

УДК 621.771.06:669.721

Скрипаленко М. Н.
Ашихмин Д. А.
Скрипаленко М. М.
Жигулев Г. П.
Богданов С. Н.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЛАВНОЙ ЛИНИИ ПРОКАТНОГО СТАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОКАТА

Колебания, возникающие в прокатных агрегатах, учитывая возрастающие требования к качеству продукции, производительности и надежности оборудования, а также энерго- и ресурсосбережение, представляют собой серьезную проблему.

Считают [1], что идею «бездефектного производства» можно реализовать на основе комплексного подхода, сочетающего применение систем сквозного технологического контроля, систем автоматического управления и диагностирования прокатного оборудования. Применение систем вибродиагностики позволяет корректировать работу агрегата в режиме реального времени [2], а также использовать полученные данные для идентификации причин возникновения дефектов, изменения конструктивных параметров механизмов, снижения динамических нагрузок и, таким образом, повышения качества работы оборудования и технологического процесса. При этом важная роль отводится разработке методик технической диагностики и диагностического моделирования прокатного оборудования [1–3].

Целью работы является разработка методики технической диагностики и диагностического моделирования для выявления неисправностей механизмов главной линии стана, влияющих на точность проката.

Для выявления неисправностей механизмов главной линии стана, влияющих на точность проката, разработали методику [4, 5], основанную на совместном анализе спектра вибрации оборудования и функции спектральной плотности продольных колебаний толщины проката. Методика позволяет по контролю продольной разнотолщинности получаемого продукта определять возникающие неисправности в механизмах главной линии стана, оказывающие воздействие на точность проката. Методика основана на определении частот периодических составляющих отклонений размеров проката и их сопоставлении с частотами в спектре вибрации механизмов главной линии стана, обусловленных возникающими или имеющимися неисправностями. Всплески на графике оценки функции спектральной плотности $S(\omega)$ указывают на то, что в реализации контролируемого параметра – толщины полосы преобладают частоты, на которые приходятся эти ярко выраженные всплески. По данным частотам можно идентифицировать источники периодических составляющих отклонений размеров полосы [6]. Так как спектральная плотность характеризует распределение дисперсии периодических составляющих толщины полосы в частотной области, то по нему можно судить о степени влияния того или иного источника отклонений размеров на точность полосы, в том числе неисправностей оборудования, и о развитии этого влияния во времени.

С целью выделения периодических составляющих размеров проката, которые появились при прокатке на исследуемом оборудовании, и, соответственно, для отсеивания периодических составляющих, которые являются наследственными, необходимо вычислить оценки функции спектральной плотности колебаний размеров заготовки и полученного из нее проката. Так как скорость прокатки при получении заготовки может быть не известна, то реализации случайного процесса – продольные колебания размеров заготовки и полученного проката следует рассматривать в функции длины изделий $X(L)$, а не по времени $X(t)$. Если в отклонениях размеров заготовки имелись периодические составляющие с частотой ω_i , и они сохранились в результате прокатки, то в отклонениях размеров полученного проката будут присутствовать периодические составляющие, имеющие частоты ω_i / μ_Σ , где μ_Σ – коэффициент вытяжки.

Для обнаружения неисправностей оборудования использовали вибродиагностику. Во время работы стана в различных его узлах возникают вибрации. В случае появления каких-либо неисправностей или отклонений в работе стана в спектре вибрации появляются новые частоты. Идентификация этих частот позволяет выявлять неисправности оборудования.

С целью идентификации частот систематизировали возможные дефекты деталей и узлов, в том числе механизмов главной линии стана, таких как подшипники качения и скольжения, зубчатые шестерни, муфты и других, и формулы для расчета частот [7, 8], характеризующих дефект.

Для определения точек измерения спектра вибрации механизмов главной линии провели контроль параметров вибрации на лабораторных станах Дуо «160» и «150» МИСиС и промышленном стане Дуо «500» предприятия ФГУП «ОЗТМ и ТС». На основании результатов измерений по максимальной вибронегруженности выбрали следующие точки контроля спектра вибрации: для электродвигателя – основание со стороны выходного вала; для редуктора – опора выходного вала.

