text{ср}}=2,3$ . Частота колебаний момента на обох участках составляет в среднем 15 Гц. На валу двигателя клетки дуо после первого пика момент сил упругости падает до нуля. Это указывает на разрыв связи и наличие углового зазора, по крайней мере, между зубьями шестерни и колеса редуктора, ближнего к двигателю. После замыкания зазора возникает второй пик момента, по величине близкий к первому. В клетки № 1 максимальное значение  $K_{\max}=4,5$ , среднее  $K_{\text{ср}}=3,8$ . Частота колебаний момента 16 Гц.

При непрерывной прокатке, когда происходит захват металла валками клетки № 1, возмущающее воздействие через полосу передается клетки дуо и ее линии привода. Отличительной особенностью является то, что на промежуточном валу клетки дуо систематически появляется явно выраженный одиночный пик момента сил упругости, за которым следуют колебания. Коэффициент динамичности здесь равен  $K_{\max}=2,1$ ,  $K_{\text{ср}}=1,7$ . На валу двигателя появляются два подобных пика, между которыми момент кратковременно уменьшается до нуля. Снова происходит потеря силового контакта между зубьями шестерни и колеса первого редуктора, в то время как промежуточный вал между редукторами остается нагруженным. Второй пик момента в большинстве случаев соизмерим с первым или превышает его. Здесь коэффициент динамичности равен  $K_{\max}=3,0$   $K_{\text{ср}}=2,4$ . Эти значения  $K$  меньше, чем при захвате металла клетью дуо, однако значительные. Это означает, что возмущение, обусловленное захватом полосы клетью № 1, имеет один порядок с возмущением при захвате полосы клетью дуо. В этом смысле взаимодействие через полосу клетей дуо и № 1 весьма существенное.

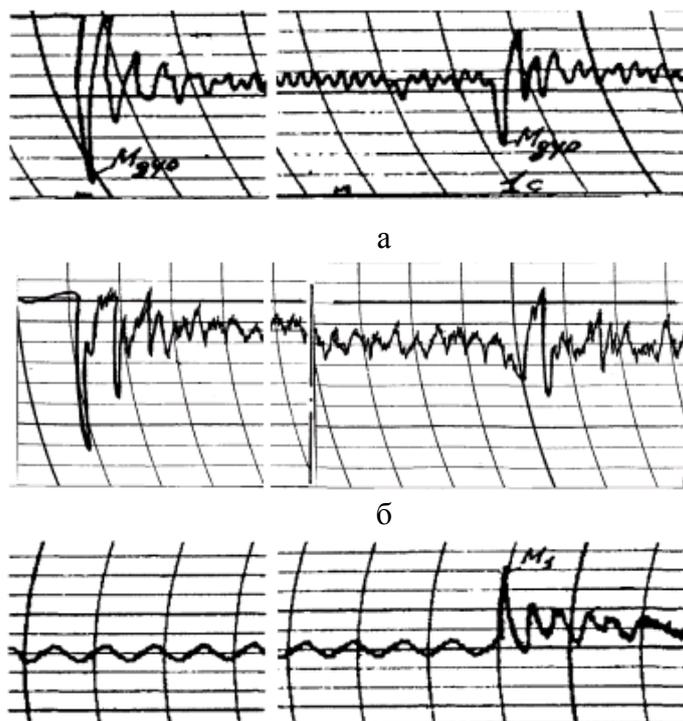


Рис. 1. Реакция линии привода клетки дуо на захват сляба валками клетки № 1:  
 а – момент сил упругости на промежуточном валу между редукторами; б – на валу двигателя клетки дуо; в – момент на валу двигателя клетки № 1

Результаты измерений, а также моделирования позволяют следующим образом представить физическую картину динамики взаимодействия клетей. В процессе заполнения очага деформации в клетях № 1 увеличение момента сопротивления на рабочих валках приводит к упругому закручиванию валопровода. Как следствие, частота вращения валков несколько уменьшается, вместе с этим уменьшается скорость входа металла в очаг деформации, в то время как скорость выхода металла из клетки дуо остается некоторое время постоянной. Кратковременное рассогласование скоростного режима двух клетей приводит к росту усилия сжатия (подпора) в полосе. Так как полоса в продольном направлении обладает большой жесткостью, подпор практически мгновенно действует на валки клетки дуо как дополнительное сопротивление к имеющемуся статическому моменту сопротивления. В результате в линии привода клетки дуо возникает одиночный пик (импульс) момента сил упругости с последующими колебаниями.

