

Контроль и испытания

Controlling and testing

Научная статья
УДК 669-21-9
DOI: 10.14529/engin230305

ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ АВТОКОЛЕБАНИЙ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Д.М. Долгушин¹, denisdolgushin@mail.ru
С.В. Васильева², svetlanavitalyevna@yahoo.com
О.Н. ВострокнUTOва¹, olvos@mail.ru
И.В. Рыскужина¹, iraxxx.ru@mail.ru

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

² Научно-технический центр «СИГМА», Челябинск, Россия

Аннотация. Одной из проблем холодной прокатки тонких полос является самовозбуждающиеся колебания. При возникновении автоколебаний амплитуда возрастает скачком более чем в сто раз: от 2–3 м/с² до 200–250 м/с². Частоты колебаний составляют от 100 до 500 Гц, т. е. число циклов нагружения даже за несколько секунд может достигать нескольких тысяч. Как правило, интенсивные автоколебания происходят на тонких полосах с толщиной менее 1 мм и высоких скоростях прокатки. Контроль возникновения автоколебаний происходит с использованием специальных систем, по уровню колебаний или по технологическим параметрам, например, по колебаниям натяжения полосы. В системах контроля классическими являются методы с использованием разложения контролируемого сигнала в ряд Фурье. Для стационарных процессов разложение в ряд Фурье дает полную информацию о структуре сигнала, достаточную для проведения диагностики технического состояния машин и механизмов. Для нестационарного не гармонического сигнала информация о спектральном составе диагностического сигнала недостаточна, так как не позволяет определить момент возникновения нежелательного процесса. В металлургии в прокатном производстве процессы, как правило, не стационарные. Процесс холодной прокатки непрерывный, но дискретный. На прокатку одного рулона требуется 5–6 мин. Процесс автоколебаний даже при использовании систем контроля может продолжаться не более 2–3 с. Высокая частота колебаний и высокий уровень напряжений могут приводить к образованию трещин элементов клеток стана, например, плит SVC. Альтернативным способом контроля и диагностики может являться вейвлет-преобразование сигнала. Если БПФ позволяет определить наличие автоколебаний только в развитом состоянии, то вейвлет-преобразование позволяет определить момент зарождения процесса автоколебаний при низких амплитудах колебаний или даже при отсутствии колебаний по изменению характера сигнала технологических параметров.

Ключевые слова: стан холодной прокатки, автоколебания, быстрое преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, преобразование Фурье на коротком временном интервале

Для цитирования: Вейвлет-преобразования в задачах контроля и диагностики автоколебаний стана холодной прокатки / Д.М. Долгушин, С.В. Васильева, О.Н. ВострокнUTOва, И.В. Рыскужина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2023. Т. 23, № 3. С. 51–62. DOI: 10.14529/engin230305

WAVELET TRANSFORMATIONS IN MONITORING AND DIAGNOSTICS OF SELF-OSCILLATIONS OF A COLD ROLLING MILL

D.M. Dolgushin¹, *denisdolgushin@mail.ru*
S.V. Vasilyeva², *svetlanavitalyevna@yahoo.com*
O.N. Vostroknutova¹, *olvos@mail.ru*
I.V. Ryskuzhina¹, *iraxxx.ru@mail.ru*

¹ *Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia*

² *SIGMA Scientific and Technical Center, Chelyabinsk, Russia*

Abstract. Self-excited oscillations remain a frequent problem of cold rolling of thin strips. When self-oscillations occur, the amplitude increases by a jump of more than a hundred times, that is from 2–3 m/s² to 200–250 m/s². Oscillation frequencies (from 100 to 500 Hz, i.e. the number of loading cycles) can reach several thousands per a few seconds. Intense self-oscillations normally occur on thin strips with a thickness of less than 1 mm and high rolling speeds. The control of the occurrence of self-oscillations includes special systems, according to the level of vibrations or technological parameters, for example, by fluctuations in the tension of the strip. In control systems, classical methods include the decomposition of the controlled signal into a Fourier series. For stationary processes, Fourier series decomposition provides complete information about the signal structure and is sufficient to diagnose the technical condition of machines and mechanisms. As for a non-stationary non-harmonic signal, the information about the spectral composition of the diagnostic signal is insufficient, since it does not allow for determining the moment of occurrence of an undesirable process. In metallurgy and rolling production, processes are frequently not stationary. The cold rolling process is continuous, but discrete. It takes 5–6 minutes to roll one coil. The process of self-oscillation, even when using control systems, can last no more than 2–3 seconds. A high frequency of vibrations and a high level of stress can lead to the formation of cracks in the elements of the mill stands, for example, CVC plates. A signal conversion wavelet can become an alternative way of monitoring and diagnostics. If the FFT allows you to determine the presence of self-oscillations only in the developed state, the wavelet transform allows you to determine the origin of the self-oscillation process at low oscillation amplitudes. It also allows you to determine it in the absence of fluctuations by changing the signal of the technological parameters.

Keywords: cold rolling mill, self-oscillation, fast Fourier transform, wavelet transform, short-time Fourier transform (STFT)

For citation: Dolgushin D.M., Vasilyeva S.V., Vostroknutova O.N., Ryskuzhina I.V. Wavelet transformations in monitoring and diagnostics of self-oscillations of a cold rolling mill. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2023:23(3):51–62. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin230305

Введение

Автоколебания стана холодной прокатки – реально существующее явление, для борьбы с которым разрабатываются и внедряются различные контрольные и диагностические системы. При возникновении автоколебаний амплитуда возрастает скачком более чем в сто раз: от 2–3 м/с² до 200–250 м/с². Частоты колебаний составляют от 100 до 500 Гц, т. е. число циклов нагружения даже за несколько секунд может достигать нескольких тысяч. Причинами могут быть крутильные колебания [1, 2], параметрические возбуждения [3, 4], фрикционные автоколебания [5, 6] – при прокатке трение между полосой и рабочими валками на больших скоростях могут появляться неконсервативные силы, приводящие к возникновению автоколебаний. По характеру колебаний они (автоколебания) могут быть различными, например, с очень низкими амплитудами, приводящими к дефектам поверхности [7], но не приводящими к разрывам полосы и не угрожающими разрушением стана. Могут быть и с очень высоким уровнем амплитуд колебаний и в этом случае приводящие к непосредственным разрушениям, так и, при длительном воздействии, к появлению трещин элементов и узлов стана. Причина малоцикловая или многоцикловая усталость. Как правило, автоколебания на станах холодной прокатки возникают на тонких полосах, с тол-

щиной менее 1 мм [8] и высоких скоростях прокатки [9]. Основным мероприятием по устранению автоколебаний является раннее предупреждение и снижение скорости прокатки при возникновении автоколебаний. Для контроля станы оснащаются виброаппаратурой с аналоговым либо цифровым контролем [10, 11]. Соответствующее программное обеспечение позволяет контролировать спектральный состав и выделять опасные составляющие. Аналоговые системы предупреждают о повышении уровня вибрации, превышении допустимых норм и выдают команду о снижении скорости прокатки. Цифровые системы, позволяющие контролировать не только амплитуду, но и спектральный состав, даже при низких уровнях вибрации могут диагностировать и предупреждать возникновение дефектов, связанных с неравнотолщинностью полосы. Стандартно используемое при анализе и диагностике технического состояния быстрое преобразование Фурье [12] определяет структуру спектрального состава в случае стационарного процесса и плохо справляется в случае нестационарного процесса. Не позволяет определить время возникновения автоколебаний. С целью определения момента возникновения автоколебаний могут использоваться новые методы контроля, например преобразование Фурье на коротком временном интервале (Short-time Fourier transform) [13, 14]. В этом случае интервал дискретизации разбивается на несколько равных промежутков времени, в каждом из которых производится быстрое преобразование Фурье. Еще одним эффективным способом контроля является вейвлет-преобразование [15, 16]. Впервые в металлургии в прокатном производстве использование методов вейвлет-преобразований предложено в работах Маслова Е.А., Харахнина К.А. [17]. Использование вейвлет-преобразования представлено в работах [18–20].