Методика поиска неисправностей, влияющих на точность проката, представлена схемой на рис. 1.

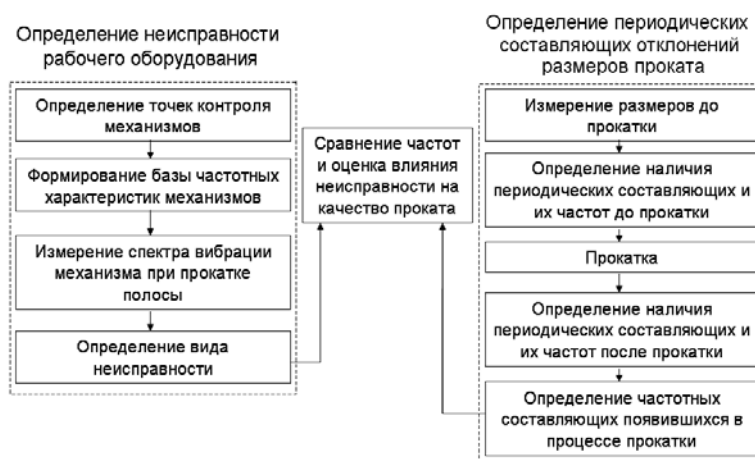


Рис. 1. Блок-схема методики поиска неисправностей, влияющих на точность проката

Для измерения параметров вибрации использовали виброметр TV300.

Для отработки методики провели исследование на лабораторном стане Дуо «150». Прокатывали полосы из меди марки М1 с регистрацией геометрических размеров полосы до и после прокатки, времени прокатки и скорости вращения валков. Исследовали спектр вибрации отдельных узлов стана с целью обнаружения неисправностей. Измерения проводили в точках, ранее определенных как наиболее вибронегруженные. Анализ спектра вибрации корпуса второго редуктора со стороны выходного вала (рис. 2), позволил выделить колебания на частотах 11 Гц, 39,2 Гц, 53,9 Гц, 88,2 Гц, 102,9 Гц. Для идентификации частот провели расчеты согласно формулам [7, 8].

Частота колебательных сил в бездефектном зацеплении:

$$f_Z = f_{ep1} \times Z_1 = f_{ep2} \times Z_2, \quad (1)$$

где f_{ep1} , f_{ep2} , Z_1 , Z_2 – соответственно, частота вращения входного и выходного вала и число зубьев ведущей и ведомой шестерен. Для зубчатого колеса $f_{ep2} = 9$ об/мин, что составляет 0,15 Гц; $Z_2 = 140$.

Низкочастотные составляющие при наличии дефектов на обеих шестернях:

$$f_{cr} = \frac{f_{ep1}}{k_1} = \frac{f_{ep2}}{k_2}, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 – целые числа.

Расчеты, проведенные по формулам (1), (2), позволили найти частоту 10,5 Гц, обусловленную дефектом зубчатого зацепления. Исходя из этого, частота 11 Гц характеризует дефект зубчатого зацепления ведомой шестерни главного редуктора (отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет 5 %). Далее, редуктор был разобран и исследован визуально. В ходе исследования, в зубчатом зацеплении, на колесе был обнаружен скол зуба.