Одновременные колебания с равной частотой моментов сил упругости в клетях дуо и № 1 свидетельствуют о том, что с такой же частотой колеблется и продольное усилие в полосе. После завершения переходного процесса режим прокатки в обеих клетях стабилизируется, соотношение скоростей в клетях самоустанавливается на уровне, соответствующем межклетьевому натяжению или подпору (при отсутствии корректирующих сигналов системы регулирования).

Следует отметить, что подобные пиковые всплески тока двигателя клетки дуо не проявляются, поэтому кривые тока в этот период, как и при захвате полосы, не отражают действительный процесс в механической части линии привода.

В период захвата сляба клетью дуо максимальная величина относительной динамической составляющей  $\delta M = \Delta M / M_{ст} = K - 1$ , где  $K$  коэффициент динамичности, на промежуточном и моторном валах равна  $\delta M_{в} = K_{в_{max}} - 1 = 2,1$  и  $\delta M_{д_{max}} = 4,1$ . В период захвата сляба клетью № 1 их значения равны:  $\delta M_{в} = 1,1$  и  $\delta M_{д} = 2,0$ . Как видим, зазоры в шпиндельном сочленении приводят к двукратному увеличению динамической составляющей момента на обоих участках.

В клетях дуо и № зафиксированы случаи срывов и буксования валков при захвате слябов (рис. 2). Субъективно это выражается в появлении серии ударов в шпиндельном сочленении и коренной муфте. В результате удара сляба о валки на моторном валу возникают пики момента, соизмеримые с пиком при захвате.

Крутильный удар в линии главного привода вызывает удары в зубчатом зацеплении шестеренной клетки и редуктора, что отражается на вибрации их корпуса. Коэффициент динамичности в таких случаях составляет 3,5 при явно слышимых ударах в главной линии от неоднократно раскрывающихся зазоров. Причины этого состоят в сочетании больших обжатий, которые находятся на пределе допустимых углов захвата, и повышенных угловых зазоров в сочленении валков со шпинделями из-за износа бронзовых вкладышей (измерения проводили перед их заменой по регламенту).