С развитием информационных технологий появились новые возможности и, как следствие, новые термины. К таким в первую очередь можно отнести «цифровой двойник», «цифровая тень». Цифровая тень, цифровой след или электронный след – это данные, которые остаются при использовании Интернета [21]. Пассивный цифровой след пользователь оставляет ненамеренно, он получается автоматически из данных, которые получают и сохраняют автоматически. Активный цифровой след – это информация, которой пользователь делится по собственному желанию.

Одно из определений «цифровой тени» дано в работе [22]: «Цифровая тень» – отдельные факты о действиях анализируемого субъекта, отраженные и сохраненные внешней по отношению к нему информационной средой».

При проведении промышленного эксперимента, как правило, используются данные, технологические параметры или диагностические данные, отраженные и сохраненные во внешней по отношению к промышленному объекту среде, т. е. используется «цифровая тень». Фирмой «СИГМА» разработана и внедрена система контроля, сбора и длительного хранения технологических параметров стана холодной прокатки 2000. Система хранения представляет собой гибридную базу данных, включающую в себя, кроме технологических параметров, данные виброконтроля. Вибропараметры собираются и хранятся в отдельной базе данных. Частота опроса 8000 измерений в секунду (0,125 миллисекунд на одно измерение). Технологические параметры собираются с частотой опроса 100 или 200 измерений в секунду. Базы данных технологических и вибрационных параметров объединены графической оболочкой. По вибрационным параметрам определяется момент возникновения автоколебаний стана. Технологические параметры позволяют связать возникновение автоколебаний с процессом прокатки на стане.

Промышленный эксперимент

При ручном контроле набора скорости прокатки появление автоколебаний происходит при наборе скорости прокатки. В ручном режиме формируется сигнал АСУ ТП на снижение скорости прокатки. При высоких уровнях вибрации стан останавливается полностью. Затем, после непродолжительного останова, запускается снова. Если уровень вибрации ниже определенного предела, скорость прокатки снижается, например, с 22 до 10 м/с, затем, после стабилизации вибрационного состояния, продолжается набор скорости прокатки. На рис. 1 приведены два случая автоколебаний с различным уровнем пиковых значений виброускорения. В 8 часов 50 минут амплитуда виброускорений составляет 225 м/с² с полным остановом стана, в 9 часов 30 минут – 130 м/с² с частичным снижением скорости прокатки до 10 м/с.

Исследование автоколебаний с уровнем вибраций 225 м/с²

Уровни высокие, примерно в 100 раз выше по сравнению с уровнем вибрации при нормальной прокатке полосы. Вибрация скачком увеличивается от 2–3 м/с² до 150–250 м/с². И хотя время про-

должения режима автоколебаний всего 2 секунды, этого достаточно, чтобы получить порядка тысячи циклов нагружения. Десять случаев автоколебаний – это уже 10 000 циклов нагружения. При высоких уровнях вибрации и, как следствие, высоких уровнях напряжений 10 000 циклов достаточно для возникновения трещин, например, плит CVC. Хотя это только пример, есть ли связь между появлением трещин на плитах CVC и автоколебаниями клетки стана – неизвестно.

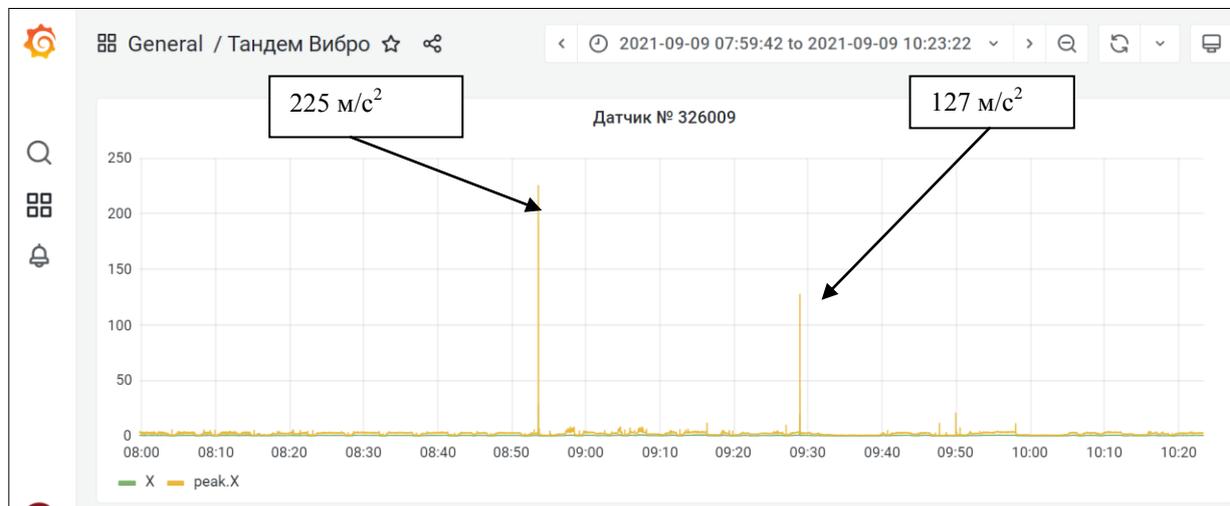


Рис. 1. Автоколебания клетки стана холодной прокатки 2000
Fig. 1. Self-oscillation of the rolling cage of the cold rolling mill 2000

На рис. 2 представлены пиковые значения виброускорений в трех взаимно перпендикулярных направлениях в режиме автоколебаний. Максимальные значения продольной составляющей – 225 м/с², совпадающей по направлению с прокаткой в поперечном направлении – 163 м/с² и в вертикальном направлении – 57 м/с².

