

## ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОКАТНЫХ СТАНАХ

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Приведен анализ информативности параметров переходных процессов в оборудовании прокатных клетей в части технологии прокатки, режимов работы и конструктивных параметров главных линий, а также диагностики состояния оборудования. Показано, что на основании данных измерений и их статистической обработки решаются задачи совершенствования режимов прокатки и работы оборудования, выбора рациональных конструктивных параметров главных линий, идентификации динамических моделей и разработки новых способов оценки стабильности технологии и диагностирования технического состояния оборудования.

**Ключевые слова:** прокатный стан, переходные процессы, технология прокатки, динамические и статические нагрузки, математические модели, идентификация, диагностирование.

В Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины накоплен значительный опыт экспериментальных и теоретических исследований динамических процессов в прокатных станах различного типа – от обжимных до проволочных. Существенный вклад в основание базы знаний о процессах за истекшие годы внесли член-корр. АН Украины С.Н.Кожевников, д.т.н. А.В.Праздников, академик НАН Украины В.И.Большаков, к.т.н. П.Я.Скичко, к.т.н. Е.Я.Подковырин, д.т.н. И.И.Леєпа, н.с. А.М.Юнаков. Результаты исследований изложены в монографиях [1–4] и многочисленных публикациях.

В постсоветское время выполнена серия исследований преимущественно на широкополосных станах горячей прокатки. Им присущи характерные процессы, во многом проявляющиеся в других станах. Большинство измерений выполнено с применением цифровой записи сигналов, что позволило получить большие массивы информации и ряд новых результатов.

**Цель данной работы** состоит в том, чтобы на основании обобщенного анализа динамических процессов, формирующихся, прежде всего, при захвате полосы валками, рассмотреть их с позиций информативности. Вид, характер и уровень колебательных процессов в линии главного привода и клетки зависит от многих факторов, которые можно объединить в три группы. К ним относятся технологические параметры (температура полосы, обжатия и др.), техническое состояние оборудования, в частности износ и зазоры в сочленениях, и конструктивные параметры, определяющие частотные характеристики динамических систем линии привода и клетки.

Возникает естественный вопрос – в чем состоит информативность параметров переходных процессов в реальном оборудовании с учетом отмеченных факторов, о каких зависимостях и взаимосвязях они могут сообщить, какие и в чем можно получить новые результаты. В работе выполнен системный анализ информативности процессов с различных позиций полезности и практического применения. К наиболее часто измеряемым относятся момент сил упругости в линии главного привода, момент и частота вращения электродвигателя, усилие прокатки и частота вращения электродвигателя, усилие прокатки и деформация стоек станины, вибрация корпусного оборудования (рис. 1).



Рис.1. Изменяемые динамические и технологические параметры в клетке широкополосного стана.

1. Одна из главных задач измерений момента сил упругости на первых этапах исследований состояла в определении максимальных динамических нагрузок на шпинделях и моторном валу (рис. 2) линии привода валков. На основании статистической обработки результатов измерений решались задачи определения наиболее нагруженных участков линии и причин поломок оборудования, расчеты на прочность и выносливость. Подход к систематизации и упорядочиванию динамических нагрузок для подобных расчетов применительно к прокатным станам изложен в работе [5].

2. Накопление и обработка больших массивов измерений в клетях широкополосных станов, выполненных в последние годы, дали возможность установить статистическую связь максимальных динамических нагрузок  $M_0$  и момента в установившемся режиме прокатки (рис. 3). Получаемые корреляционные поля  $M_0$ ,  $M_{cm}$  для каждой клетки поддаются аппроксимации  $M_0(M_{cm})$ . Распушенность поля зависит от разброса действующих возмущений. Эмпирическая связь динамики  $M_0$  с  $M_{cm}$  (фактически с технологией прокатки) позволяет решать следующие практические

задачи по условию ограничения уровня динамических нагрузок. Рационально распределять обжатия по клетям непрерывного стана. При внедрении энергосберегающих технологий и прокатке новых сортразмеров определять ожидаемое увеличение динамической нагрузки без трудоемких измерений момента сил упругости. Используя при прокатке каждой полосы среднее значение момента  $M_{ст}$ , которое на большинстве станов измеряется, формировать спектр динамических нагрузок, действующих в течение определенного промежутка времени [5].