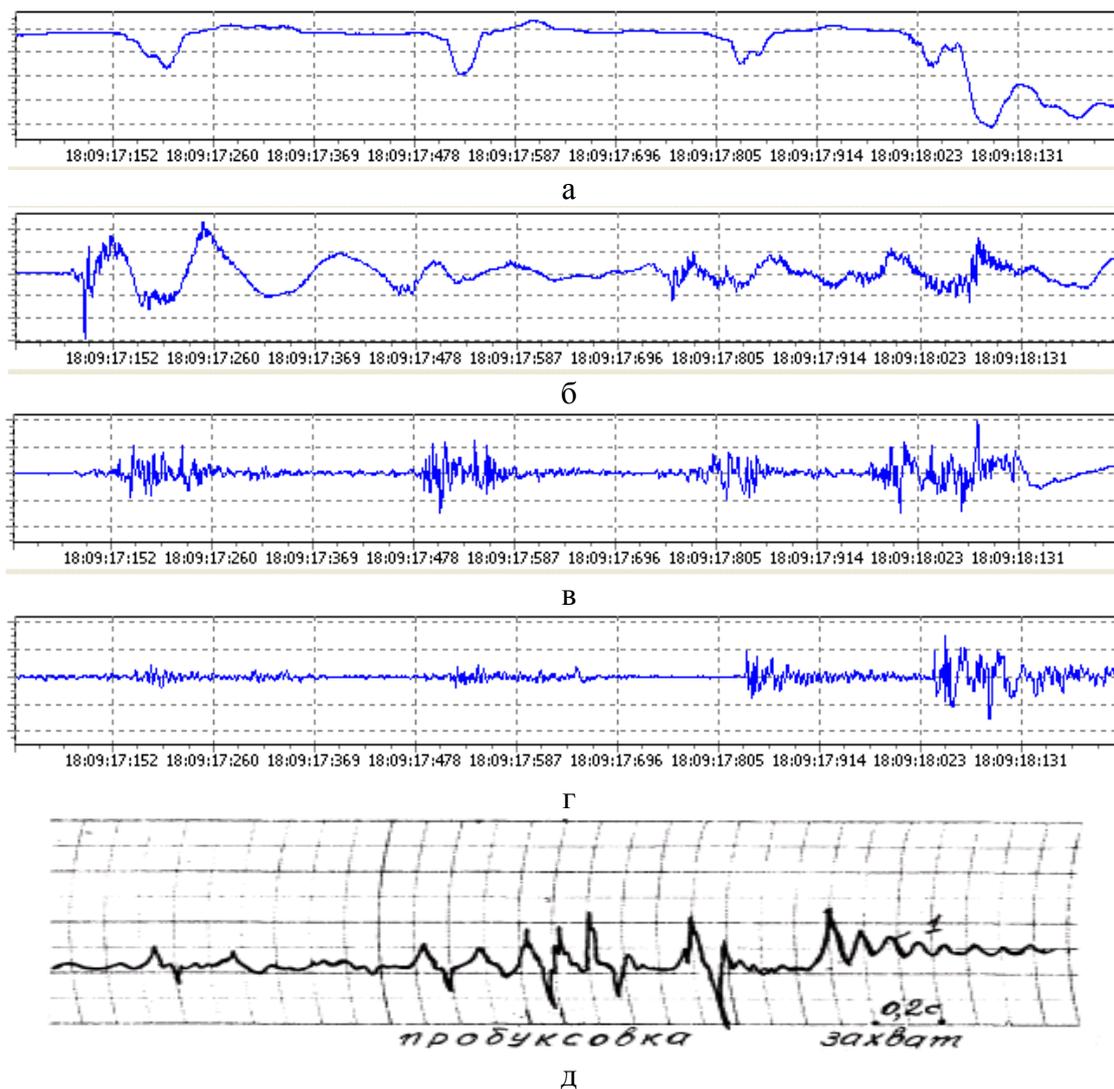


Рис. 2. Срывы колебаний момента сил упругости при незахвате сляба в клетях дуо и № 1:  
а – момент сил упругости на промежуточном валу клетки дуо; б, в, г – соответственно вибрация клетки дуо и корпуса второго редуктора на входе и выходе; д – момент сил упругости на промежуточном валу клетки № 1

Несмотря на большое расстояние между клетями № 2 и № 3, № 3 и № 4 (19 и 25 м) и сравнительно тонкую полосу между ними захват полосы в клетях № 3 и клетях № 4 вызывает колебания момента сил упругости на моторном валу клетки № 2 и клетки № 3 соответственно. В клетях № 2 динамическая составляющая момента в этот период увеличивается на 50–70 %, в клетях № 3 – на 100–120 % (рис. 3). Особенностью взаимодействия клетки № 3 с клетью № 4 является то, что амплитуда колебаний момента в клетях № 3 соизмерима с величиной

статической нагрузки. Увеличение зазоров в линии привода клетки № 4 может привести к усилению взаимодействия клеток № 3 и № 4 через полосу, и к нежелательному кратковременному раскрытию зазоров и ударам под нагрузкой в зубчатом зацеплении редуктора клетки № 3 при захвате полосы валками клетки № 4.

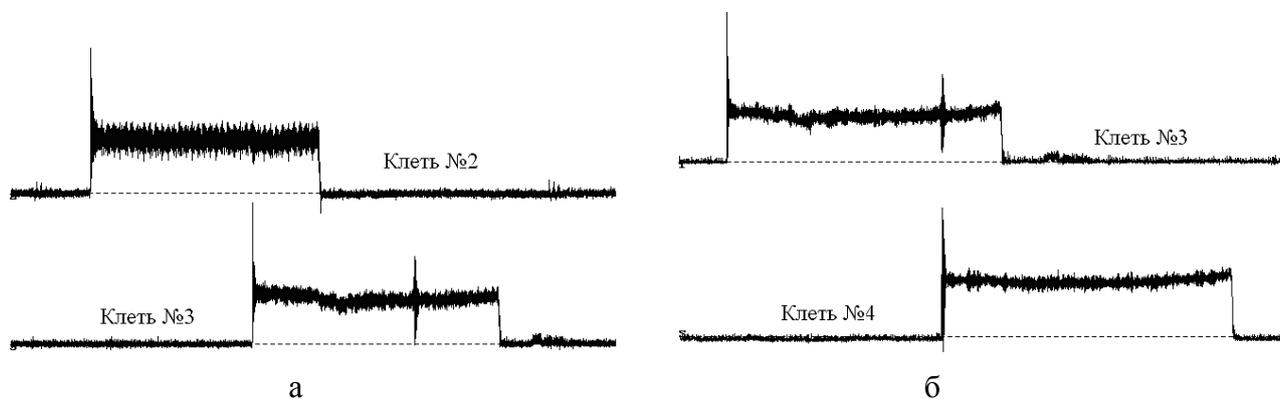


Рис. 3. Основные взаимодействия клеток:

а – главных линий клеток № 2–3; б – № 3–4 при непрерывной прокатке.

