

# Контроль и испытания Controlling and testing

Научная статья

УДК 354.16

DOI: 10.14529/engin250104

## ПОПЕРЕЧНАЯ РЕБРИСТОСТЬ НА ОДНОКЛЕТЬЕВЫХ РЕВЕРСИВНЫХ СТАНАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

**А.В. Комаров**<sup>1</sup>, Komarov\_av@nlmk.com

**И.Г. Большаков**<sup>2</sup>, bolshekov\_ig@nlmk.com

**В.А. Васильев**<sup>3</sup>, vasilyev-va@list.ru

**М.А. Смирнова**<sup>4</sup>, smirnova\_ma@mail.ru

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «ВИЗ-Сталь», Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Научно-технический центр «СИГМА», Челябинск, Россия

<sup>4</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Н.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Одной из проблем при холодной прокатке тонких полос являются автоколебания, возникающие при скоростях прокатки выше 20 м/с. Увеличение амплитуды вибрации происходит настолько быстро, что приходится снижать скорость прокатки или останавливать стан полностью. При холодной прокатке возможно возникновение поперечной ребристости. Поперечная ребристость возникает при автоколебаниях с низким уровнем вибрации, при этом толщина прокатываемой полосы изменяется по гармоническому закону и изменения толщины превышают допустимые величины. Причиной появления автоколебаний являются синхронные колебания последних клеток многоклетьевого стана. На двухклетевых реверсивных станах холодной прокатки также возможно возникновение поперечной ребристости. Причина – синхронизация колебаний клеток стана. Частота автоколебаний равна собственной частоте станины клеток стана – примерно 100–120 Гц. На одноклетевых реверсивных станах поперечная ребристость возникает при однократной прокатке непосредственно с разматывателя на правую моталку. Параметры колебаний одноклетьевого стана определялись в промышленном эксперименте с использованием беспроводной, мобильной системы вибродиагностики. Определены собственные частоты колебаний станины клетки. Частота первой формы – 108 Гц. В спектре присутствуют гармоники до 7-й включительно. Собственная частота разматывателя определялась нестационарным методом с использованием виброаппаратуры фирмы ДИАМЕХ и вибратором в диапазоне частот вращения от 300 до 5000 об/мин. Собственная частота прижимного ролика разматывателя получена экспериментально: ДИАМЕХ – 17 Гц, вибратор – 14–15 Гц, мобильная система диагностики – 11 Гц. Экспериментально получена зависимость изменения частоты автоколебаний от изменения скорости прокатки. Причем частота автоколебаний в три раза превышает частоту вращения рабочих валков и, соответственно, частоту вынужденных колебаний. Получена нелинейная модель отдельно для клетки и для разматывателя стана. Определены границы синхронизации и зоны почти периодических колебаний.

**Ключевые слова:** холодная прокатка, автоколебания, поперечная ребристость, собственные частоты, промышленный эксперимент

**Для цитирования:** Поперечная ребристость на одноклетевых реверсивных станах холодной прокатки / А.В. Комаров, И.Г. Большаков, В.А. Васильев, М.А. Смирнова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 1. С. 34–46. DOI: 10.14529/engin250104

## TRANSVERSE RIBBING ON SINGLE-CELL REVERSIBLE COLD ROLLING MILLS

A.V. Komarov<sup>1</sup>, Komarov\_av@nlmk.com

I.G. Bolshekov<sup>2</sup>, bolshekov\_ig@nlmk.com

V.A. Vasiliev<sup>3</sup>, vasilyev-va@list.ru

M.A. Smirnova<sup>4</sup>, smirnova\_ma@mail.ru

<sup>1</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

<sup>2</sup> VIS Steel LLC, Yekaterinburg, Russia

<sup>3</sup> SIGMA Scientific and Technical Center, Chelyabinsk, Russia

<sup>4</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** One of the problems with cold rolling of thin strips is the self-oscillation that occurs at rolling speeds above 20 m/s. The vibration amplitude increases so quickly that it is necessary to reduce the rolling speed or stop the mill completely. During cold rolling, transverse ribbing may occur. Transverse ribbing occurs during self-oscillation with a low vibration level, while the thickness of the rolled strip varies according to the harmonic law and the thickness change exceeds the permissible values. The reason for the appearance of self-oscillations is the synchronous oscillations of the last crates of the multicellular mill. Transverse ribbing is also possible in two-ring reversible cold rolling mills. The reason is the synchronization of the oscillation of the crates of the mill. The frequency of self-oscillations is equal to the natural frequency of the bed of the mill crates, approximately 100–120 Hz. On single-cell reversible mills, transverse ribbing occurs during single-pass rolling directly from the uncoiler to the right winder. The vibration parameters of a single-cell mill were determined in an industrial experiment using a wireless, mobile vibration diagnostic system. The natural oscillation frequencies of the crate bed are determined. The frequency of the first form is 108 Hz. Harmonics up to and including the 7th harmonic are present in the spectrum. The natural frequency of the decoiler was determined by a non-stationary method using DIAMEH vibration equipment and a vibrator in the rotation frequency range from 300 to 5000 rpm. The natural frequency of the decoiler pressure roller obtained experimentally: “DIAMECH” – 17 Hz, “VIBRATOR” – 14–15 Hz, Mobile diagnostic system – 11 Hz. The dependence of the change in the frequency of self-oscillations on the change in the rolling speed has been experimentally obtained. Moreover, the frequency of self-oscillations is three times higher than the rotation frequency of the working rolls and, accordingly, the frequency of forced oscillations. A nonlinear model is obtained separately for the crate and for the decoiler of the mill. The boundaries of synchronization and the zones of almost periodic oscillations are determined.

**Keywords:** cold rolling, self-oscillations, transverse ribbing, natural frequencies, industrial experiment

**For citation:** Komarov A.V., Bolshekov I.G., Vasiliev V.A., Smirnova M.A. Transverse ribbing on single-cell reversible cold rolling mills. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025;25(1):34–46. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250104

### Введение

Одной из проблем при холодной прокатке тонких полос являются автоколебания, возникающие при скоростях прокатки выше 20 м/с. Увеличение амплитуды вибрации происходит настолько быстро, что приходится снижать скорость прокатки или останавливать стан полностью [1–3]. Теоретический и экспериментальный анализ причин появления автоколебаний при прокатке тонких полос проведен в работах [4–6]. В многоклетевых станах происходит синхронизация колебаний последних клетей, в которых толщина прокатываемой полосы составляет 0,3–0,7 мм [7–9]. Причиной может являться отрицательное демпфирование, формирующееся в граничном слое рабочих валков и прокатываемой полосы. Экспериментальное определение характеристик трения в клети проведено в работах [10, 11]. В работе [12] определены характеристики зависимости момента трения от скорости протягивания полосы в стане холодной прокатки, совмещенном с тра-

вильным агрегатом. Отрицательное демпфирование возникает в момент, когда необходимо вырезать дефект в виде неметаллического включения. В этом случае стан останавливается, рабочие валки разводятся и полоса протягивается со скоростью от 0,5 до 1 м/с. В этот момент возникают автоколебания полосы на натяжной станции травильного агрегата.