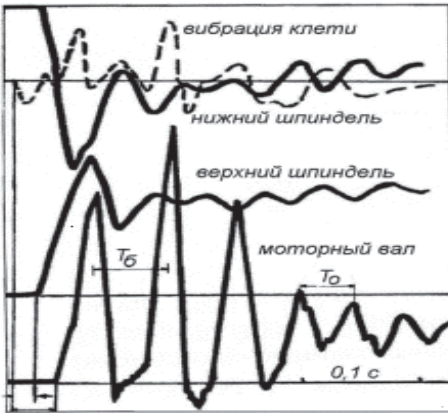


Рис.2. Переходный процесс на промежуточном валу и шпинделях при захвате полосы валками. Клеть 3, стан 1700.

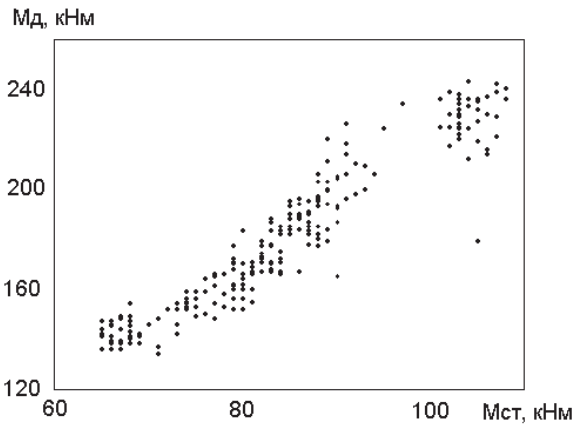


Рис.3. Корреляционное поле измеренных значений максимальной динамической  $M_d$  и статической  $M_{ст}$  нагрузки на промежуточном валу между двигатель-редуктор. Клеть 5, стан 1680.

3. Расчет переходных процессов и нагрузок в главных линиях прокатных клетей ведут на основе динамических моделей с применением многомассовых рядных и разветвленных эквивалентных расчетных схем [1]. Идентификация моделей ведется с учетом результатов измерений –

фактических значений амплитуд, периода, частоты и декремента (или длительности) колебаний, а также вида процесса [6].

Путем сравнения расчетных значений параметров процессов с фактическими, анализа частотных характеристик упругих систем и вида колебаний решен ряд важных вопросов. Например, влияние зазоров на динамические нагрузки в линии привода [7], объяснены особенности изменения технологической нагрузки на валках при заполнении очага деформации металлом и её проявление на динамику [8] и распределения момента сил упругости между верхним и нижним шпинделем [9].

4. Измерения динамических нагрузок на станах с учетом технологического процесса и режимов прокатки, параметров оборудования и режимов его работы позволяют рационально вести процесс и использовать оборудование. В 1960-х годах на ряде обжимных станов обосновано уменьшение количества проходов при увеличении производительности [10], решался вопрос о согласовании скоростей вращения вертикальных и горизонтальных валков слябинга [11], впервые установлено влияние формы передней кромки полосы на динамические нагрузки [12], а также обжатий и жесткости клетки на функцию момента на валках в период захвата полосы [13,14]. На непрерывных широкополосных станах холодной прокатки определены диапазоны скоростей, когда в линиях главного привода 2-3-х клеток формируются резонансные колебания момента сил упругости. Предложены мероприятия по их устранению [14].

5. Связь динамических процессов с технологией прокатки особенно явно проявилась в непрерывных подгруппах черновых клеток станов 2000 (г. Череповец) и 1680 (г. Запорожье). При захвате толстой полосы валками следующей клетки в линии привода предыдущей формируется ударный импульс момента сил упругости, соизмеримый при захвате полосы в этой клетки [15]. С целью снижения уровня взаимодействия клеток предложено выдерживать перед прокаткой рациональное соотношение скоростей валков смежных клеток.