Чистовые клетки. Измерения во время переходного (захват и выброс полосы валками) и установившегося процесса прокатки выполнены на промежуточных валах чистовых клеток № 5–№ 10 (рис. 4).

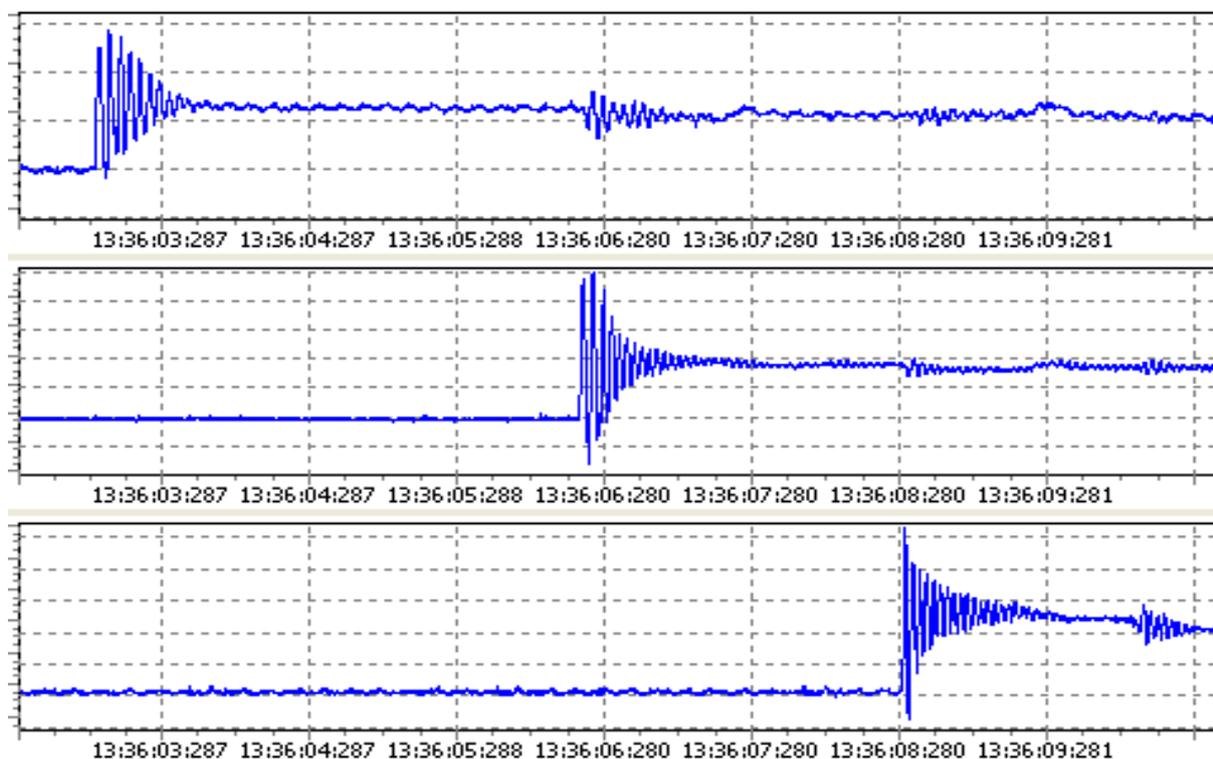


Рис.4. Взаимодействие главных линий чистовых клеток № 5, № 6 и № 7.

Наибольшие значения коэффициента динамичности зафиксированы в клетях № 6, № 7, № 10, несколько меньшие в клетях № 5, № 8, № 9. В клетях № 5, № 6 и № 7 получены осциллограммы момента сил упругости, когда после первого пика колебаний момент падает до нуля, промежуточный вал кратковременно разгружается и в ряде случаев закручивается в обратную сторону. Такое поведение кривой момента свидетельствует, как и в клетях дуо, № 3, № 4, о наличии зазоров на участке двигатель-редуктор.

Переходные процессы в клетях № 5, № 8 и № 10 длятся примерно 0,1 с, в то время как в клетях № 6, № 7 и № 9 длительность колебаний в 3–4 раза больше.