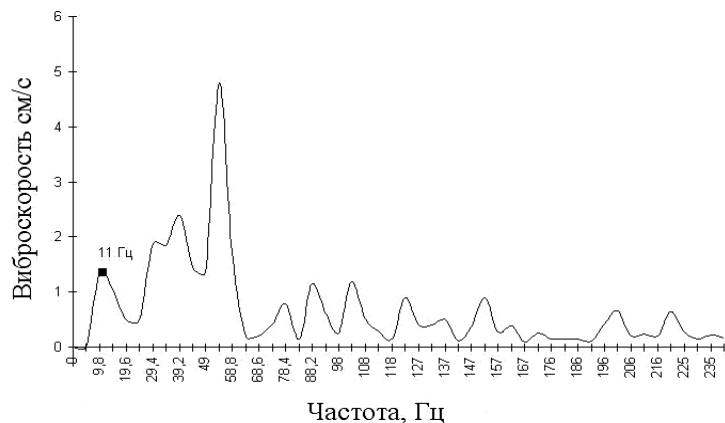


Рис. 2. Спектр вибрации корпуса второго редуктора, со стороны выходного вала

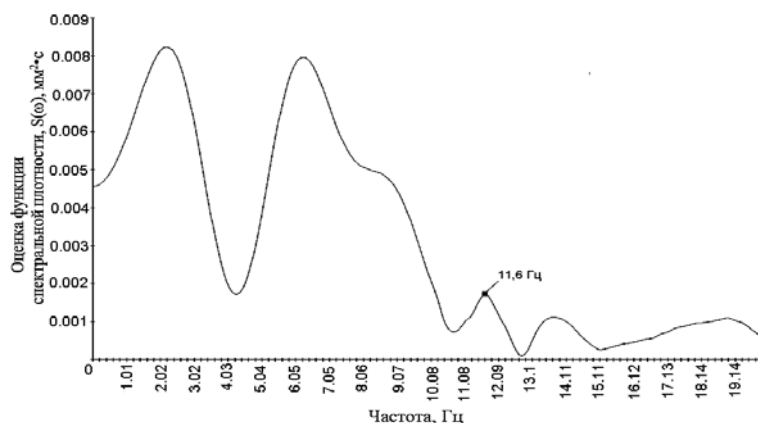


Рис. 3. График оценки функции спектральной плотности продольной разнотолщинности холоднокатаной полосы

На этапе изучения данных функциональной диагностики, а также при проектировании оборудования, при совершенствовании конструкции эксплуатируемых устройств и выборе режимов их работы целесообразно кроме измерительных систем применять диагностические математические модели, расширяющие возможности исследования, анализа и оптимизации работы механизмов. Для указанных целей используют программы на основе метода конечных элементов [1], однако при этом возникает ряд трудностей, связанных с подготовкой и вводом исходных данных, значительным временем счета, приближенностью решений и необходимостью их проверки экспериментально.

Для диагностического математического моделирования механизмов можно использовать уравнения движения. Уравнения движения являются следствием внешних воздействий и определяют изменение состояния исследуемой системы как системы материальных частиц [9]. Кинематический анализ уравнений движения является основой динамического анализа для определения энергетических затрат или обобщенных сил, действующих в механизмах, установления энергетических и других особенностей работы машин и процессов деформации.

По данным о толщине полосы до и после прокатки построены графики спектральной плотности. Графики отображают распределение функции спектральной плотности по длине полосы. Так как спектр вибрации механизмов измеряется в функции времени, то для определения неисправностей механизмов, влияющих на точность проката необходим переход от распределения функции $S(\omega)$ по длине к распределению функции по времени. Переход осуществлен путем пересчета функции спектральной плотности с учетом времени прокатки и скорости вращения валков. График функции спектральной плотности по времени (рис. 3) позволил выявить составляющую на частоте 11,6 Гц. Частота 11 Гц была, ранее, идентифицирована, как частота, возникающая вследствие дефекта зубчатого зацепления (отклонения от расчетных и экспериментальных данных составляют 9 % и 5 % соответственно). На основании этого можно утверждать, что дефект зубчатого зацепления влияет на продольную разнотолщинность получаемой полосы.

Разработали математическую модель [10], позволяющая рассчитывать величины биения $\delta(t)$, возникающие при работе лабораторного стана Дуо «150» в опорах механизмов главной линии стана: в зубчатых зацеплениях редукторов и шестеренной клетки, валковом узле рабочей клетки.

Математическая модель основана на получении дифференциальных уравнений колебаний системы при помощи уравнений Лагранжа второго рода [11] и учитывает такие параметры, как массы валов, зубчатых колес и валков, осевые моменты инерции валов, коэффициенты сопротивления в опорах и в зацеплении, углы зацепления колес, усилие и момент прокатки, геометрические размеры деталей. Значения момента прокатки рассчитывали по результатам измерений усилия прокатки на стане Дуо «150», проведенных с помощью мессдоз, подключенных через систему преобразователей к ЭВМ.