6. Известно, что взаимодействие чистовых клеток через полосу в процессе заполнения непрерывной группы и выхода из неё полосы приводит к изменению межклетевых натяжений и, как следствие, к продольной разнотолщинности концевых участков полосы. Одновременные измерения момента сил упругости в чистовых клетях широкополосных станов дали основание разработать и идентифицировать модель динамического взаимодействия клеток через полосу с учетом времени транспортного запаздывания [16]. Изучен характер изменения межклетевых натяжений в процессе входа полосы в 6-клетевую группу и выхода из неё, прямые измерения которых на станах горячей прокатки не ведется. Определены скоростные режимы клеток, когда в полосе между клетями формируются динамические нагрузки или возможно проявление кратковременного петлеобразования. Установлены особенности влияния на динамику межклетевых натяжений и продольную разнотолщинность готовой полосы вариации

температуры и толщины подката. Использование модели на действующих станах позволяет повысить точность расчета деформационно-скоростного режима в непрерывных группах клетей, корректировать параметры режима с учетом фактических отклонений температуры и толщины подката от их номинальных значений.

7. На действующих непрерывных станах практически отсутствуют возможности целенаправленного варьирования параметрами – температурой, толщиной, шириной, обжатием полосы и др. при прокатке партий полос. Идентифицированные модели переходных процессов в упругой системе клетки и линии привода позволяют решать эту задачу и исследовать влияние отклонений в широком диапазоне технологических параметров (отдельно и в сочетании) на динамические нагрузки и коэффициент динамичности [17].

8. Измерения момента сил упругости в главных линиях клетей дают достаточно надежную информацию, чтобы оценить насколько зависят формирующиеся нагрузки от конструктивных параметров линий. Наличие биений момента свидетельствует о близости двух низших  $\beta_1$  и  $\beta_2$  собственных частот линии привода [1,2], которые зависят от упруго-массовых (т.е. в итоге конструктивных) параметров. Чем меньше отношение  $\beta_2/\beta_1$ , тем больше коэффициент динамичности на моторном участке [18]. На основании эмпирической зависимости коэффициента динамичности от отношения частот  $\beta_2/\beta_1$  разработана методика определения рациональных конструктивных параметров главных линий клетей с редукторным приводом [19].

9. При одновременных измерениях момента сил упругости в главной линии и вибрации прокатной и шестеренной клетей и редуктора их информативность существенно повышается. При этом удается установить связи переходных процессов в данных узлах, как упругих системах [20]. Характер и вид вибрации на низшей частотной составляющей совпадает с изменением момента, рис. 4.

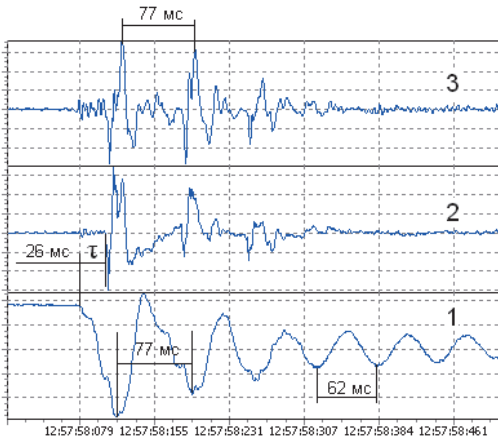


Рис. 4. Момент сил упругости на промежуточном валу (1) и виброскорость (2,3) подшипниковых опор вал-шестерни редуктора.

Здесь снова отметим, что по результатам одновременных измерений разработана и идентифицирована математическая модель линии главного привода, в состав которой включена модель упругой системы редуктора.

10. Переходные процессы и их характеристики относятся к стохастическим. Случайную природу имеет разброс технологических параметров – температуры, толщины полосы и др., от которых зависит момент  $M_{cm}$  в квазиустановившемся режиме прокатки. С учетом массивов измерений разработана и идентифицирована статистическая модель переходных процессов в линии привода. Это позволило более полно исследовать формирование корреляционных полей  $M_{\theta}$ ,  $M_{cm}$  при прокатке полос различного сортамента с учетом изменения технического состояния оборудования [21]. На рис. 5 расчет полей  $M_{\theta}$ ,  $M_{cm}$  выполнен при постоянном среднеквадратическом отклонении  $\sigma_T$  температуры полосы и переменном (увеличивающемся) значении углового зазора  $\delta_{ш}$  в шпindelном сочленении и его разброса  $\sigma_{\delta}$ . Наименьшим значениям  $\delta_{ш}$  и  $\sigma_{\delta}$  соответствует нижнее поле (с начала установки шпинделей), верхнее поле – при наибольших значениях  $\delta_{ш}$  и  $\sigma_{\delta}$  (перед заменой шпинделей). Износ и зазоры в шпindelном сочленении увеличиваются равномерно. Их можно периодически определять на основании диагностических измерений [22] и с учетом этого рассчитывать с определенным шагом для каждой клетки корреляционные поля и их аппроксимации для уточнения или корректировки режима обжатий по динамическому критерию. Другой важный момент состоит в возможности формирования больших массивов расчетных максимальных значений динамического момента с привязкой к сортаменту в течение длительного времени работы стана и использовать их для определения остаточного ресурса элементов оборудования.