В тех случаях, когда не отрезалась передняя кромка полосы, происходит заметное уменьшение коэффициента динамичности. Средняя величина относительной динамической составляющей момента ( $\delta M = K-1$ ) уменьшалась на 20 %–40 %.

Полученные результаты показывают, что целенаправленное формирование фигурной кромки позволяет существенно уменьшить уровень максимальных динамических нагрузок.

Результаты совместных измерений момента сил упругости в линии главного привода и вибраций корпуса шестеренной клетки и редуктора свидетельствуют о том, что первичной и основной причиной возбуждения вибродинамических процессов является, безусловно, ударный характер нагружения клетки при захвате металла валками. Распространение фронта крутильной нагрузки от валков к электродвигателю и возникающие при этом крутильные колебания можно рассматривать как вторичный возмущающий фактор, вызывающий через зубчатые зацепления колебания корпусных деталей, что хорошо прослеживается по данным рис. 5.

Уровень колебаний момента сил упругости, вибраций корпуса шестеренной клетки и редуктора, колебаний валковых опор существенно зависит от технического состояния оборудования, прежде всего от износа элементов сочленений валок-шпиндель, опоры валковой стойки станин, что ведет к увеличению угловых и линейных зазоров. Установлено, чем больше износ (зазор), тем больше амплитуда колебаний момента и вибраций корпуса. Поэтому уровень вибраций корпусных деталей зубчатых передач при захвате металла валками является весьма сильным информативным параметром, связанным с состоянием износа сочленений. Отмеченные факты позволяют вести построение диагностического алгоритма на основе использования данных о вибрациях и перемещениях, измерение которых осуществляется значительно проще, чем крутящего момента.

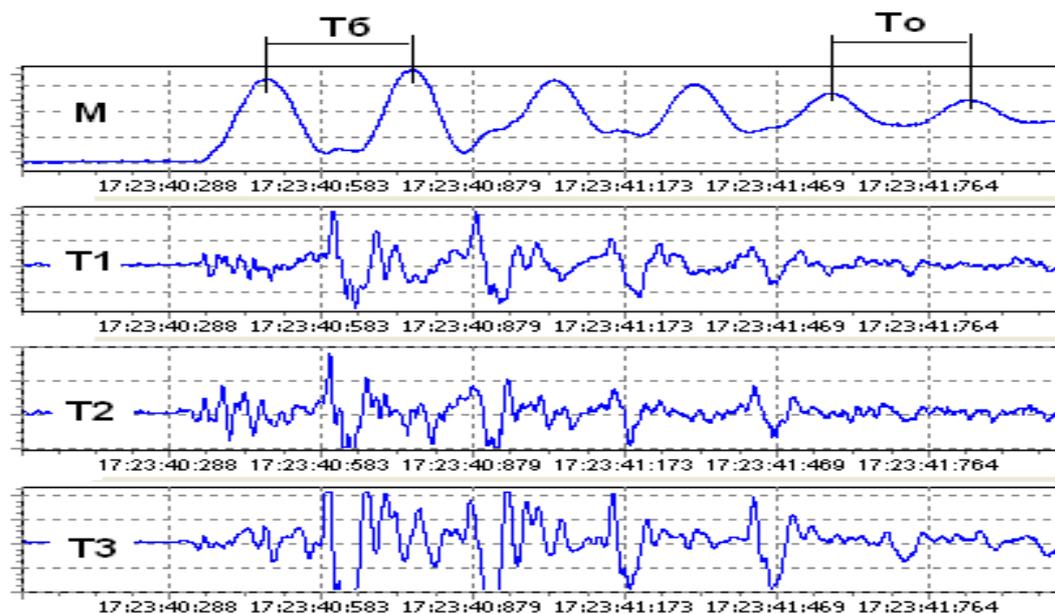


Рис. 5. Момент сил упругости на промежуточном валу (M), вибрация корпуса редуктора на входе (T1, T2) и на выходе (T3) клетки № 5 при захвате полосы.

## ВЫВОДЫ

Знание характера переходных процессов и фактического распределения коэффициента динамичности по всем клетям непрерывного стана позволяет решать следующие задачи:

– Установить клетки, главные линии которых в динамическом отношении наиболее чувствительны к ударному воздействию внешней нагрузки. По разбросу максимальных и средних значений коэффициента динамичности при прокатке разного сортамента и в разные периоды времени определить степень влияния износа (зазоров) в сочленениях главной линии той или иной клетки на динамические нагрузки.