Кроме классических автоколебаний на высоких скоростях и высоких уровнях вибрации могут возникать автоколебания с низким уровнем виброскоростей, но при этом приводящие к дефекту, при котором толщина прокатываемой полосы изменяется по гармоническому закону и изменения по величине выходят за пределы допустимых величин. Такие дефекты называются поперечной ребристостью и могут возникать как на многоклетевых станах [13], так и на реверсивных двухклетевых и одноклетевых станах [14, 15].

При поперечной ребристости изменяется не только толщина полосы, но и визуально после покраски поверхность металла теряет товарный вид [15] (рис. 1).



Рис. 1. Поперечная ребристость на тонкой полосе [4]

Fig. 1. Transverse ribbing on a thin strip [4]

Классической моделью четырехвалковой клетки стана холодной прокатки является система из четырех масс, соединенных упругими элементами. Такая модель позволяет представить различные формы колебаний и определить собственные частоты [16] (рис. 2).

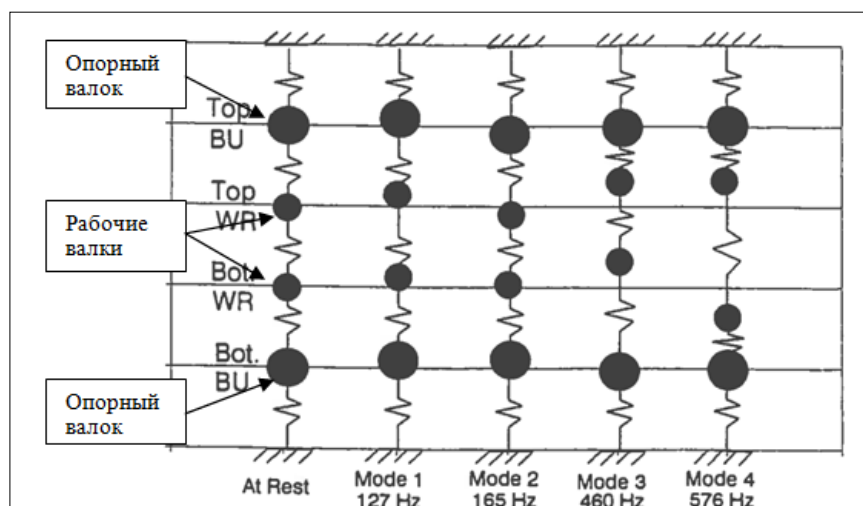


Рис. 2. Формы колебаний для систем, состоящих из масс, пружин и демпферов

Fig. 2. Waveforms for systems consisting of masses, springs and dampers

В работе [17] проведен подробный анализ динамических характеристик четырехвалковой клетки стана холодной прокатки с использованием конечно-элементной модели. Модель состоит

из 218 узлов и содержит приблизительно 260 элементов в зависимости от ширины полосы. Корпус стана построен с использованием трехмерных четырехугольных элементов-оболочек. Рабочий и опорный валки моделируются с помощью двумерных балочных элементов с заданными площадями поперечного сечения, моментами инерции и диаметрами. Прокатываемая полоса набрана трехмерными пружинными элементами малой массы. Принципиальная схема модели приведена на рис. 3.

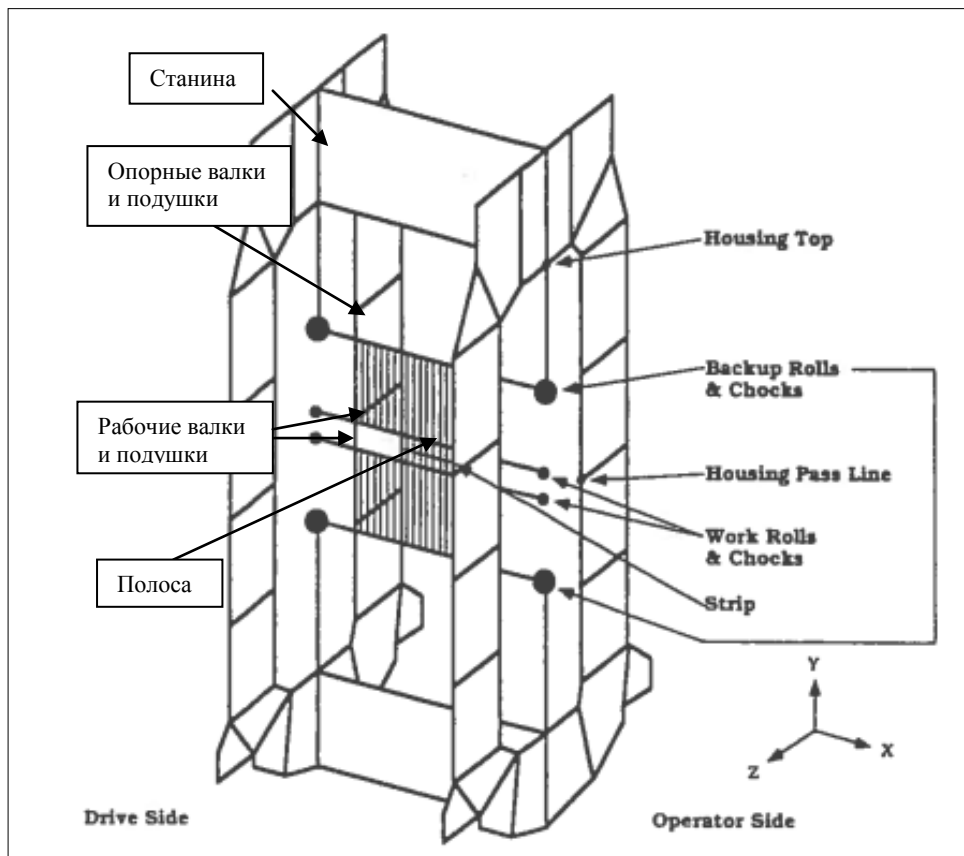


Рис. 3. Конечно-элементная модель четырехвалковой клетки стана  
Fig. 3. Finite element model of a four-roll mill crate

С использованием этой модели получены первые 40 собственных частот и форм колебаний клетки стана (рис. 4). Наименьшая частота равна 16,9 Гц, наивысшая, сороковая, – 667,4 Гц. Эти формы колебаний могут включать в себя как изгибные, так и крутильные пространственные колебания. В диапазоне от 106,1 до 113,0 Гц совершают колебания только рабочие валки.