Математическая модель [10] позволяет рассчитать значения биения в опорах валов, в зубчатых зацеплениях и биение валков. Рассчитали величину биения в опорах механизмов главной линии стана, а так же в зубчатых зацеплениях двух редукторов и шестеренной клетки, и биение валков. Для дальнейшего анализа выбрали график биения в опоре редуктора, со стороны выходного вала, представленный на рис. 4. Анализ графика проводили с целью определения частотной составляющей 11,1 Гц, характеризующей имеющийся дефект (скол зуба) зубчатого колеса главного редуктора, который обнаружили ранее путем измерения спектра вибрации и выявили его влияние на точность прокатываемых полос.

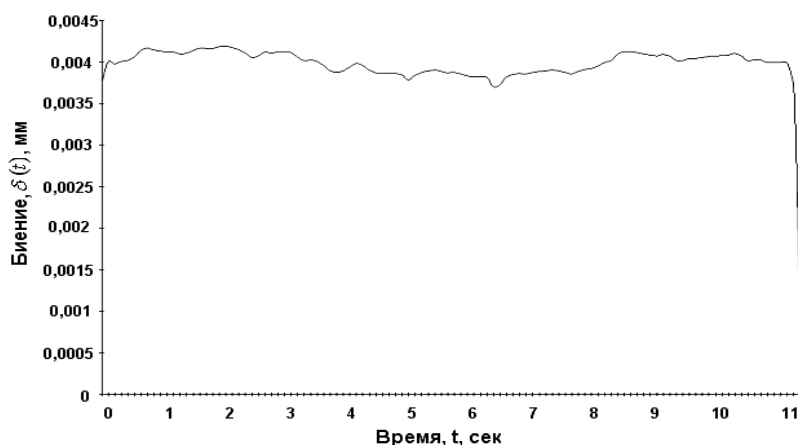


Рис. 4. График биения в опоре главного редуктора со стороны выходного вала

По полученным расчетным данным величины биения определили оценку функции спектральной плотности биения в опоре выходного вала редуктора, что позволило выявить периодическую составляющую с частотой 11,4 Гц. Данную частотную составляющую идентифицировали как обусловленную дефектом зубчатого колеса редуктора. Рассчитанные по математической модели значения частоты отличаются от измеренного значения на 3 %.

Рассчитанные по диагностической модели значения величин биения валков использовали для исследования влияния биения на формирование продольной и поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос из различных металлов и сплавов при помощи компьютерного моделирования. В вычислительной среде Deform-3d смоделировали процесс холодной прокатки полосы. Задавали закон движения валков с учетом биения при помощи процедуры «Movement control». На рис. 5 оказано сечение полосы, иллюстрирующее продольные колебания толщины. Дальнейший частотный анализ позволяет определить влияние колебания валков на формирование толщины проката. Варьируя параметры механизмов и изменяя условия процесса деформации при диагностическом моделировании, можно разработать технические решения по совершенствованию процесса прокатки и работе оборудования, а также использовать результаты моделирования на этапах проектирования прокатных станков с целью получения заданной точности проката и улучшения эксплуатационных характеристик оборудования.