– Более рационально распределить обжатия по клетям и за счет этого уменьшить динамические нагрузки в период захвата металла валками в наиболее динамичных клетях и в клетях, в которых имеет место наибольший износ сочленений (угловые зазоры).

– Определив по току или мощности главного привода нагрузку в установившемся режиме прокатки  $M_{ст}$  легко оценить уровень фактического максимального пикового момента, как произведение  $M_{мах} = K \cdot M_{ст}$ , на участке двигатель-редуктор для прокатываемого сортамента и учесть полученные данные в расчетах на долговечность оборудования.

По уровню коэффициента динамичности, частотным свойствам и виду переходного процесса достоверно идентифицировать динамическую модель линии главного привода с целью повышения достоверности расчетов.

На основании установленных особенностей вибродинамических процессов в переходных режимах выявлены сильные информативные признаки и разработан ряд способов диагностирования технического состояния (износа) оборудования главных линий клетей и проверена их работоспособность во время опытно-промышленных измерений [5].

Создание на основании данных натуральных исследований вибродинамического «портрета» непрерывного широкополосного стана в целом и конкретного «образа» каждой клетки. В единстве с технологическим процессом и конструктивными параметрами позволяет получить весьма ценную и достаточно объективную информацию о динамике и работе стана и его клетей, о техническом состоянии оборудования и на основании полученных данных объективно решать задачи по совершенствованию технологии, эксплуатации и обслуживанию стана, а также ставить новые исследовательские задачи.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков В. И. Развитие промышленных исследований динамических процессов в прокатных станах / В. И. Большаков, В. В. Веренев, А. М. Юнаков // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (32) – С. 237–241.*
2. *Веренев В. В. Динамика взаимодействия черновых клетей через прокатываемую полосу / В. В. Веренев, А. Ю. Путники, С. В. Мацко // Литье и металлургия, 2005. – № 2 (34). – С. 81–86.*
3. *. Моделирование взаимодействия черновых клетей стана 1680 через прокатываемую полосу. / А. Ю. Путники, В. В. Веренев, Н. И. Подобедов, О. М. Клевцов // Защита металлургических машин от поломок. ПГТУ. – Мариуполь, 2003. – № 7. – С. 17–21.*
4. *Большаков В. И. Особенности работы оборудования при непрерывной прокатке полосы в черновой группе. / В. И. Большаков, В. П. Поздняков // Защита металлургических машин от поломок. ПГТУ. – Мариуполь, 2002. – № 6. – С. 28–38.*
5. *Диагностика и динамика оборудования прокатных станков / В. В. Веренев, В. И. Большаков, А. Ю. Путники [и др.] // ИМА-пресс. Днепрпетровск, 2007. – 144 с.*

#### REFERENCES

1. *Bol'shakov V. I. Razvitie promyshlennyh issledovaniy dinamicheskikh processov v prokatnyh stana-h / V. I. Bol'shakov, V. V. Verenev, A. M. Junakov // Obrabotka metallov davlenim : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 4 (32) – S. 237–241.*
2. *Verenev V. V. Dinamika vzaimodejstvija chernovyh kletej cherez prokatyvaemuju polosu / V. V. Verenev, A. Ju. Putniki, S. V. Macko // Lit'e i metallurgija, 2005. – № 2 (34). – S. 81–86.*
3. *. Modelirovanie vzaimodejstvija chernovyh kletej stana 1680 cherez prokatyvaemuju polosu. / A. Ju. Putniki, V. V. Verenev, N. I. Podobedov, O. M. Klevcov // Zashhita metallurgicheskikh mashin ot polomok. PGTU. – Mariupol', 2003. – № 7. – S. 17–21.*
4. *Bol'shakov V. I. Osobennosti raboty oborudovaniya pri nepreryvnoj prokatke polosity v chernovoj grupe. / V. I. Bol'shakov, V. P. Pozdnjakov // Zashhita metallurgicheskikh mashin ot polomok. PGTU. – Mariupol', 2002. – № 6. – S. 28–38.*
5. *Diagnostika i dinamika oborudovaniya prokatnyh stanov / V. V. Verenev, V. I. Bol'shakov, A. Ju. Putniki [i dr.] // IMA-press. Dnepropetrovsk, 2007. – 144 s.*

Путники А.Ю. – канд.техн.наук, докторант ЗНТУ

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: [al.putniki@gmail.com](mailto:al.putniki@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 26.02.2014 г.