Конечно-элементные модели позволяют определять собственные формы и частоты колебаний сложных линейных систем, но при работе с ними возникают большие проблемы при исследовании нелинейных колебаний и режимов автоколебаний. Поэтому в случае нелинейных задач в прокатном производстве используют упрощенные модели, в которых 4-массовую колебательную систему клетки превращают в двухмассовую или даже одномассовую систему [18] (рис. 5).

Нелинейную одномассовую систему можно записать в виде уравнения Ван дер Поля [19]. Задавая параметры жесткости и демпфирования, полученные в эксперименте, можно проводить исследования устойчивости и условия появления автоколебаний клетки стана:

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \mu(1 - gy^2)\frac{dy}{dt} + y = 0. \quad (1)$$

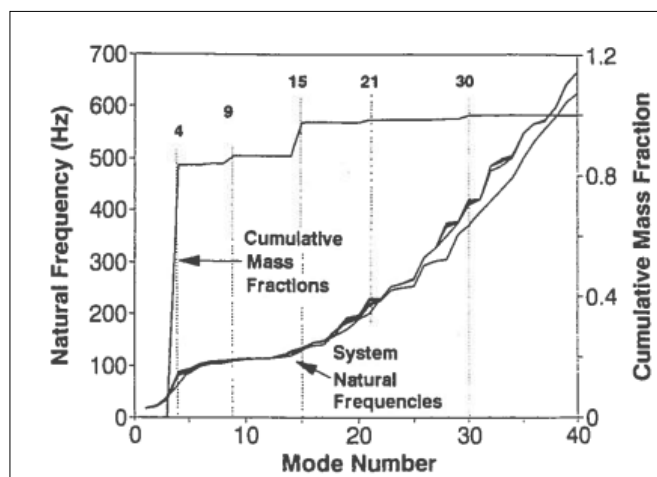


Рис. 4. Собственные частоты и формы колебаний  
Fig.4. Natural frequencies and waveforms

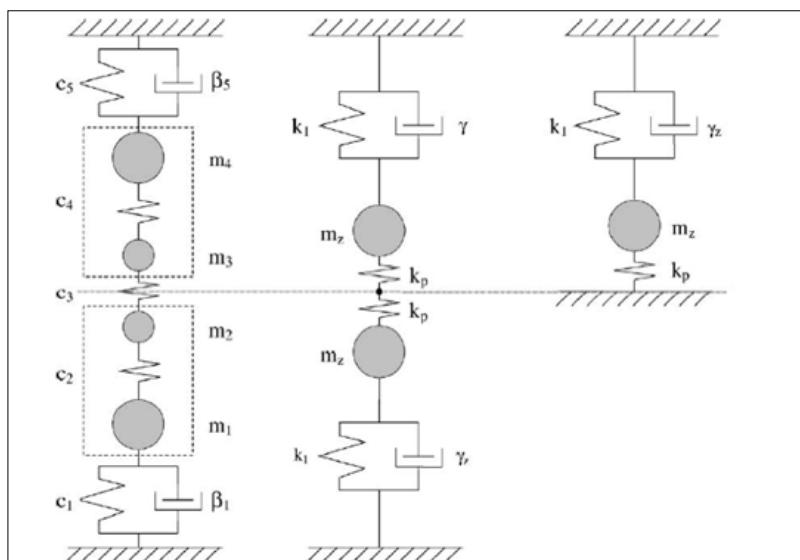


Рис. 5. Модель колебательного звена четырехвалкового прокатного стана  
Fig. 5. Model of the oscillating link of a four-roll rolling mill

### Промышленный эксперимент

На одноклетевых реверсивных станах поперечная ребристость возникает при одноклетевой прокатке непосредственно с разматывателя на правую моталку. Параметры колебаний одноклетьевого стана определялись в промышленном эксперименте с использованием беспроводной, мобильной системы вибродиагностики. Определены собственные частоты колебаний станины клетки. Частота первой формы – 108 Гц. В спектре присутствуют гармоники до 7-й включительно. Собственная частота разматывателя определялась нестационарным методом [20, 21] с использованием виброаппаратуры фирмы ДИАМЕХ и вибратором в диапазоне частот вращения от 300 до 5000 об/мин. Собственная частота прижимного ролика разматывателя получена экспериментально: ДИАМЕХ – 17 Гц, вибратор – 14–15 Гц, мобильная система диагностики – 11 Гц.

Наиболее эффективным является непрерывный контроль уровня вибрации в процессе работы стана. При заправке очередного рулона по технологии прокатываемая полоса прижимается к специальному столику прижимным роликом. При этом происходит удар по полосе. На рис. 6 всплески уровня вибрации соответствуют работе прижимного ролика при заправке полосы. При этом сам разматыватель и прижимной ролик совершают затухающие колебания (рис. 7).