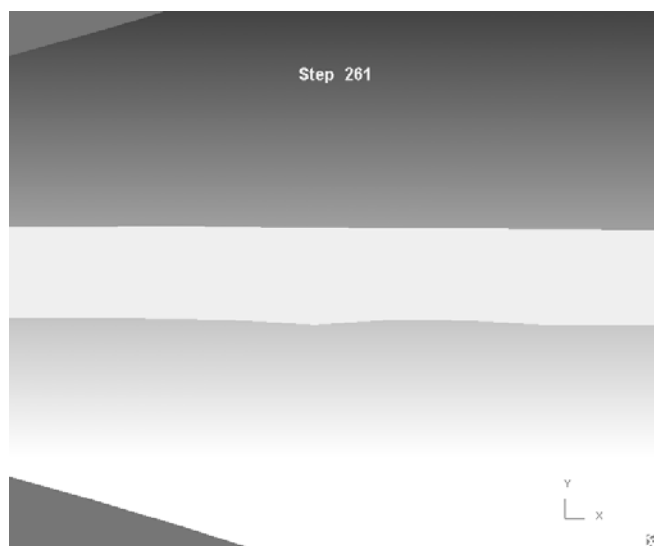


Рис. 5. Сечение полосы, иллюстрирующее продольные колебания толщины

По разработанной методике провели диагностику стана Дуо «1680» ОАО ВИЛС [12].

Для внедрения предлагаемой методики необходимо оснастить рабочую клеть прокатного стана измерителями толщины, установив их на входной и выходной сторонах клетки (рис. 6). По информации с измерителей рассчитываются оценки функций спектральной плотности продольной разнотолщинности полосы до и после прокатки и происходит отсев периодических составляющих, причина которых – колебания размеров заготовки. Частотные составляющие, полученные после прокатки, сравниваются с частотами из базы данных по дефектам, и в случае совпадения их значений система выдает информацию о виде дефекта, степени его развития, влиянии дефекта на отклонения толщины полосы.