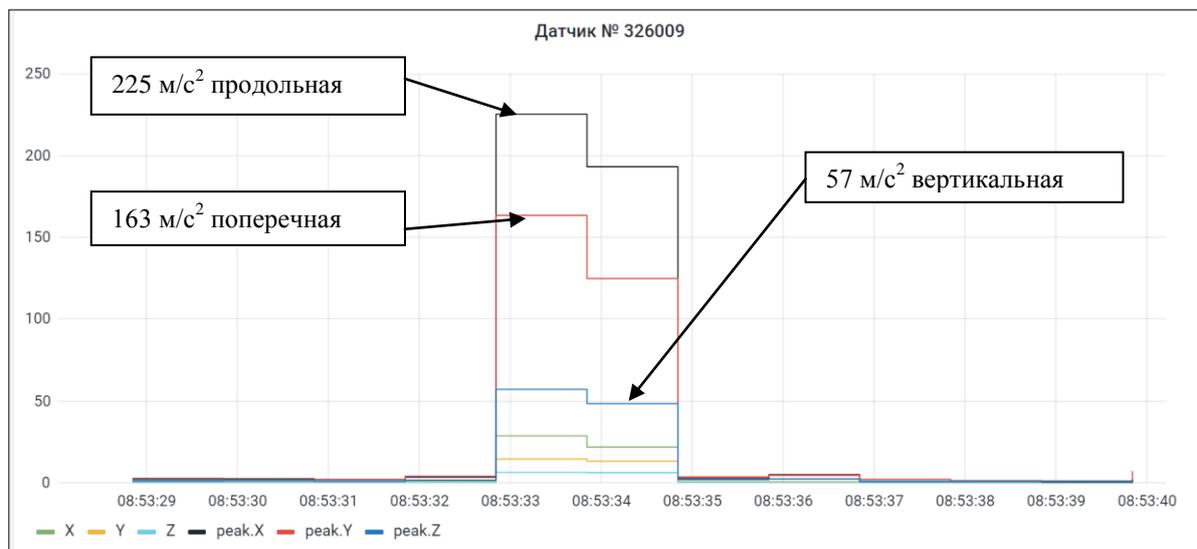


Рис. 2. Пиковые значения виброускорения 4 клетки в момент возникновения автоколебаний (м/с²)
Fig. 2. Peak values of vibration acceleration of the rolling cage 4 at the time of occurrence of self-oscillations (m/s²)

Измерение вибрации производилось с частотой опроса 8000 измерений в секунду, при этом частота Найквиста, в соответствии с теоремой Котельникова, составляет 4000 Гц. В качестве результата измерений получаем реализацию виброускорений на каждую отдельную секунду все 8000 точек измерения (рис. 3) и спектральную характеристику (рис. 4).

Как видно из реализаций (см. рис. 3), автоколебания развиваются не сразу. Вначале всплеск вибрации с малой амплитудой, затем в течение 0,3 с вибрация равна нулю и, наконец, развитое состояние автоколебаний. По внешнему виду колебания релаксационные, разрывные, характер-

ные для фрикционных автоколебаний. Частотный состав очень широкий (рис. 5), первая гармоника – 120 Гц, вторая, третья, четвертая – до 600 Гц.

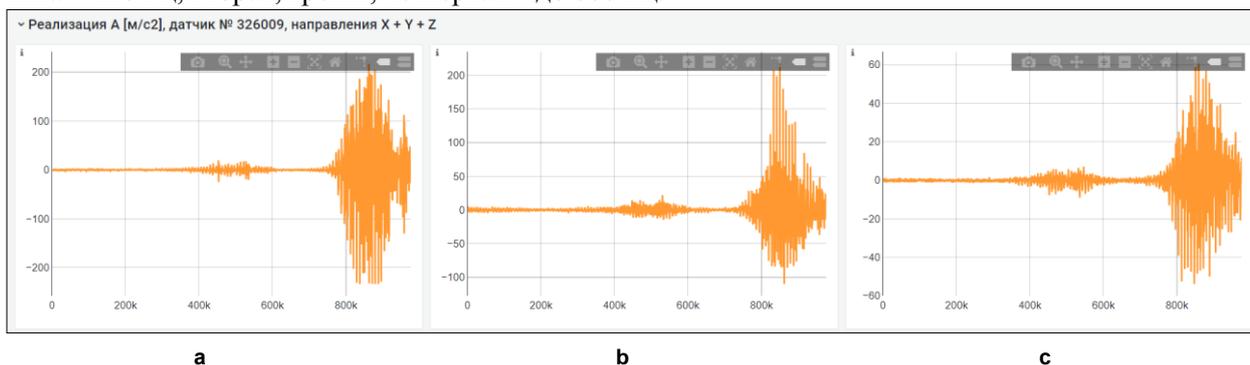


Рис. 3. Реализации виброускорений в продольном (а), поперечном (b) и вертикальном (с) направлениях, первая секунда

Fig. 3. Realization of vibration accelerations in the longitudinal (a), transverse (b) and vertical (c) directions

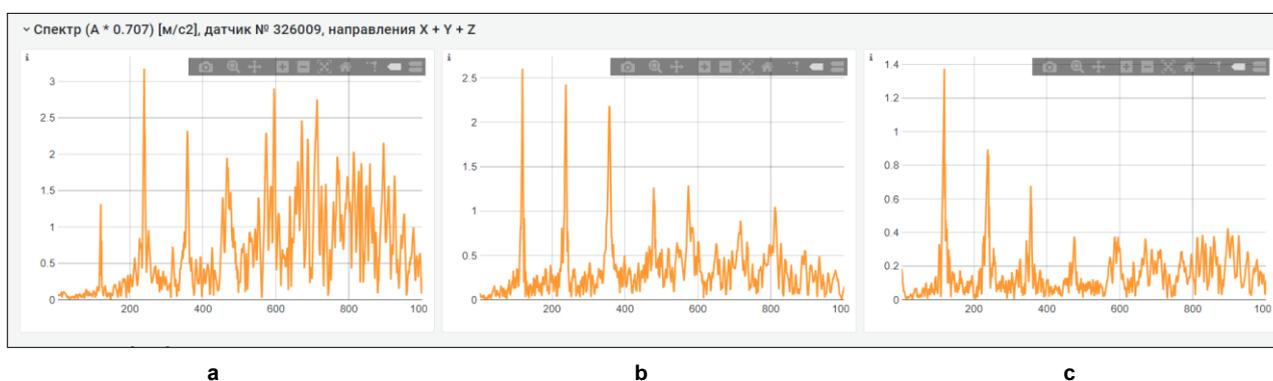


Рис. 4. Спектральный состав виброускорений в продольном (а), поперечном (b) и вертикальном (с) направлениях

Fig. 4. Spectral composition of vibration accelerations in the longitudinal (a), transverse (b) and vertical (c) directions

Возникновение автоколебаний происходит на скоростях проката в районе 21–22 м/с. При максимальном уровне вибрации на скорости 21,5 м/с происходит отключение стана (см. рис. 5). При скорости прокатки 17,5 м/с вибрационное состояние нормализуется, уровень виброускорений становится равным 3 м/с^2 . Полный останов стана происходит в течение 5 секунд с ускорением $4,5 \text{ м/с}^2$.

Важно, что переход из состояния автоколебаний в нормальное вибрационное состояние происходит за 1 с, т. е. если мы сможем определить момент зарождения автоколебаний хотя бы на секунду раньше, сможем работать без автоколебаний.

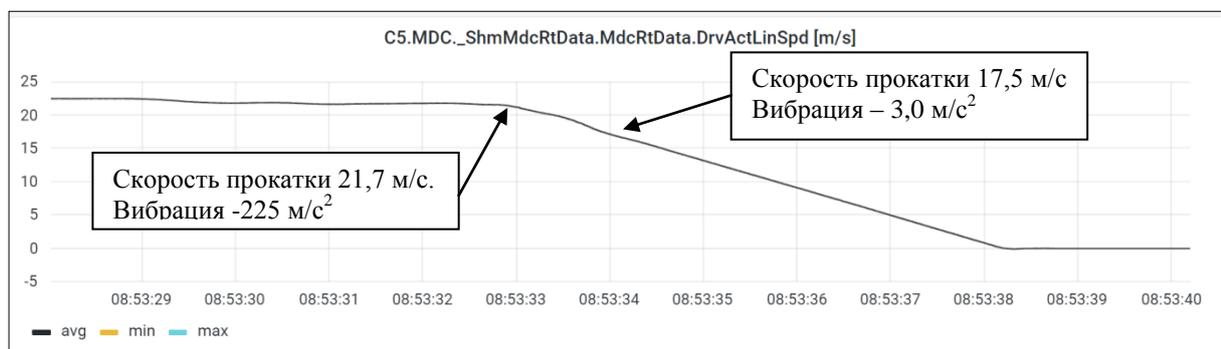


Рис. 5. Скорость прокатки 5 клетки в момент возникновения автоколебаний (м/с)

Fig. 5. Rolling speed of the 5 rolling cage at the moment of occurrence of self-oscillations (m/s)

На рис. 6 приведены автоколебания гидравлического натяжного устройства (ГНУ). Максимальный уровень виброперемещений 100–120 мкм. Колебания гидравлического натяжного устройства происходят в вертикальном направлении синхронно с колебаниями клетки стана и про-

долгаются в течение 2 с. Отключение стана происходит вручную в момент максимальных виброперемещений ГНУ.