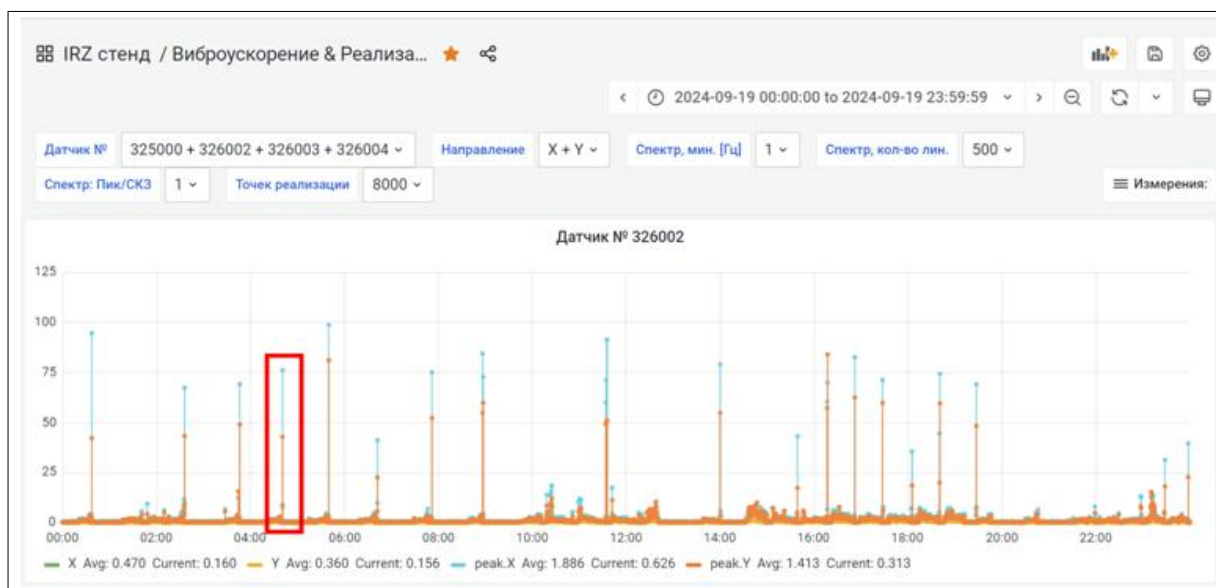


Рис. 6. Виброускорения стана при прокатывании тонкого листа  
Fig. 6. Vibration acceleration of the mill during rolling of a thin sheet

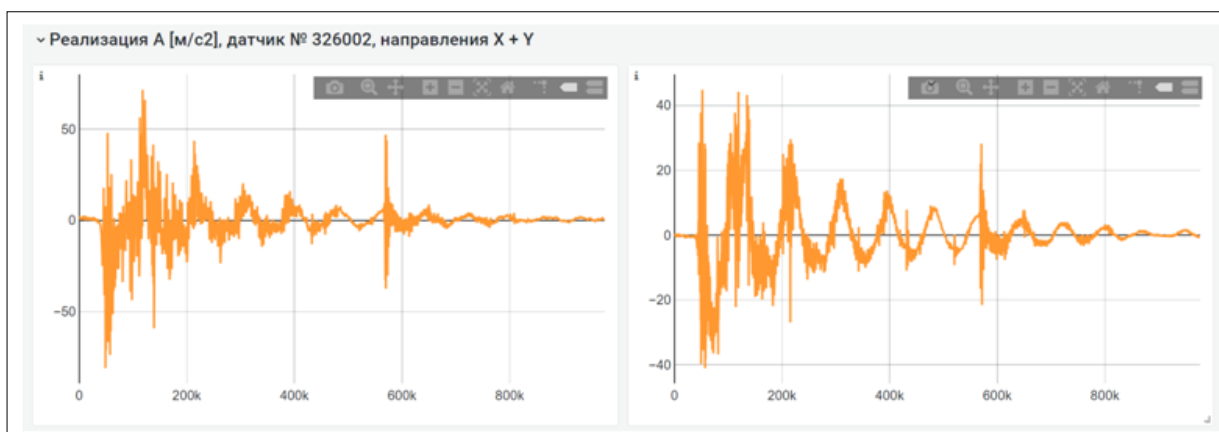


Рис. 7. Затухающие колебания прижимного ролика разматывателя при заправке полосы перед прокаткой  
Fig. 7. Damping vibrations of the decoiler pressure roller when refilling the strip before rolling

Затухающие колебания не являются одночастотными и гармоническими. Сигнал содержит кроме основной также и дополнительные гармоники, и шумовую составляющую. На рис. 8 приведена спектральная характеристика виброускорений разматывателя при заправке рулона перед прокаткой. Как видно из рис. 8, в диапазоне до 500 Гц присутствует широкий спектр частот. Но ярко выраженной является первая гармоника с частотой 11 Гц.

Автоколебания возникают, как правило, после перевалки и продолжаются до следующей перевалки. За это время прокатывают до 10 рулонов, т. е. порядка 10 независимых экспериментов. В соответствии со стандартом ГОСТ10816 нормальный уровень вибрации не должен превышать 4,5 мм/с. Предельно допустимое значение виброскорости должно быть не выше 11,2 мм/с. На самом деле уровень виброскорости во время автоколебаний может достигать 100–120 мм/с. На рис. 9 уровни вибрации, превышающие допустимый уровень, выделены цветом.

Реализация виброускорений в горизонтальном и вертикальном направлениях имеет ярко выраженный релаксационный характер (рис. 10).

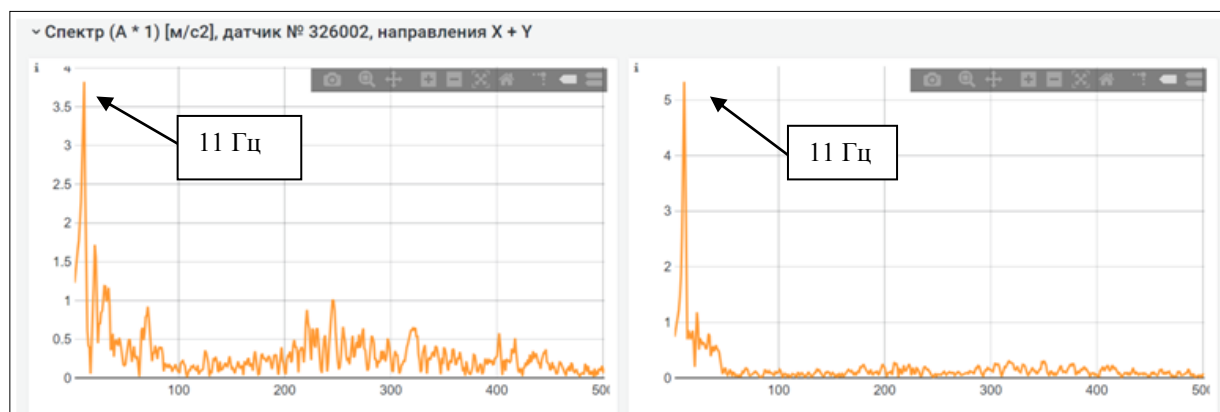


Рис. 8. Спектральная характеристика виброускорений размотывателя при заправке рулона перед прокаткой  
Fig. 8. Spectral characteristic of vibration accelerations of the uncoiler when filling the roll before rolling