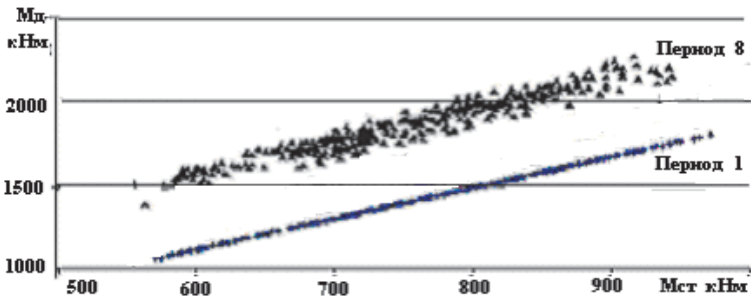


Рис. 5. Расчетные корреляционные поля  $M_{\theta}$ ,  $M_{cm}$  при наилучшем (после ремонта) и наихудшем (перед ремонтом) техническом состоянии бронзовых вкладышей. Клеть 5, стан 1680.

11. На основании статистической обработки массивов данных измерений момента сил упругости в переходном и установившемся режимах разработан метод оценки состояния оборудования линии привода и стабильности про-

цесса прокатки [21]. Он основан на сравнении коэффициента вариации  $v_{ст.}$  момента в установившемся режиме прокатки с коэффициентом вариации  $v_d$  максимального динамического момента при захвате полосы валками, рассчитанных для партий полос одного или близких сортомеров. Сравняется также значение  $v_d$  с коэффициентом вариации  $v_k$  коэффициента динамичности в этих партиях.

На сравнении коэффициентов вариации, рассчитанных для трех участков реализации момента  $M_d(t)$ , основан способ оценки стабильности процесса прокатки каждой полосы. Способ применили для оценки эффективности прокатки полос на стане 1680 с промежуточным перемоточным устройством [23].

12. На начальном этапе исследований результаты измерений переходных процессов использовались в неявном виде в диагностических целях. Например, определялась расчетная зависимость коэффициента динамичности  $K$  момента сил упругости от углового зазора в шпиндельном сочленении. Путем сравнения фактического значения  $K_\phi$  с расчетным  $K_p$  по графику  $K_p(\delta_{ш})$  определялась величина зазора, при котором достигалось равенство  $K_\phi = K_p$ . Одновременно это составляло один из этапов идентификации математической модели [6].

13. В последние 20 лет в Институте разрабатываются методы и способы диагностирования состояния оборудования на основе использования информативности переходных процессов и их параметров. В работах [22,24] дано теоретическое и опытно-промышленное обоснование новых способов. Здесь же дадим обобщающие положения.

Основное внимание уделяется определению износа элементов в сочленениях линии привода, из-за которого образуются зазоры на шпиндельном и моторном участках. В качестве информативного параметра рекомендуется одновременное измерение вибрации оборудования в нескольких точках вдоль линии в период захвата полосы валками (рис.3).

Износ и зазоры в шпиндельном сочленении определяются по времени запаздывания  $\tau_i$  реакции участков линии. На моторном участке они определяются по виду вибрации и периоду  $T_o$  между первыми пиками, колебаний и следующими  $T_1$ , когда зазоры не размыкаются. Результаты определения  $\tau_i$ ,  $T_o$  и  $T_1$  сравниваются с соответствующими расчетными зависимостями. Путем периодических измерений устанавливают тенденцию изменения технического состояния линии в целом и ее участков.

Развитие известных и поиск новых способов диагностирования рекомендуется вести с учетом особенностей технологического процесса (непрерывная, реверсивная прокатка, холостой режим, разгон стана, пропуск сварного шва и др.); конструкции и частотных свойств упругих систем (зубчатые, универсальные шпиндели, привод на верхний или нижний шестеренный валок, близость собственных частот и др.); взаимосвязи переходных процессов в линии привода, упругой системе клетки, валковой системе, редукторе и др.