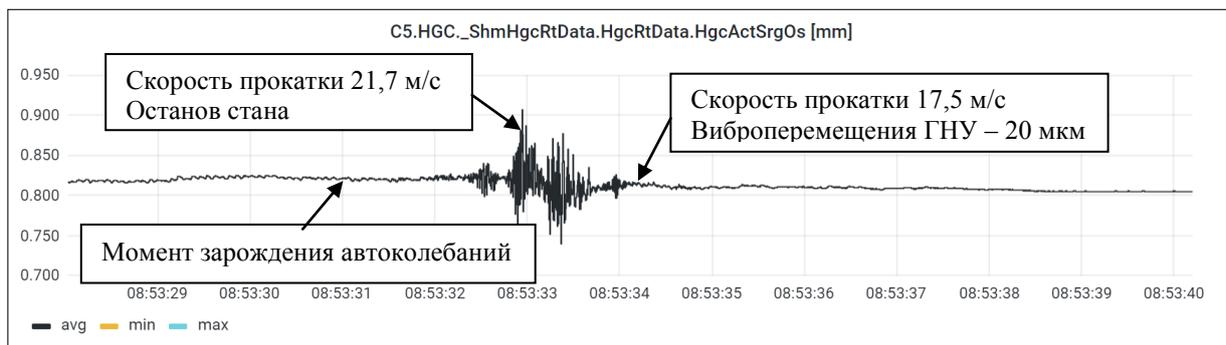


Рис. 6. Виброперемещения гидравлического натяжного устройства (ГНУ) клетки стана
Fig. 6. Vibration displacement of the hydraulic tensioner (GNU) of the mill stand

Примерно за полторы секунды до начала автоколебаний клетки стана и ГНУ начинают формироваться автоколебания прокатываемой полосы, фиксируются по натяжению полосы (рис. 7). Зарождение автоколебаний, происходит на скорости прокатки 22 м/с в течение 2–3 с. Максимальные уровни колебаний натяжения 140–150 кН. Колебания натяжения прокатываемой полосы не совпадают по фазе с виброперемещениями ГНУ. Частота опроса при измерениях перемещений ГНУ – 5 мс, натяжения полосы – 10 мс. Режим автоколебаний в увеличенном масштабе приведен на рис. 8.

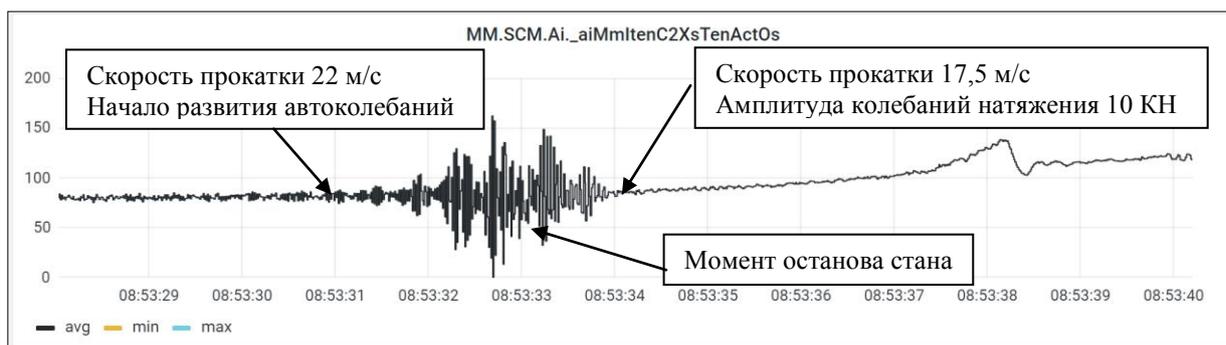


Рис. 7. Натяжение прокатываемой полосы в режиме автоколебаний
Fig. 7. Tension of the rolled strip in the self-oscillation mode

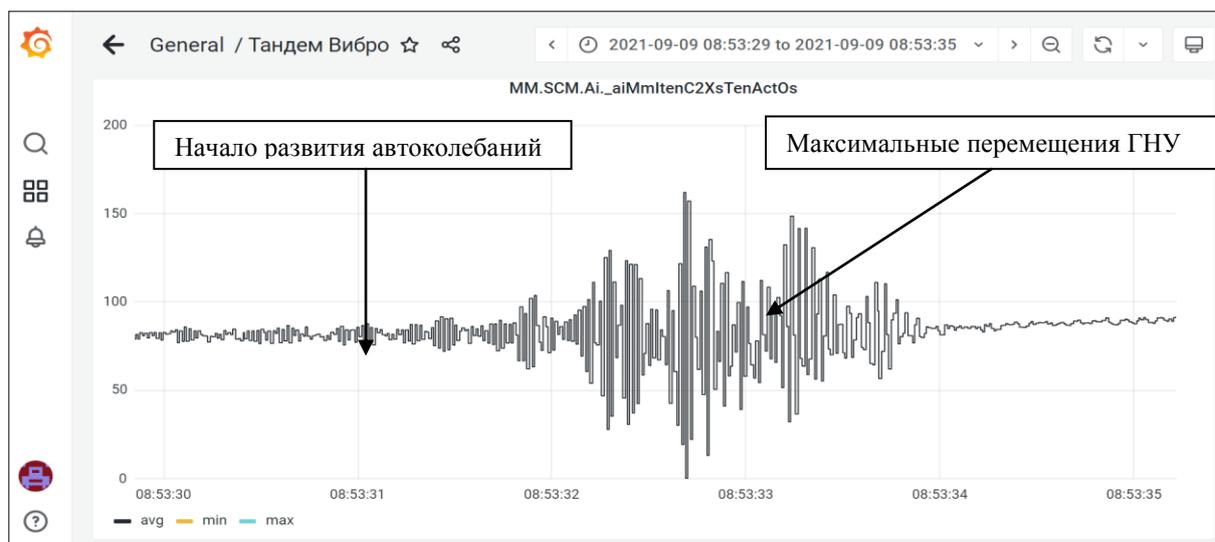


Рис. 8. Натяжение прокатываемой полосы в режиме автоколебаний в увеличенном масштабе
Fig. 8. Tension of the rolled strip in the self-oscillation mode on an enlarged scale

Исследование автоколебаний с уровнем вибраций 127 м/с^2

На рис. 9 представлены пиковые значения виброускорений в трех взаимно перпендикулярных направлениях в режиме автоколебаний при снижении скорости прокатки с 22 до 10 м/с.