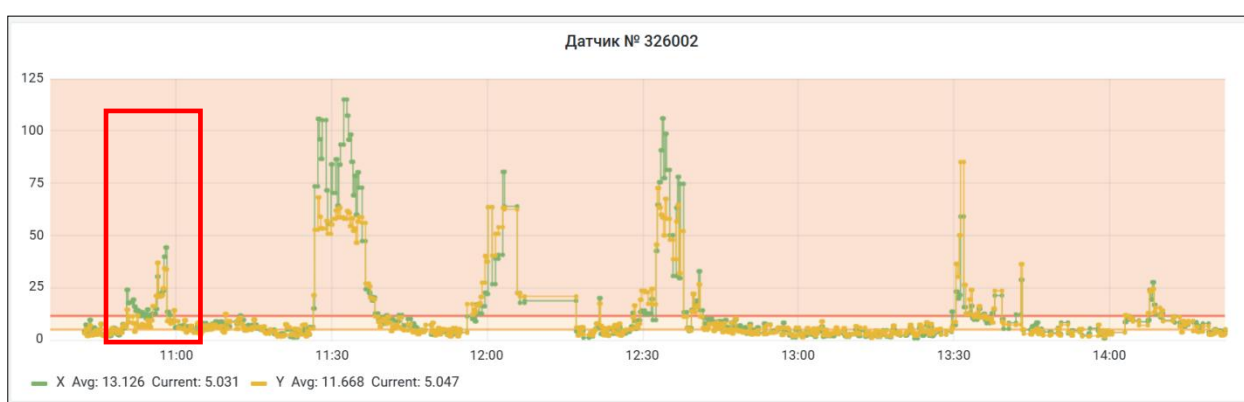


Рис. 9. Виброскорость размотывателя в режиме автоколебаний  
Fig. 9. Vibration velocity of the uncoiler in self-oscillation mode

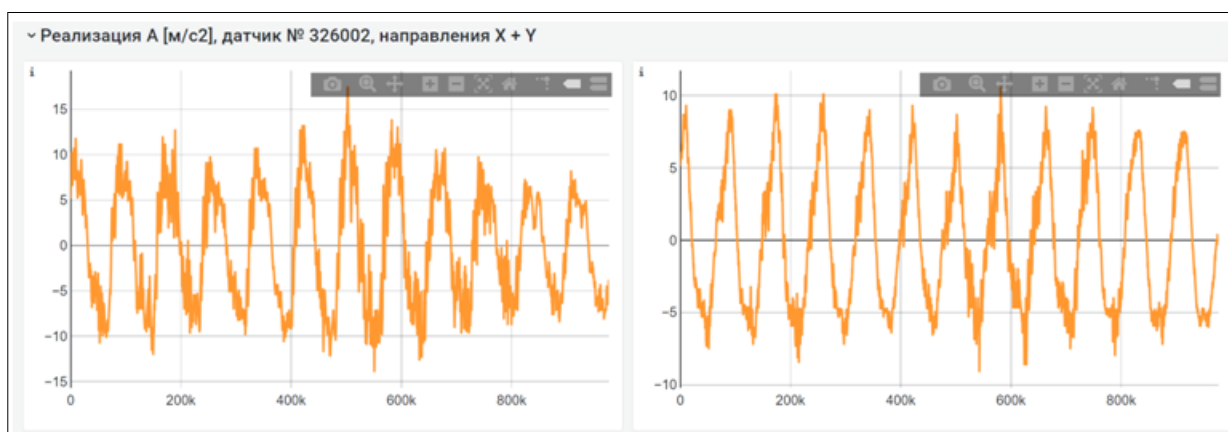


Рис. 10. Реализация виброускорения в горизонтальном и вертикальном направлениях в режиме автоколебаний  
Fig. 10. Implementation of vibration acceleration in horizontal and vertical directions in self-oscillation mode

Основная частота автоколебаний размотывателя – 11 Гц – полностью совпадает с частотой первой формы колебаний, полученной экспериментально в виде затухающих колебаний. В спектре также присутствуют вторая и третья гармоники – 20 и 30 Гц (рис. 11).

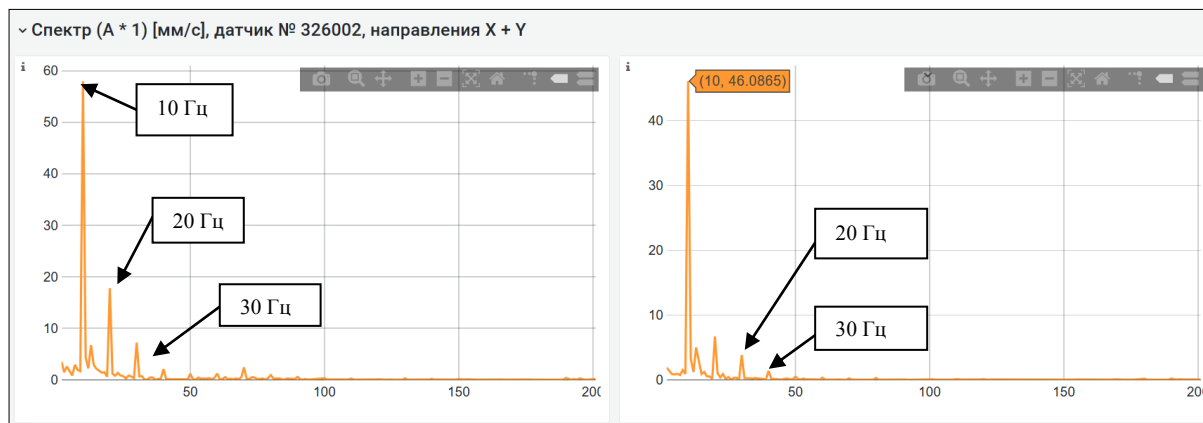


Рис. 11. Спектральная характеристика виброскорости в горизонтальном и вертикальном направлениях  
Fig. 11. Spectral characteristics of vibration velocity in horizontal and vertical directions

Совместно с виброконтролем проводился и контроль технологических параметров с использованием сигналов АСУ ТП стана прокатки. Контролировалась частота вращения рабочих валков, скорость полосы на входе в клет, натяжение полосы, колебание усилия прокатки и изменение толщины прокатываемой полосы в режиме автоколебаний.

В промышленном эксперименте при резком изменении частоты вращения рабочих валков от 210 до 170 об/мин (от 3,5 до 2,8 Гц) (рис. 12) удалось зафиксировать изменение частоты колебаний усилия прокатки, натяжения, скорости прокатывания полосы и, наконец, толщины полосы. Частоты колебаний в три раза выше частоты вращения рабочих валков (см. рис. 12).



Рис. 12. Частота вращения рабочего вала  
Fig. 12. The speed of rotation of the working roller

В течение 3 секунд частота колебаний скорости проката и частота изменения толщины полосы меняется от 8 до 10 Гц. При этом меняется и амплитуда колебаний. С ростом частоты амплитуда увеличивается (рис. 13, 14).