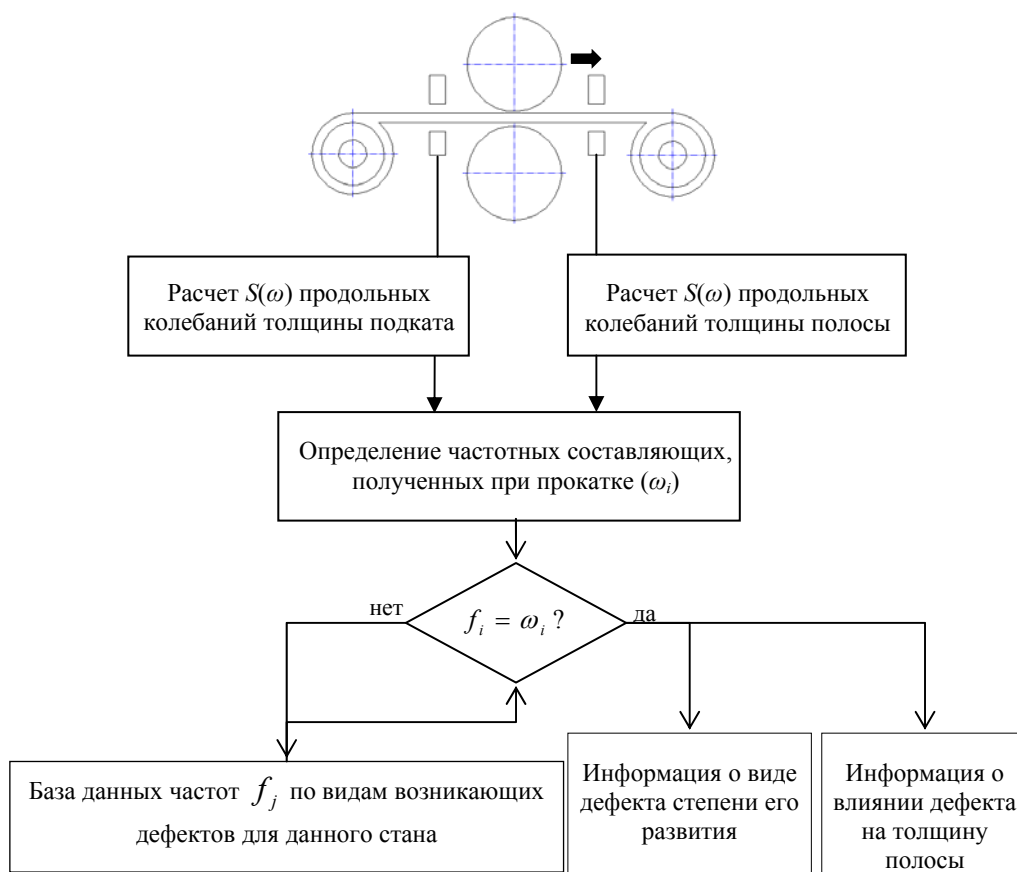


Рис. 6. Алгоритм применения разработанной методики

ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что неисправности механизмов главной линии стана, оказывающие влияние на точность проката, могут быть обнаружены путем контроля продольных колебаний размеров проката, например, толщины полосы. Основными этапами методики диагностирования являются: измерение продольных колебаний размеров заготовки и проката; вычисление функции спектральной плотности продольных колебаний контролируемого размера до и после прокатки и определение частотных составляющих колебаний размера проката, возникших в процессе прокатки; сравнение вычисленных частот с частотами из базы данных, характеризующих дефекты оборудования, и определение неисправных узлов, влияющих на точность проката. Диагностическое моделирование механизмов позволяет определить в опорах звеньев биения, оценить их зависимость от конструктивных параметров и режимов работы механизмов, и исследовать влияние возмущающих колебаний на формирование толщины проката.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркворт М. Диагностика вибраций прокатного стана / М. Маркворт // *Черные металлы*. – 2008. – № 8. – С. 39–44.
2. Сушко А. Е. Методология внедрения аппаратно-программных средств мониторинга технического состояния и диагностики прокатных станков / А. Е. Сушко // *Металлург*. – 2010. – № 6. – С. 24–28.
3. Дубинский М. Ю. Энергоаудит промышленных предприятий / М. Ю. Дубинский // *Металлург*. – 2010. – № 9. – С. 9–13.
4. Скрипаленко М. Н. Исследование влияния технического состояния диагностируемого оборудования на качество проката / М. Н. Скрипаленко, Ю. М. Михайлов // *Известия Вузов. Черная металлургия*. – 2007. – № 7. – С. 23–24.
5. Скрипаленко М. Н. Методика исследования влияния технического состояния прокатного оборудования на точность проката // М. Н. Скрипаленко, Ю. М. Михайлов // *Авиакосмические технологии : тр. 7-ой Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж : ВГТУ, 2006. – С. 20–22.*
6. Железнов Ю. Д. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки / Ю. Д. Железнов, С. Л. Коцарь, А. Г. Абиев. – М. : *Металлургия*, 1974. – 240 с.
7. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин. – М. : *Машиностроение*, 1999. – 344 с.
8. Барков А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации : учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб., 2000. – 158 с.
9. Алюшин Ю. А. Энергетические основы механики: учеб. пособие для вузов / Ю. А. Алюшин. – М. : *Машиностроение*, 1999. – 192 с.
10. Диагностическая математическая модель механизмов главной линии прокатного стана // Скрипаленко М. Н., Михайлов Ю. М., Сидорова Г. Ю., Ашихмин Д. А. // *Прогрессивные технологии пластической деформации : материалы международной научно-технической конференции*. – Москва : НИТУ МИСиС, 2009. – С. 212–224.
11. Глебов Л. А. Диагностическое моделирование в задачах вибродиагностики оборудования предприятий пищевых производств / Л. А. Глебов, А. Е. Яблоков, А. А. Потеря // *Контроль. Диагностика*. – 2003. – № 7. – С. 37–42.
12. Диагностика механизмов главной линии прокатного стана для выявления неисправностей, влияющих на точность проката / Я. Л. Соломоник, Ю. М. Михайлов, М. Н. Скрипаленко, Д. А. Ашихмин // *Технология легких сплавов*. – 2009. – № 2. – С. 101–106.

Скрипаленко М. Н. – канд. техн. наук, доц. НИТУ «МИСиС»;

Ашихмин Д. А. – аспирант НИТУ «МИСиС»;

Скрипаленко М. М. – канд. техн. наук, ст. преп. НИТУ «МИСиС»;

Жигулев Г. П. – канд. техн. наук, доц. НИТУ «МИСиС»;

Богданов С. Н. – канд. техн. наук, доц. НИТУ «МИСиС».

НИТУ «МИСиС» – Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», г. Москва, Россия.

E-mail: skripalenkomn@misis.ru