На скорости 10 м/с уровень вибрации становится нормальным, в пределах требований стандарта. Максимальные значения продольной составляющей – 127 м/с^2 , совпадающей по направлению с прокаткой в поперечном направлении – 83 м/с^2 и в вертикальном направлении – 26 м/с^2 .

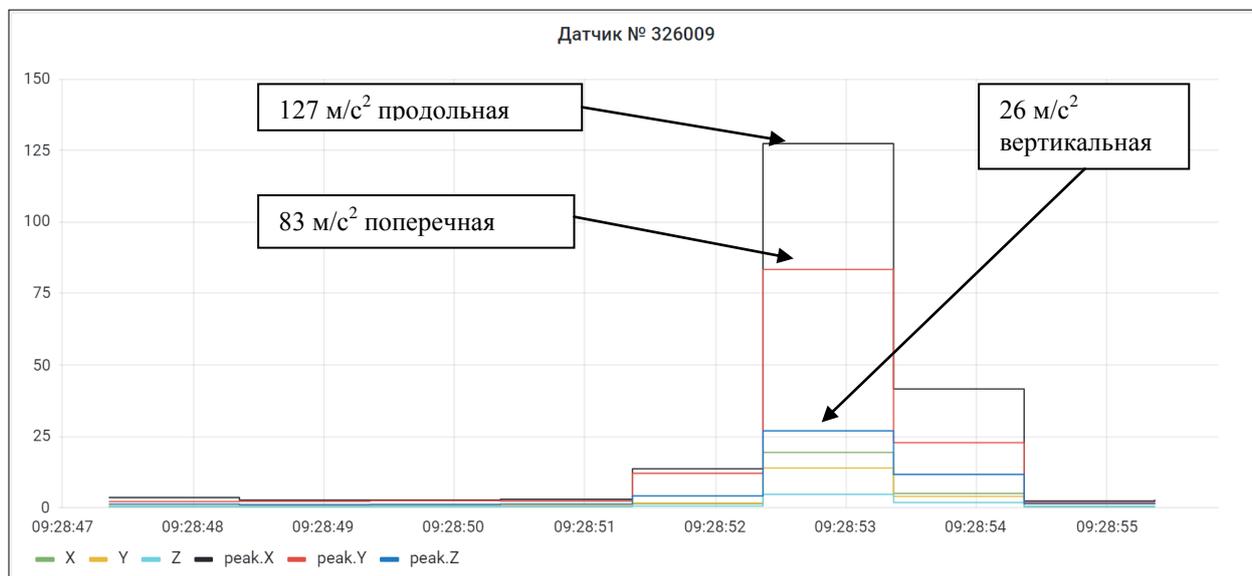


Рис. 9. Пиковые значения виброускорения 4 клетки в момент возникновения автоколебаний (м/с^2)
Fig. 9. Peak values of vibration acceleration of the 4 rolling cage at the time of occurrence of self-oscillations (m/s^2)

Возникновение автоколебаний происходит на скоростях проката в районе 21–22 м/с. При максимальном уровне вибрации на скорости 21,5 м/с происходит резкое снижение скорости стана до 10 м/с с ускорением примерно $3,0\text{--}3,5 \text{ м/с}^2$ (рис. 10). При скорости прокатки 17,5 м/с вибрационное состояние нормализуется, уровень виброускорений становится равным 3 м/с^2 . Полный останов стана происходит в течение 5 секунд с ускорением $4,5 \text{ м/с}^2$.

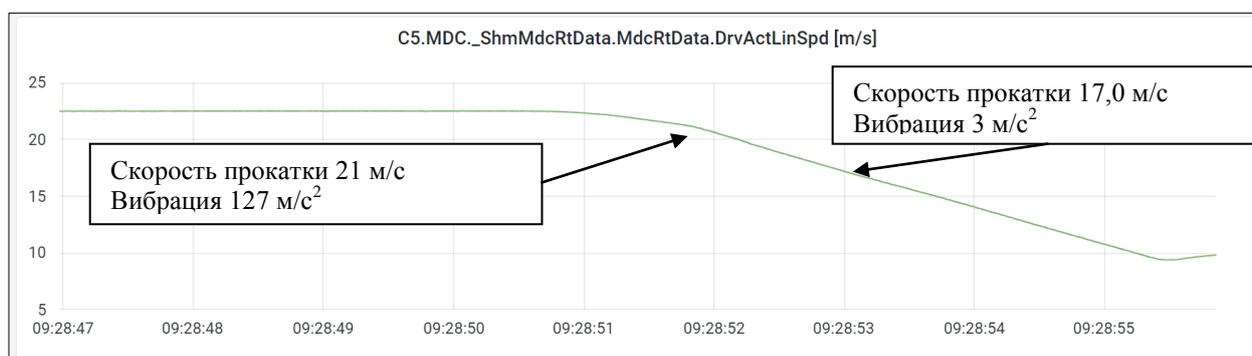


Рис. 10. Скорость прокатки 5 клетки в момент возникновения автоколебаний (м/с)
Fig. 10. Rolling speed of the 5 rolling cage at the moment of occurrence of self-oscillations (m/s)

На рис. 11 приведены автоколебания гидравлического натяжного устройства (ГНУ). Максимальный уровень виброперемещений 100–120 мкм. Колебания гидравлического натяжного устройства происходят синхронно с колебаниями клетки стана и также продолжаются в течение 2 с. Отключение стана происходит вручную в момент максимальных виброперемещений ГНУ.

Примерно за полторы секунды до начала автоколебаний клетки стана и ГНУ начинают формироваться автоколебания прокатываемой полосы, фиксируются по натяжению полосы (рис. 12). Зарождение автоколебаний происходит на скорости прокатки 22 м/с в течение 2–3 с. Максимальные уровни колебаний натяжения 140–150 кН. Колебания натяжения прокатываемой полосы не совпадают по фазе с виброперемещениями ГНУ.

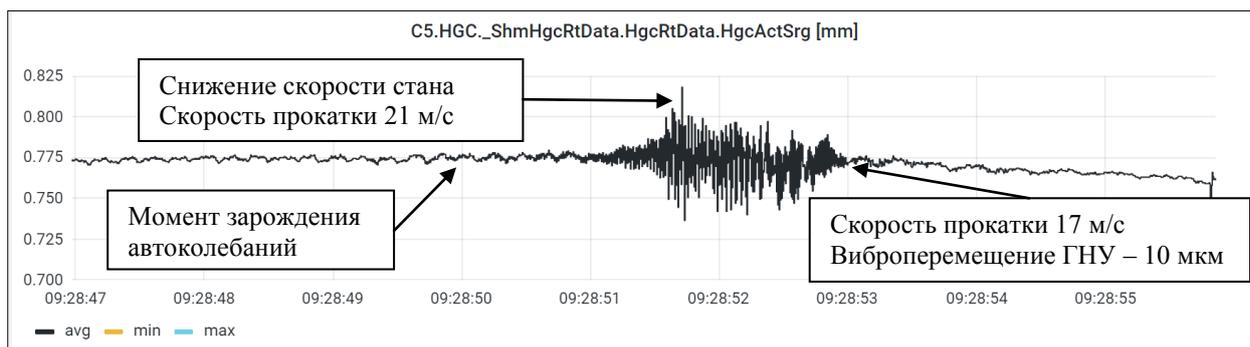


Рис. 11. Виброперемещения гидравлического натяжного устройства (ГНУ) клетки стана
Fig. 11. Vibration displacement of the hydraulic tensioner (GNU) of the mill stand

На рис. 13 показано натяжение прокатываемой полосы в режиме автоколебаний в увеличенном масштабе. В момент зарождения автоколебаний уровень вибрации составляет примерно 15–20 кН, что достаточно для численного определения момента возникновения автоколебаний и выработки сигнала АСУ ТП.