**Заключение.** Параметры переходных процессов в прокатных станах в период захвата полосы валками, определенные на основании опытно-промышленных измерений с учетом технологии и режимов работы, обладают существенной информативностью. Вид процесса, амплитуда и частота коле-

баний, максимальная динамическая нагрузка, время запаздывания и др. связаны с оборудованием, его состоянием, режимами работы и технологией прокатки. На основании результатов измерений вибродинамических процессов и момента сил упругости решаются актуальные задачи, относящиеся к оборудованию прокатных станов и технологии прокатки.

1. Определение максимальных динамических нагрузок, формирование спектра нагрузок за требуемый период с целью прогнозирования ресурса оборудования. Отметим, что решение второй части задачи возможно при условии проведения длительных измерений.

2. Идентификация детерминированных и статистических математических моделей различной сложности. С помощью таких моделей рассчитываются процессы в недостижимых для измерений узлах и системах. Например, в зубчатых зацеплениях редуктора или межклетевых натяжений. Определяются условия, при которых установлены особенности переходных процессов, рассчитываются необходимые зависимости при существенной вариации технологических и конструктивных параметров (что практически не осуществимо на действующих станах), например, корреляционные поля  $M_d$ ,  $M_{ст}$  и др.

3. Оценка роли конструктивных параметров и частотной характеристики в формировании динамических процессов и нагрузок в линии привода.

4. Определение влияния особенностей технологии и параметров прокатки на вид переходных процессов и уровень динамических нагрузок.

5. Зависимость максимальных нагрузок от технического состояния оборудования, в частности от зазоров.

6. Построение корреляционных полей максимальных динамических нагрузок при захвате полосы валками и нагрузок во время прокатки  $M_d$ ,  $M_{ст}$  при разном состоянии (износе) оборудования.

7. Развитие известных и разработка новых способов вибрационного диагностирования состояния оборудования на основе экспериментальных исследований, моделирования динамических процессов и расчета необходимых диагностических зависимостей.

1. *Кожевников С.Н.* Динамика машин с упругими звеньями / С.Н. Кожевников. – Киев: Изд. АН УССР. – 312 с.
2. *Кожевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах / С.Н. Кожевников. Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.
3. *Праздников А.В.* Гидропривод в металлургии / А.В. Праздников. – М.: Металлургия, 1973. – 336 с.
4. *Переходные процессы* в электрогидромеханических системах металлургических машин / [В.И. Большаков, В.И. Злобинский, Б.А. Харлан и др.]. Дн-ск: УГХТУ, 2002. – 423 с.
5. *Кожевников С.Н.* Динамические нагрузки главных линий прокатных станов и учет этих нагрузок при расчетах на прочность и выносливость / С.Н. Кожевников, В.И. Большаков // Тр. 1 Всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин. – Сб. № 23. – М.: ВНИИМетмаш, 1968. – С. 28–46.