Рис. 13. Скорость полосы на входе, м/мин  
Fig. 13. The speed of the strip at the entrance



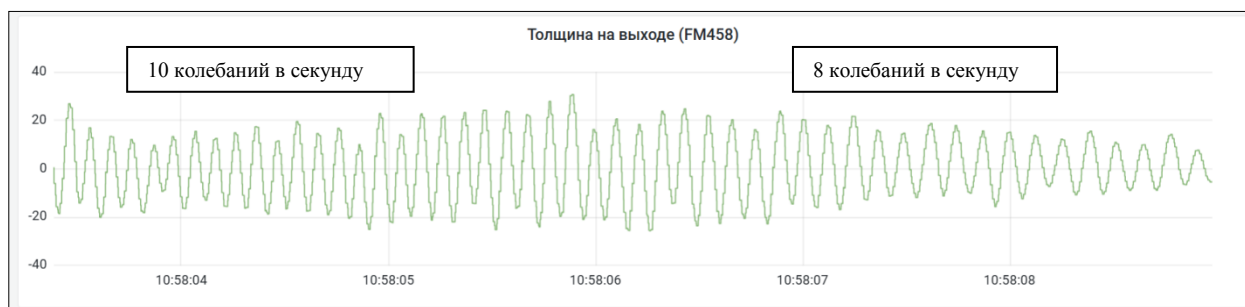


Рис. 14. Толщина полосы в зависимости от времени (поперечная ребристость), мкм

Fig. 14. Strip thickness as a function of time (transverse ribbing), mkm

### Нелинейная модель

В качестве модели четырехвалковой клетки и разматывателя одноклетьевого реверсивного стана будем использовать одномассовую нелинейную колебательную систему, записанную в форме уравнения Ван дер Поля [22]:

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \mu(1 - by - gy^2) \frac{dy}{dt} + y = U \sin \Omega t. \quad (2)$$

Это безразмерное уравнение с собственной частотой систем, равной единице, и внешним возбуждением. Амплитуда  $U = 1$ . Рассмотрим три варианта частоты возбуждения  $\Omega$ .

1. Частота внешнего возбуждения незначительно отличается от собственной частоты колебательной системы:  $\Omega = 1,2$ .
2. Частота внешнего возбуждения равна  $\Omega = 1,5$ .
3. Частота внешнего возбуждения превосходит частоту собственных колебаний в два раза:  $\Omega = 2,0$ .

Параметры нелинейной части уравнения (2) зададим следующим образом:  $\mu = 0,1$ ,  $b = 0,5$ ,  $g = 1$ .

Решение уравнения (2) предложено в монографии [23], первое издание 1937 год. Использовался метод Адамса или метод Рунге. В настоящее время также используется метод Рунге – Кутты. Отличие в том, что расчет производится не вручную, а с использованием ЭВМ и пакета MathCAD.

Записываем уравнение (2) в виде

$$F(t, y) = \left[ \mu \cdot [1 - b \cdot y_1 - g \cdot (y_1)^2] \cdot y_2 - y_1 + U \cdot \sin(\Omega \cdot t) \right]. \quad (3)$$

Вызываем решатель Рунге – Кутты:

$$Z = \text{rkfixed}(y, 0, 100, 1001, F) \quad (4)$$

и получаем решение для трех вариантов (рис. 15–17).

