

Вестник Череповецкого государственного университета. 2025. № 5 (128). С. 41–53.
Cherepovets State University Bulletin, 2025, no. 5 (128), pp. 41–53.

Научная статья

УДК 62

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2025-5-128-4>

<https://elibrary.ru/dxjwfy>

Система бесконтактного измерения скорости проката на основе метода корреляционного анализа изображений

Владимир Васильевич Мухин¹, Родион Сергеевич Пылев²,
Константин Аркадьевич Харахнин³

^{1, 2, 3} Череповецкий государственный университет,
Череповец, Россия

¹ mukhin@chsu.ru

² rspylev@chsu.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4424-5472>

³ kakharakhnin@chsu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4532-286X>

Аннотация. Данная статья посвящена разработке системы измерения скорости движущейся полосы в стане бесконечной холодной прокатки. Применен алгоритм оценки сходства изображений на основе корреляционного метода и быстрого преобразования Фурье. Продемонстрирована функциональная схема системы измерения скорости движущейся полосы и результаты работы алгоритма. В статье последовательно показано (математическими формулами и визуальным материалом), как предлагается использовать машинное зрение для решения технических сложностей в процессе прокатного производства. Результаты применения указанного алгоритма демонстрируют работоспособность функциональной системы движущейся полосы проката металла, указаны числовые значения, полученные в ходе исследования.

Ключевые слова: корреляционный анализ, сравнение изображений, техническое зрение, скорость проката, стан холодной прокатки, алгоритм

Для цитирования: *Харахнин К. А., Пылев Р. С., Мухин В. В.* Система бесконтактного измерения скорости проката на основе метода корреляционного анализа изображений // Вестник Череповецкого государственного университета. 2025. № 5 (128). С. 41–53. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2025-5-128-4>; EDN: DXJWFY

A system for contactless measurement of rolling speed based on the image correlation analysis method

Vladimir V. Mukhin¹, Rodion S. Pylev², Konstantin A. Kharakhnin³

^{1, 2, 3}Cherepovets State University,

Cherepovets, Russia

¹mukhin@chsu.ru

²rspylev@chsu.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4424-5472>

³kakharakhnin@chsu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4532-286X>

Abstract. This article considers the development of the system for measuring the speed of a moving strip in an endless cold rolling mill. The authors apply an algorithm for estimating image similarity based on the correlation method and fast Fourier transform; demonstrate the functional scheme of the system for measuring the speed of a moving strip and the results of the algorithm. The article successively shows (by mathematical formulas and visual material) how it is proposed to use machine vision to solve technical difficulties in the rolling production process. The results of the algorithm application demonstrate the operability of the functional system of the metal strip; the numerical values obtained during the study are also indicated.

Keywords: correlation analysis, comparison of images, machine vision, rolling speed, cold rolling mill, algorithm

For citation: Kharakhnin K. A., Pylev R. S., Mukhin V. V. A system for contactless measurement of rolling speed based on the image correlation analysis method. *Cherepovets State University Bulletin*, 2025, no. 5 (128), pp. 7–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2025-5-128-4>; EDN: DXJWFY

Введение

Измерение скорости и длины в производственных процессах, таких как холоднокатаная полоса стана бесконечной холодной прокатки, играет ключевую роль в обеспечении качества, сокращении расхода материала и важно для предотвращения аварийных ситуаций. Например, в процессе проката необходимо контролировать скорость перемещения, чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузки на валки и предотвратить образование дефектов на поверхности металла, а также избежать колебаний натяжения и деформации, что может привести к обрывам полосы и остановке стана. Это критично для обеспечения непрерывности производственного процесса и минимизации простоев.

Контактный метод измерения скорости проката обычно включает в себя использование датчиков, которые физически взаимодействуют с поверхностью металла. Одним из распространенных методов является использование импульсных датчиков с контактными роликами, который соприкасается с полосой и измеряет скорость на основе частоты импульсов, генерируемых при движении проката. Скорость проката рассчитывается на основе частоты импульсов и известной длины ролика. К недостаткам данного метода можно отнести наличие механических компонентов, проскальзывание ролика по поверхности изделия и износ мерительного колеса. Погрешность таких приборов может варьироваться в зависимости от условий эксплуа-

тации и в среднем составляет 1 %¹. Также они часто требуют регулярной калибровки и могут быть чувствительны к внешним факторам, таким как температура и влажность. Из-за указанных недостатков все большее распространение получают бесконтактные методы измерения параметров скорости и длины проката.

Бесконтактное измерение решает проблемы, связанные с контактными методами. Лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС)² представляет собой технологию бесконтактного измерения, основанную на интерферометре, однако она является дорогостоящей из-за необходимости использования специальных оптических элементов. Кроме того, ЛДИС подвержен «выпадению»³ сигнала, и время отклика ограничено усреднением для предотвращения этого эффекта. Это делает его чувствительным к вибрациям окружающей среды и неспособным отслеживать высокие ускорения объекта, что объясняет его ограниченное распространение.

Бесконтактный метод измерения скорости проката на основе корреляционного анализа изображений обладает рядом важных преимуществ: он исключает контакт с поверхностью, что устраняет проскальзывание и износ, обеспечивая высокую точность (погрешность $\leq 0,5$ %) и надежность измерений⁴. Такие системы устойчивы к вибрациям, загрязнениям и изменению освещения, что позволяет использовать их в сложных производственных условиях.

Отсутствие доступных и универсальных средств измерения скорости проката, сочетающих высокую точность бесконтактных методов с простотой реализации, обуславливает перспективность разработки бесконтактного измерения скорости проката, лишенной недостатков контактных датчиков и ЛДИС, на основе метода корреляционного анализа изображений.