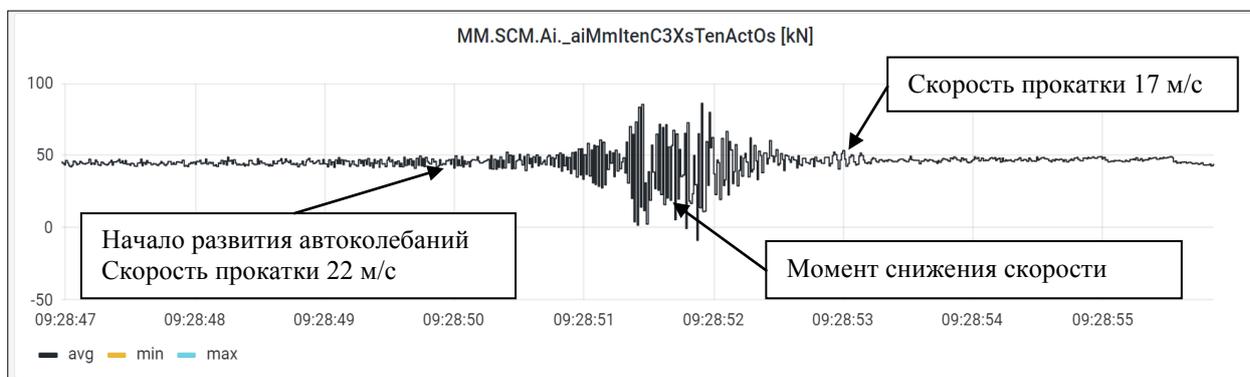


Рис. 12. Натяжение прокатываемой полосы в режиме автоколебаний
Fig. 12. Tension of the rolled strip in the self-oscillation mode

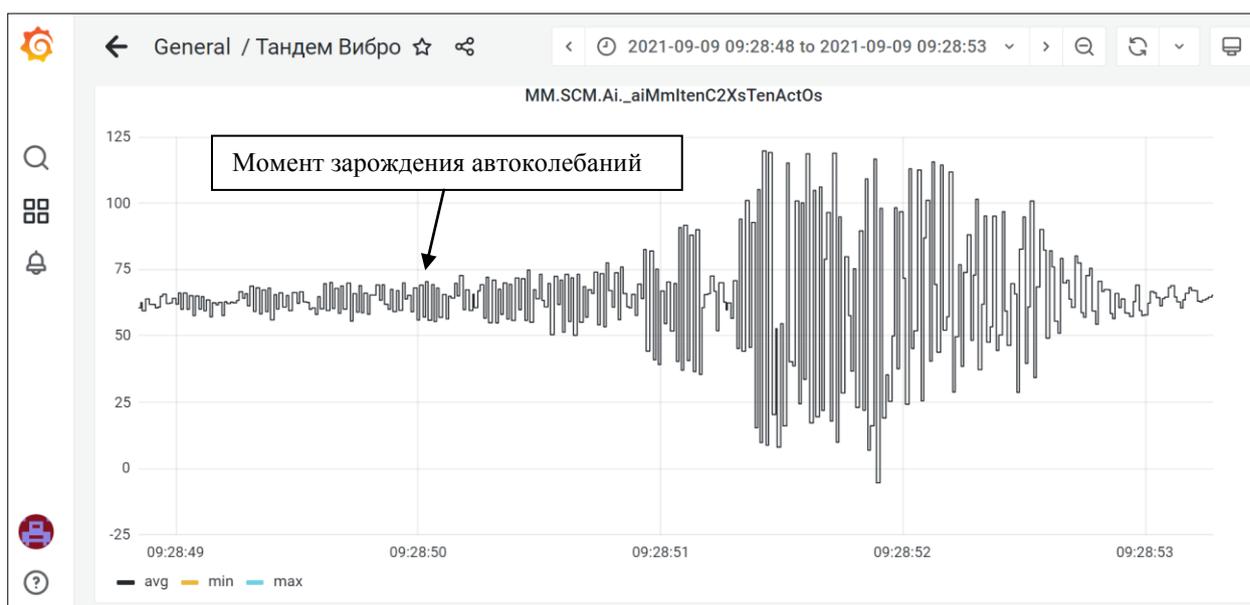


Рис. 13. Натяжение прокатываемой полосы в режиме автоколебаний в увеличенном масштабе
Fig. 13. Tension of the rolled strip in the mode of self-oscillations on an enlarged scale

Численные методы контроля момента возникновения автоколебаний

Природа возникновения автоколебаний клетей стана – это фрикционные колебания прокатываемой полосы. Причем автоколебания полосы зарождаются за 2–3 с до развитых автоколебаний клетей. Как показывает промышленный эксперимент, при снижении скорости прокатки с ускорением 4–5 м/с² достаточно одной секунды для стабилизации вибрационного состояния. За две 2 с необходимо определить момент зарождения, выработать сигнал АСУ ТП и снизить скорость прокатки до 17,5 м/с.

Собственная частота автоколебаний первой гармоники, полученная экспериментально, равна 115 Гц. Момент появления частоты 115 Гц можно определить, используя быстрое преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье за короткий момент времени или вейвлет-преобразование. Тригонометрический ряд Фурье, который используется при вычислении БПФ, можно записать в виде [23]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx). \quad (1)$$

Для стационарных систем ряд Фурье функции $f(x)$ сходится точно. Для нестационарных систем автоколебания клетей не стационарные, разрывные, релаксационные, ряд Фурье функции $f(x)$, вообще говоря, не обязан сходиться к ней точно. Кроме того, для определения спектральной характеристики с точностью от 1 до 2 Гц необходимо не менее 0,5–1,0 с. Сократить время обработки сигнала с достаточной степенью точности можно используя, например, преобразование Фурье на коротком временном интервале (Short-time Fourier transform) [13, 14].

Существует еще один метод определения момента возникновения автоколебаний прокатываемой полосы. Это вейвлет-преобразование [18, 24], которое достаточно часто используют в системах вибродиагностики. Простейшим примером ортогонального вейвлета является НААР вейвлет, определяемый соотношением:

$$\Psi^H(t) = \begin{cases} 1, 0 \leq t < 1/2 \\ -1, 1/2 \leq t < 1 \\ 0, t < 0, t \geq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Наиболее часто используется вейвлет Морле:

$$\Psi(t) = \exp(i\omega_0 t) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (3)$$

Вейвлет Морле эффективен на гладких тригонометрических функциях, но существенно медленнее вейвлета Хаара [25, 26].