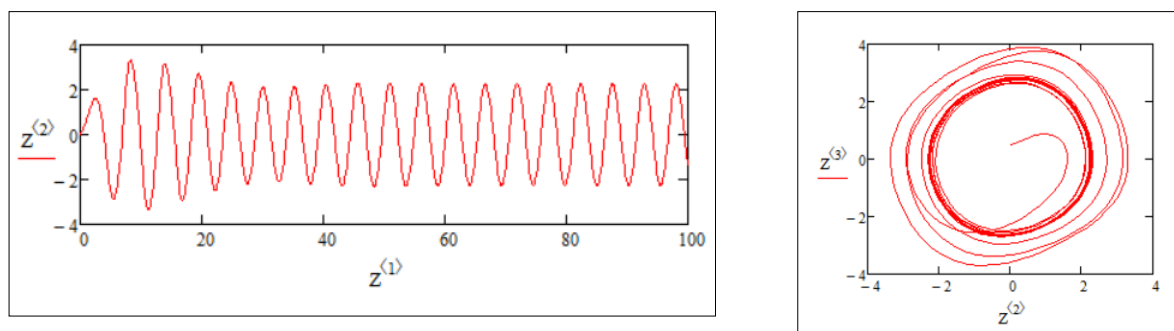


Рис. 15. Реализация и предельный цикл при  $\Omega = 1,2$

Fig. 15. Implementation and limit cycle at  $\Omega = 1.2$

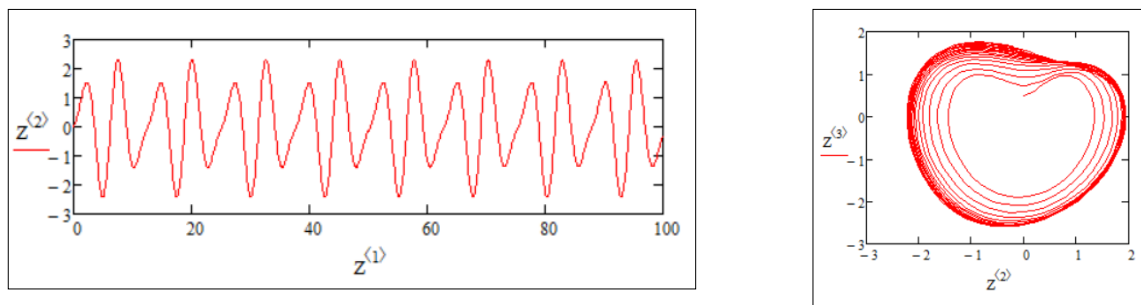


Рис. 16. Реализация и предельный цикл при  $\Omega = 1,5$

Fig. 16. Implementation and limit cycle at  $\Omega = 1.5$

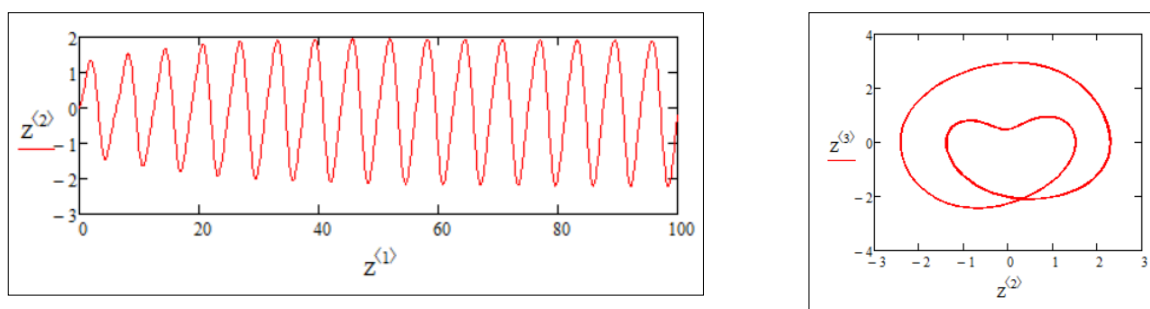


Рис. 17. Реализация и предельный цикл при  $\Omega = 2,0$

Fig. 17. Implementation and limit cycle at  $\Omega = 2.0$

При  $\Omega = 1,2$  частота автоколебаний становится равной частоте внешнего возбуждения. При увеличении частоты сигнала внешнего возбуждения в полтора раза,  $\Omega = 1,5$ , колебательная система совершает почти периодические колебания с частотой внешнего воздействия и собственной частотой автоколебаний. Если частота внешнего возбуждения превышает частоту собственных колебаний в два раза,  $\Omega = 2,0$  колебательная система переходит в режим автоколебаний с частотой собственных колебаний.

#### Выводы

1. Экспериментально определены частоты первой формы колебаний прижимного ролика разматывателя и станины клетки реверсивного стана холодной прокатки.
2. Вынуждающая периодическая сила на оборотной частоте, которая формируется рабочими валками на клетки, приводит к возникновению автоколебаний разматывателя на частоте, втрое превышающей частоту вращения.
3. Построена нелинейная модель разматывателя и клетки стана. Определены условия и частоты внешнего возбуждения, при которых происходит синхронизация или возникают почти периодические колебания элементов стана.

#### Список литературы

1. Автоколебания в стане холодной прокатки / Г.Э. Аркулис, З.М. Шварцман и др. // Сталь. 1972. № 8. С. 727–728.
2. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов / Э.А. Гарбер, В.П. Наумченко и др. // Производство проката. 2003. Т. 1. С. 10–12.
3. Characteristic recognition of chatter mark vibration in a rolling mill based on non-dimensional parameters of the vibration signal / S. Yimin, De Xiao, Yu. Yilin, K. Mechefske Chris, Z. Chen // Journal of Mechanical Science and Technology. 2014. Vol. 28(6). P. 2075–2080. DOI: 10.1007/s12206-014-0106-6
4. Система обнаружения признаков развития «чаттера» и своевременной коррекции технологического режима непрерывной холодной прокатки полос / И.Ю. Приходько, П.В. Крот, Е.А. Парсенюк и др. // Труды VII Конгресса прокатчиков. М., 2007. Т. 1. С. 115–123.

5. Niroomand M.R., Forouzan M.R., Salimi M. Theoretical and experimental analysis of chatter in tandem cold rolling mills based on wave propagation theory // [J]. ISIJ Int. 2015. Vol. 55(3). P. 637–646. DOI: 10.2355/isijinternational.55.637
6. Kozhevnikova A.V., Yusupov V.S. Methodology of Designing Cold Rolling Technology Preventing Vibrations on Rolling Mills // Steel in Translation. 2021. Vol. 51, no. 5. P. 330–334. DOI: 10.3103/S0967091221050065
7. High-speed rolling by hybrid-lubrication system in tandem cold rolling mills / Y. Kimura, N. Fujita, Y. Matsubara et al. // J. Mater Process Technol. 2015. Vol. 21(6). P. 357–368. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.002
8. Vibration characteristics of multi-parametric excitations and multi-frequency external excitations of rolling mill under entry thickness fluctuation of strip / T. Xu, D.X. Hou, Z.N. Sun, D.W. Guo // J. Iron Steel Res. 2020. Vol. 27(5). P. 517–527. DOI: 10.1007/s42243-020-00404-1
9. Heidari A., Forozan R., Akbarzadeh S. Development of a Rolling Chatter Model Considering Unsteady Lubrication // ISIJ International. 2014. Vol. 54, no. 1. P. 165–170.
10. Characteristic recognition of chatter mark vibration in a rolling mill based on the non-dimensional parameters of the vibration signal / Y. Shao, X. Deng, Y. Yuan et al. // J Mech Sci Technol. 2014. Vol. 28(6). P. 2075–2080. DOI: 10.1007/s12206-014-0106-6
11. 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
12. Автоколебания клетей стана тандема холодной прокатки 2000 Магнитогорского металлургического комбината / М.Л. Краснов, П.Л. Качурин, С.Г. Вишняков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2023. Т. 23, № 1. С. 19–29. DOI: 10.14529/engin230102.
13. Повышение качества поверхности листовой стали на основе новых решений в теории холодной прокатки / Э.А. Гарбер, С.И. Павлов, И.А. Кожевников и др. // Вестник Череповецкого государственного университета. Металлургия. 2010. Вып. 2. С. 116–126.
14. Heidari A., Forozan R., Akbarzadeh S. Effect of Friction on Tandem Cold Rolling Mills Chattering // ISIJ International. 2014. Vol. 54(10). P. 2349–2356. DOI: 10.1007/s42243-020-00404-1
15. Niroomand M.R., Forouzan M.R., Salimi M., Shojaei H. Experimental Investigations and ALE Finite Element Method Analysis of Chatter in Cold Strip Rolling // ISIJ International. 2012. Vol. 52, no. 12, pp. 2245–2253.
16. 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). 031001–031001. DOI: 10.1115/1.4024032
17. Guo R.M., Urso A.C., Schunk J.H. Analysis of chatter vibration phenomena of rolling mills using finite element methods // Iron & Steel Technology. 1993. Vol. 70 (1). P. 29–39.
18. Swiatoniowski A., Bar A. Parametrical excitement vibration in tandem mills – mathematical model and its analysis // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 134. P. 214–224.
19. B. van der Pol. On “relaxation-oscillations” // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1926. No. 7 (2). P. 978–992.
20. Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В. Использование вейвлет-анализа свободных колебаний при оценке характеристик демпфирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2004. Т. 6, № 2. С. 354–363.
21. RU 2 531 845(13) C1 Способ определения логарифмических декрементов колебаний по ширине резонанса равноинтенсивных колебаний / автор Ю.Я. Бетковский, патентообладатель ОАО «ГМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка». Опубликовано: 27.10.2014. Бюл. № 30.
22. Анищенко В.С., Николаев С.М., Кортис Ю. Механизмы синхронизации резонансного предельного цикла на двухмерном роторе // Нелинейная динамика. 2008. Т. 4, № 1. С. 3–56.
23. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 568 с.