6. *Большаков В.И.* Особенности идентификации динамической модели главного привода листопрокатного стана / В.И. Большаков, В.В. Веренев // Защита металлургических машин от поломок. Вып. 3. Мариуполь: ПГТУ, 1998. – С. 30–34.
7. *Влияние зазоров на динамические нагрузки в главной линии стана 2800* / [В.И. Большаков, С.Н. Кожевников, Ю.Я. Кармазин и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – № 6. – 1967. – С. 162–168.
8. *Большаков В.И.* О математическом описании и некоторых особенностях работы замкнутых механических систем // Динамика металлургических машин. Тр. ИЧМ. – т. XXXI. – М.: Металлургия, 1969. – С. 13–17.
9. *Большаков В.И.* Динамика замкнутой электромеханической системы с нелинейными упругими связями // Динамика машин. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 64–73.
10. *Большаков В.И.* Применение электронной модели для выбора рациональных режимов работы слябинга // Прокатное производство. Тр. ИЧМ. – т. XXII. – М.: Металлургия, 1967. – С. 325–332.
11. *В.И.Большаков.* О согласовании скоростей вращения вертикальных и горизонтальных валков слябинга // "Прокатное производство". Труды ИЧМ, т. XXVIII. М.: Металлургия, 1967. - С. 240-242.
12. *Сафьян М.М.* Влияние формы переднего конца листа на величину динамических нагрузок в линии передачи стана / М.М. Сафьян, В.И. Большаков, Я.Д. Василев // Прокатное производство. Тр. ИЧМ. – т. XXIX. – М.: Металлургия, 1969. – С. 105–110.
13. *Большаков В.И.* Момент, действующий на валки при захвате листов / В.И. Большаков // Сб. "Листопрокатное производство". – Вып. 1. – МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1972. – С. 109–112.
14. *Веренев В.В.* Влияние динамических процессов в оборудовании полосовых станов на качество проката и выход годного / В.В. Веренев, О.Н. Кукушкин, В.Г. Зиновьев // Обзор по системе Информсталь, Ин-т "Черметинформация". М., 1990. Вып 4 (361), с. 33.
15. *Веренев В.В.* Экспериментальное исследование взаимодействия черновых клетей дуо и № 1 стана 1680 при непрерывной прокатке слябов / В.В. Веренев, А.Ю. Путники, О.М. Клевцов // МНП. 2003. – № 2. – С. 51–53.
16. *Моделирование взаимодействия клетей чистой группы широкополосного стана через полосу с учетом податливости линии привода* / В.В. Веренев [и др.] // Сб. ИЧМ Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2010. – Вып. № 21. – С. 308–313.
17. *Веренев В.В.* Влияние технологических параметров на динамические нагрузки в прокатной клетке / В.В. Веренев // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. Краматорск. ДГМА.- 2003. – С. 141–145.
18. *Динамические перегрузки в приводах клетей широкополосных станов* / В.В. Веренев, В.И. Большаков, Ю.Н.Белобров, И.А. Бобух // МГП. – 1999. – № 1. – С. 72–75.
19. *Веренев В.В.* Методика оптимизации конструктивных параметров линии привода прокатной клетки / В.В. Веренев, Ю.Н. Белобров, И.А. Бобух // Обработка металлов давлением. ДГМА. Краматорск. – 2009. – № 2(21). – С.362–365.
20. *Веренев В.В.* Взаимосвязь колебательных процессов в упругих системах прокатной клетки / В.В. Веренев // МГП. 2005. – № 1. – С.100–103.

21. *Повышение информативности* измеряемых параметров на прокатных станах / В.В. Веренев, Н.И. Подобедов, В.В. Коренной, А.П. Даличук // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. тр. ИЧМ. – Вып. 22. – 2010ю. – С. 305–314.
22. *Диагностика и динамика* прокатных станов / В.В. Веренев [и др.] // *Днепропетровск: ИМА–пресс, 2007.* – 144 с.
23. *Эффективность промежуточного* перемоточного устройства "Койлбокс" на стане 1680 / В.В. Веренев, С.В. Мацко, О.В. Симененко, В.А. Яценко // *Тр. Конгресса прокатчиков. 2010. М.: Черметинформация.* – С.137–139.
24. *Динамические процессы* в клетях широкополосного стана 1680 / В.В. Веренев [и др.] // *Днепропетровск: ИМА–пресс, 2011.* – 184 с.

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

### ***В.В.Вереньов***

#### **Інформативність перехідних процесів у прокатних станах**

Наведено аналіз інформативності параметрів перехідних процесів в обладнанні прокатних клітей у частині технології прокатки, режимів роботи й конструктивних параметрів головних ліній, а також діагностики обладнання. Показано, що на підставі даних вимірів і їхньої статистичної обробки вирішуються задачі вдосконалювання режимів прокатки й роботи обладнання, вибору раціональних конструктивних параметрів головних ліній, ідентифікації динамічних моделей і розробки нових способів оцінки стабільності технології й діагностування технічного стану обладнання.

**Ключові слова:** прокатний стан, перехідні процеси, технологія прокатки, динамічні і статичні навантаження, математичні моделі, ідентифікація, діагностування.

### ***V.V.Verenev***

#### **Informative of transient processes in rolling mills**

The analysis of informative parameters of transients in the equipment of the rolling stands in rolling technology, operation and design parameters of the main lines, and diagnostics equipment. It is shown that on the basis of measurement data and statistical processing problems are solved and the improvement of the rolling equipment, rational selection of design parameters the main lines dynamic model identification and development of new methods and technology evaluating the stability of diagnosing technical equipment status.

**Keywords:** rolling mill, transients, rolling technology, dynamic and static load, mathematical models, identification, diagnosis.