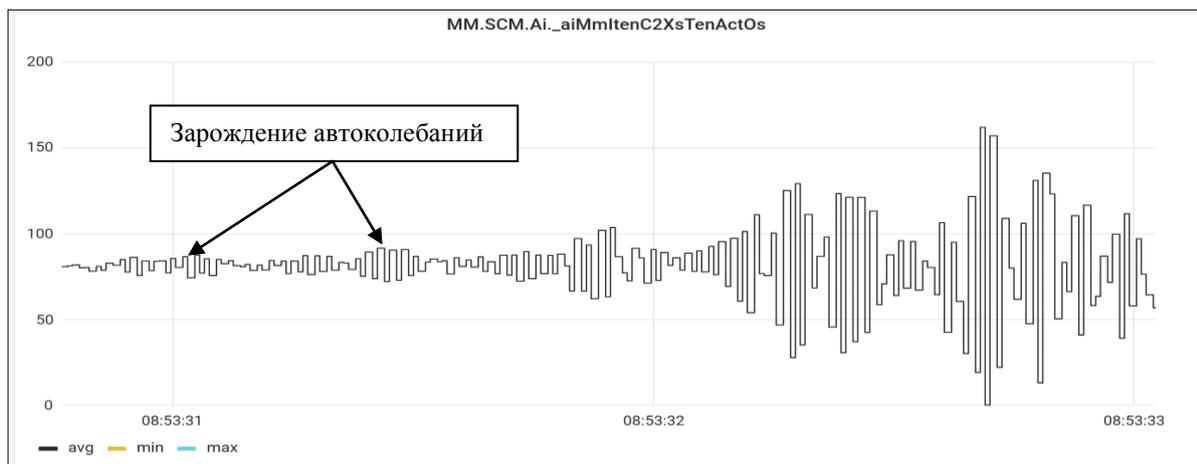


Рис. 14. Натяжение. Не гладкая функция
Fig. 14. Tension. Not a smooth function

Выводы

1. Автоколебания клетей стана являются следствием фрикционных автоколебаний прокатываемой полосы. Между автоколебаниями полосы и автоколебаниями клетей стана запаздывание примерно 2–3 с.

2. Используя современные методы анализа спектрального состава вибрационного сигнала возможно оперативно и надежно определять момент зарождения автоколебаний.

Список литературы

1. Characteristic recognition of chatter mark vibration in a rolling mill based on non-dimensional parameters of the vibration signal / Shao Yimin, De Xiao, Yuan Yilin, K. Mechefske, Chris Chen // *Journal of Mechanical Science and Technology* 2014. Vol. 28(6). P 2075–2080. DOI: 10.1007/s12206-014-0106-6
2. Amer Y.A., El-Sayed A.T., El-Bahrawy F.T. Torsional vibration reduction for rolling mill's main drive system via negative velocity feedback under parametric excitation // *J. Mech. Sci. Technol.* 2015. Vol. 29(4). P. 1581–1589. DOI: 10.1007/s12206-015-0330-8
3. Analysis of chatter in tandem cold rolling mills / Y. Kimura, Y. Sodani, N. Nishiura, N. Ikeuchi, Y. Mihara // *ISIJ International*. 2003. Vol. 43(1). P. 77–84. DOI: 10.2355/isijinternational.43.77
4. Asit Kumar Choudhary, Vinay S Gujre, Rahul Kumar Verma A Review on Chatter Analysis in Cold Rolling process // *JOJ Material Sci.* 2017. Volume 2 Issue 1. Number article 555578. DOI: 10.19080/JOJMS.2017.02.555578
5. Heidari A, Forouzan MR, Akbarzadeh S Effect of Friction on Tandem Cold Rolling Mills Chattering // *ISIJ International* 2014. Vol. 54(10). P. 2349–2356. DOI: 10.2355/isijinternational.54.2349
6. Zhao H., Ehmann K.F. Stability analysis of chatter in tandem rolling mills – part 1: single- and multi-stand negative damping effect // *J Manuf Sci Eng* 2013. Vol. 135(3). P. 031001–031001. DOI: 10.1115/1.4024032
7. Chatter detection using principal component analysis in cold rolling mill / N.I. Usmani, S. Kumar, S. Velisatti, P.K. Tiwari, S.K. Mishra, U.S. Patnaik // *Diagnostyka*. 2018. Vol. 19(1). P. 73–81. DOI: 10.29354/diag/81692
8. Yarita I. Analysis of chattering in cold rolling for ultra-thin gauge steel strip // *Trans Iron Steel Inst Jpn* 1978. Vol. 18(1). P. 1–10. DOI: 10.2355/isijinternational1966.18.1
9. High-speed rolling by hybrid-lubrication system in tandem cold rolling mills / Y. Kimura, N. Fujita, Y. Matsubara, K. Kobayashi, Y. Amanuma, O. Yoshioka, Y. Sodani // *J. Mater Process Technol* 2015. Vol. 21(6). P. 357–368. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.002
10. Веренев В.В., Большаков В.И. Состояние вибрационной диагностики и мониторинга оборудования прокатных станов // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2006. Вып. 12. С. 267–281.*
11. Система обнаружения признаков развития «чаттера» и своевременной коррекции технологического режима непрерывной холодной прокатки полос / И.Ю. Приходько, П.В. Крот, Е.А. Парсенюк, П.П. Чернов, В.А. Пименов, Ю.А. Цуканов // *Труды VII Конгресса прокатчиков. М., 2007. Т. 1. С. 115–123.*
12. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // *Mathematics of Computation*. 1965. Vol. 19. P. 297–301. DOI: 10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1
13. Zhivomirov H. On the Development of STFT-analysis and ISTFT-synthesis Routines and their Practical Implementation // *TEM Journal*. 2019. Volume 8, Issue 1. P. 56–64. DOI: 10.18421/TEM81-07.
14. Area-Efficient Short-Time Fourier Transform Processor for Time-Frequency Analysis of Non-Stationary Signals / Hohyub Jeon, Yongchul Jung, Seongjoo Lee, Yunho Jung // *Appl. Sci.* 2020, 10, 7208. DOI: 10.3390/app10207208
15. Mallat A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation // *Computer Science IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, Vol. 2, No. 7. P. 674–693. DOI: 10.1109/34.192463
16. Ali M. Al-Haj Fast Discrete Wavelet Transformation Using FPGAs and Distributed Arithmetic // *International Journal of Applied Science and Engineering* 2003. Vol. 1, iss. 2. P. 160–171.
17. Харахнин К.А., Маслов Е.А., Кожевников А.В. Алгоритм идентификации вибраций на стане бесконечной холодной прокатки // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2010. Т. 1. С. 131–136.
18. Коньшева В.Ю., Максимов Н.А., Шаронов А.В. Вейвлет-анализ в задачах контроля и диагностики линейных динамических систем // *Труды МАИ*. 2017. Вып. № 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87134>
19. Harris F. On the Use of Windows for Harmonic Analysis With the Discrete Fourier transform // *Proceedings of the IEEE*. February 1978. Vol. 66(1). P. 51–83. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837
20. Лебедев И.И., Лебедев В.И., Чернов А.В. Применение непрерывного вейвлет преобразования для обработки вибрационного сигнала // *Глобальная ядерная безопасность*. 2014. № 3(12). С. 65–68.

21. Лаборатория Касперского, Что такое цифровой след? 2022 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-a-digitalfootprint> Дата обращения 01.09.2023
22. Анохов И.В. Цифровая тень как инструмент для исследования отрасли // *E-Management*. 2022. Т. 5, № 1. С. 80–92.
23. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1998. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
24. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: НГТУ, 2003. 104 с.
25. Панин В.В., Енчев С.В., Товкач С.С. Вейвлет-диагностика вибросостояния элементов газотурбинного двигателя // *Вестник двигателестроения*. Киев, 2014. № 2. С. 233–237.
26. Орешко Н.И., Клионский Д.М., Солонина А.И. Алгоритм спектрального анализа сигналов на основе дискретного вейвлет преобразования. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. С. 234–238.