## References

1. Arkulis G.E., Shvartsman Z.M. et al. Self-oscillations in a cold rolling mill. *Steel*, 1972, no. 8, pp. 727–728. (In Russ.)
2. Garber E.A., Naumchenko V.P. et al. Investigation of the causes of vibrations in the cages of continuous rolling mills. *Production of rolled products*, 2003, vol. 1, pp. 10–12. (In Russ.)
3. Yimin Shao, Xiao De, Yilin Yuan, Mechevske K. Chris, Chen Z. 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), pp. 2075–2080. DOI: 10.1007/s12206-014-0106-6
4. Prikhodko I.Y., 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 mode of continuous cold rolling of strips. *Proceedings of the VII Congress of Distributors*. Moscow, 2007, vol. 1, pp. 115–123. (In Russ.)
5. Niroomand M.R., Forouzan M.R., Salimi M. Theoretical and experimental analysis of chatter in tandem cold rolling mills based on wave propagation theory. *[J]. ISIJ Int.*, 2015, vol. 55(3), pp. 637–646. DOI: 10.2355/isijinternational.55.637
6. Kozhevnikova A.V., Yusupov V.S. Methodology of Designing Cold Rolling Technology Preventing Vibrations on Rolling Mills. *Steel in Translation*, 2021, vol. 51, no. 5, pp. 330–334. DOI: 10.3103/S0967091221050065
7. 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), pp. 357–368. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.002
8. Xu T., Hou D.X., Sun Z.N., Guo D.W. Vibration characteristics of multi-parametric excitations and multi-frequency external excitations of rolling mill under entry thickness fluctuation of strip. *J. Iron Steel Res*, 2020, vol. 27(5), pp. 517–527. DOI: 10.1007/s42243-020-00404-1
9. Heidari A., Forouzan M.R., Akbarzadeh S. Development of a Rolling Chatter Model Considering Unsteady Lubrication. *ISIJ International*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 165–170.
10. Shao Y., Deng X., Yuan Y., Mechevske CK., Chen Z. Characteristic recognition of chatter mark vibration in a rolling mill based on the non-dimensional parameters of the vibration signal. *J Mech Sci Technol.*, 2014, vol. 28(6), pp. 2075–2080. DOI: 10.1007/s12206-014-0106-6
11. 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), pp. 1581–1589. DOI: 10.1007/s12206-015-0330-8
12. Krasnov M.L., Kachurin P.L., Vishnyakov S.G., Savchenko Yu.I., Vasilyev V.A., Ivanov A.I., Nitskiy A.Yu. Chatter of the stands of the cold Rolling tandem mill 2000 of the Magnitogorsk Iron and Steel Works. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 19–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin230102
13. Garber E.F., Pavlov S.I., Kozhevnikov I.A., Timofeeva M.A., Kuznetsov V.V. Improving the surface quality of sheet steel based on new solutions in the theory of cold rolling. *Bulletin of Cherepovets State University. Metallurgy*, 2010, iss. 2, pp. 116–126. (In Russ.)
14. Heidari A., Forouzan R., Akbarzadeh S. Effect of Friction on Tandem Cold Rolling Mills Chattering. *ISIJ International*, 2014, vol. 54(10), pp. 2349–2356. DOI: 10.1007/s42243-020-00404-1
15. Niromand M. R., Forouzan M. R., Salimi M., Shojaei H. Experimental Investigations and ALE Finite Element Method Analysis of Chatter in Cold Strip Rolling. *ISIJ International*, 2012, vol. 52, no. 12, pp. 2245–2253.
16. 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). 031001–031001. DOI: 10.1115/1.4024032
17. Guo R.M., Urso A. C., Schunk J. H. Analysis of chatter vibration phenomena of rolling mills using finite element methods. *Iron & Steel Technology*, 1993, vol. 70 (1), pp. 29–39.
18. Swiatoniowski A., Bar A. Parametrical excitement vibration in tandem mills – mathematical model and its analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 134, pp. 214–224.
19. B. van der Pol, On “relaxation-oscillations”, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1926, no. 7 (2), pp. 978–992.

20. Prokofiev A.B., Shakhmatov E.V. The use of wavelet analysis of free oscillations in the assessment of damping characteristics. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2004, vol. 6, no. 2, pp. 354–363 (In Russ.)

21. Betkovsky Yu.Ya. *Sposob opredeleniya logarifmicheskikh dekrementov kolebaniy po shirine rezonansa ravnointensivnykh kolebaniy* [A method for determining logarithmic decrements of oscillations based on the resonance width of equal-intensity oscillations]. Patent RU 2 531 845(13) C1 has been published: 10/27/2014 Byul. No. 30.

22. Anishchenko V.S., Kortis Y. Mechanisms of synchronization of the resonant limit cycle on a two-dimensional rotor. *Nonlinear Dynamics*, 2008, vol. 4, no. 1, pp. 39–56. (In Russ.)

23. Andronov A.A., Witt A.A., Khaykin S.E. *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]. Moscow, 1981. 568 p.

#### ***Информация об авторах***

**Комаров Алексей Валерьевич**, студент магистратуры, Высшая школа системного инжиниринга, Московский физико-технический институт, Москва, Россия; Komarov\_av@nlmk.com

**Большиков Иван Георгиевич**, начальник ремонтного управления ООО «ВИЗ-Сталь», Екатеринбург, Россия; bolshekov\_ig@nlmk.com

**Васильев Виталий Альбертович**, кандидат технических наук, заместитель директора, ООО НТЦ «СИГМА», Челябинск, Россия; vasilyev-va@list.ru

**Смирнова Мария Александровна**, старший преподаватель кафедры «Физика», Магнитогорский государственный технический университет им. Н.И. Носова, Магнитогорск, Россия; smirnova\_ma@mail.ru

#### ***Information about the authors***

**Alexey V. Komarov**, Master's Degree student at Higher School of System Engineering, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia; Komarov\_av@nlmk.com

**Ivan G. Bolshekov**, Head of the Repair Department, VIS Steel LLC, Yekaterinburg, Russia; bolshekov\_ig@nlmk.com

**Vitaly A. Vasiliev**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director, SIGMA Scientific and Technical Center, Chelyabinsk, Russia; vasilyev-va@list.ru

**Maria A. Smirnova**, Senior Lecturer at the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; smirnova\_ma@mail.ru

***Статья поступила в редакцию 10.03.2025; принята к публикации 11.03.2025.***

***The article was submitted 10.03.2025; accepted for publication 11.03.2025.***