References

1. Yimin Shao, Xiao De, Yilin Yuan, Mechefske K., Chen Chris Characteristic recognition of chatter mark vibration in a rolling mill based on non-dimensional parameters of the vibration signal. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. Vol. 28(6). P. 2075–2080. DOI: 10.1007/s12206-014-0106-6
2. Amer Y.A., El-Sayed A.T., El-Bahrawy F.T. Torsional vibration reduction for rolling mill's main drive system via negative velocity feedback under parametric excitation. *J. Mech. Sci. Technol.* 2015. Vol. 29(4). P. 1581–1589. DOI: 10.1007/s12206-015-0330-8
3. Kimura Y., Sodani Y., Nishiura N., Ikeuchi N., Mihara Y. Analysis of chatter in tandem cold rolling mills. *ISIJ International*. 2003. Vol.43(1). P. 77–84. DOI: 10.2355/isijinternational.43.77
4. Asit Kumar Choudhary, Vinay S Gujre, Rahul Kumar Verma A Review on Chatter Analysis in Cold Rolling process: *JOJ Material Sci.* 2017. Volume 2, Issue, 1. Number article 555578. DOI: 10.19080/JOJMS.2017.02.555578
5. Heidari A., Forouzan M.R., Akbarzadeh S. Effect of Friction on Tandem Cold Rolling Mills Chattering. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54(10). P. 2349–2356. DOI: 10.2355/isijinternational.54.2349
6. Zhao H., Ehmman K.F. Stability analysis of chatter in tandem rolling mills – part 1: single- and multi-stand negative damping effect. *J Manuf Sci Eng* 2013. Vol. 135(3). P. 031001–031001. DOI: 10.1115/1.4024032
7. Usmani N.I., Kumar S., Velisatti S., Tiwari P.K., Mishra S.K., Patnaik U.S. Chatter detection using principal component analysis in cold rolling mill. *Diagnostyka*. 2018. Vol. 19(1). P. 73–81. DOI: 10.29354/diag/81692
8. Yarita I. Analysis of chattering in cold rolling for ultra-thin gauge steel strip. *Trans Iron Steel Inst Jpn*. 1978. Vol. 18(1). P. 1–10. DOI: 10.2355/isijinternational1966.18.1
9. Kimura Y., Fujita N., Matsubara Y., Kobayashi K., Amanuma Y., Yoshioka O., Sodani Y. High-speed rolling by hybrid-lubrication system in tandem cold rolling mills. *J. Mater Process Technol.* 2015. Vol. 21(6). P. 357–368. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.002
10. Verenev V.V., Bolshakov V.I. [The state of vibration diagnostics and monitoring of rolling mill equipment]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of scientific tr.* Dnepropetrovsk, 2006. Issue. 12. pp. 267–281. (In Russ.)
11. Prikhodko I.Yu., Krot P.V., Parsenyuk E.A., Chernov P.P., Pimenov V.A., Tsukanov Yu.A. [System for detecting signs of chatter development and timely correction of the technological regime of continuous cold rolling of strips]. *Proceedings of the VII Congress of Distributors*. Moscow, 2007. Vol. 1, pp. 115–123. (In Russ.)
12. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*. 1965. Vol. 19. P. 297–301. DOI: 10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1
13. Zhivomirov H. On the Development of STFT-analysis and ISTFT-synthesis Routines and their Practical Implementation. *TEM Journal*. 2019, Volume 8, Issue 1, pp. 56–64. DOI: 10.18421/TEM81-07.
14. Hohyub J., Yongchul J., Seongjoo L., Yunho J. Area-Efficient Short-Time Fourier Transform Processor for Time–Frequency Analysis of Non-Stationary Signals. *Appl. Sci.* 2020, vol. 10, 7208. DOI: 10.3390/app10207208
15. Mallat A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *Computer Science IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, vol. 2, no. 7, pp. 674–693. DOI: 10.1109/34.192463

16. Ali M. Al-Haj Fast Discrete Wavelet Transformation Using FPGAs and Distributed Arithmetic. *International Journal of Applied Science and Engineering* 2003. Vol. 1, iss. 2, pp. 160–171.
17. Kharakhnin K.A., Maslov E.A., Kozhevnikov A.V. [An algorithm for identifying vibrations at an infinite cold rolling mill] *Bulletin of Cherepovets State University*. 2010, vol 1 pp. 131–136 (in Russ)
18. Konysheva V.Yu., Maksimov N.A., Sharonov A.V. [Wavelet analysis in problems of control and diagnostics of linear dynamic systems]. *The works of MAI*. 2017, Iss. 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87134> (In Russ.)
19. Harris F. On the Use of Windows for Harmonic Analysis With the Discrete Fourier transform/ *Proceedings of the IEEE*. 1978, vol. 66(1), pp. 51–83. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837
20. Lebedev, V.I. Lebedev, A.V. Chernov [Application of continuous wavelet transform for processing Vibration signal]. *Global Nuclear Safety*, 2014. No. 3(12), pp. 65–68. (In Russ.)
21. *Kaspersky Lab, What is a digital footprint?* 2022 [Electronic resource]. URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-a-digitalfootprint> (access date 09/01/2023) (In Russ.)
22. Anokhov I.V. [Digital shadow as a tool for industry research]. *E-Management*. 2022. Vol. 5. No. 1, pp. 80–92. (In Russ.)
23. Astafyeva N.M. [Wavelet analysis: fundamentals of theory and application examples]. *Successes of Physical Sciences*. 1998. Vol. 166. no. 11, pp. 1145–1170. (In Russ.)
24. Yakovlev A.N. *Vvedeniye v veyvlet-preobrazovaniya* [Introduction to wavelet transformations] Novosibirsk, 2003. 104 p.
25. Panin V.V., Enyaev S.V., Tovkach S.S. [Wavelet diagnostics of the vibration state of gas turbine engine elements]. *Bulletin of Engine Engineering*, 2014. No. 2, pp. 233-237. (In Russ.)
26. Oreshko N.I., Klionsky D.M., Solonina A.I. *Algoritm spektral'nogo analiza signalov na osnove diskretnogo veyvlet preobrazovaniya* [Algorithm for spectral analysis of signals based on discrete wavelet transform]. St. Petersburg, 2016, pp. 234–238.

Информация об авторах

Долгушин Денис Михайлович, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия; denisdolgushin@mail.ru

Васильева Светлана Витальевна, научный сотрудник, НТЦ «СИГМА», Челябинск, Россия; svetlanavitalyevna@yahoo.com

Вострокнутова Ольга Николаевна, ст. преп., ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия; olvos@mail.ru.

Рыскужина Ирина Владимировна, ст. преп., ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия; iraxxx.ru@mail.ru.

Information about the authors

Denis M. Dolgushin, Ph.D. head of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; denisdolgushin@mail.ru

Svetlana V. Vasilyeva, Researcher, SIGMA Scientific Research Center, Chelyabinsk, Russia; svetlanavitalyevna@yahoo.com

Olga N. Vostroknutova, senior lecturer of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; olvos@mail.ru

Irina V. Ryskuzhina, senior lecturer of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; iraxxx.ru@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.08.2023; принята к публикации 31.08.2023.

The article was submitted 28.08.2023; accepted for publication 31.08.2023.