Основная часть

На кафедре киберфизических систем Череповецкого государственного университета разработана функциональная схема системы измерения скорости движения проката на основе определения сходства изображений корреляционным методом. Система предназначена для бесконтактного измерения скорости движения металлической полосы на стане бесконечной холодной прокатки с применением технологий компьютерного зрения. Схема системы представлена на рис. 1.

В непрерывной области взаимная корреляция $R(\tau)$ двух сигналов $f_1(t)$ и $f_2(t + \tau)$ рассчитывается по формуле (1):

¹ Гынгазова Г. С., Миляев Д. В., Ермошин Н. И. Разработка измерителя длины немагнитных протяженных изделий вихретоковым методом // Векторы благополучия: экономика и социум. 2013. №1 (7). С. 117–128.

² Бесконтактные датчики скорости и длины ИСД компании «Сенсорика-М» // Информатизация и системы управления в промышленности. 2022. № 6 (102). С. 61–63.

³ Аникин А., Федосейский А. Лазерные доплеровские измерители в системе учета горячего проката // Современные технологии автоматизации. 2007. №1. С. 24–28.

⁴ T. Wang Y. Yan L. Wang Y. Hu and S. Zhang Instantaneous Rotational Speed Measurement Using Image Correlation and Periodicity Determination Algorithms // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 69. No. 6. Pp. 2924–2937.

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_2(t + \tau) dt, \quad (1)$$

где τ – временная задержка; T – время интегрирования.

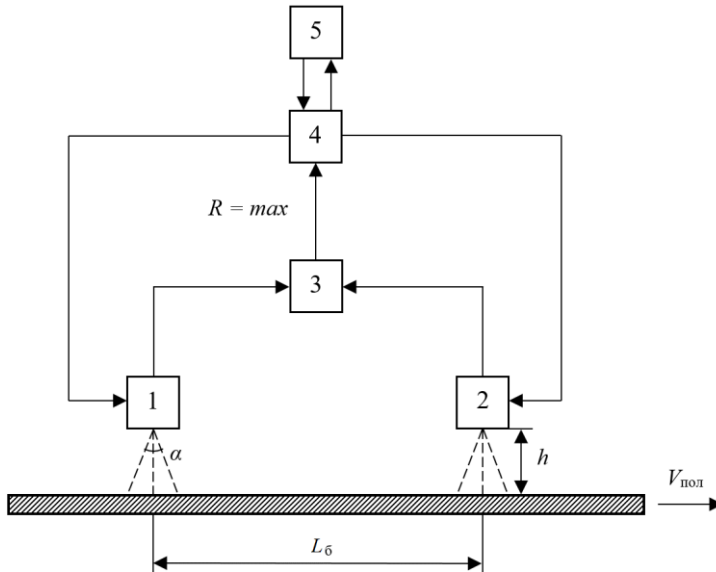


Рис. 1. Функциональная схема измерения скорости движения проката

На полосу проката, движущегося со скоростью $V_{\text{пол}}$, направлено две камеры (1) и (2) на фиксированном расстоянии $L_{\text{б}}$ одна от другой и на расстоянии h от поверхности металла. Они получают изображения поверхности проката и передают их в вычислительный блок (3). Из-за неоднородности поверхности металла, наличия на ней трещин, пятен и окалины изображения имеют характерные признаки, которые позволяют применять алгоритмы сравнения для вычисления их взаимной корреляции R . В блоке (3) рассчитываются коэффициенты корреляции, которые позволят определить степень и направление связи между двумя изображениями. При условии, что $R = \max$, на вычислительный блок (4) поступает сигнал о соответствии участков проката.

Поскольку вторая камера смещена относительно первой в направлении прокатки на расстояние $L_{\text{б}}$, то изображение, снятое первой камерой, повторится на второй через некоторое время t , фиксируемое с помощью таймера (5), прямо пропорциональное расстоянию $L_{\text{б}}$ между камерами и обратно пропорциональное скорости движения проката $V_{\text{пол}}$. В блоке (4) происходит вычисление текущей скорости v (м/с) движения проката по формуле (2):

$$V_{\text{пол}} = \frac{L_{\text{б}}}{t}, \quad (2)$$

где L_0 – расстояние между камерами, (м); t – время, зафиксированное таймером, (с).

С целью корректного измерения скорости движения проката и сопоставления изображений с двух камер необходимо обеспечить точное преобразование локальных координат пикселей в глобальные, связанные с геометрией полосы. Моделирование координат включает глобальные координаты, измеряемые относительно глобальной точки отсчета на полосе измеряемые в физических величинах (метрах), и локальные координаты, определяемые положением пикселей в изображении, полученном с камеры.

Для обеспечения рационального использования вычислительных ресурсов кадры с камер анализируются не полностью. Из изображения выделяется часть области захвата камеры – так называемая область интереса.

В глобальной системе координат изображение является зафиксированным камерой участком проката, имеющим физическую величину. Обозначим ширину и длину кадра как $B_{\text{кадр}}$ и $L_{\text{кадр}}$ соответственно и площадью $B_{\text{кадр}} \cdot L_{\text{кадр}}$. Размеры участка определяются по формуле (3):

$$L_{\text{кадр}} = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right), \quad (3)$$

где α – угол обзора видеокамеры по горизонтали.

На изображении фиксируют центральную часть стальной полосы с отступом от краев (см. рис. 2), равным половине разности ширины проката B и ширины кадра $B_{\text{кадр}}$. Это необходимо, чтобы минимизировать оптические искажения и исключить попадание в кадр посторонних объектов, так как в реальных условиях полоса проката может незначительно смещаться от центральной линии агрегата в процессе движения. В данном случае изображения имеют квадратную форму, то есть длина и ширина изображения одинакова $B_{\text{кадр}} = L_{\text{кадр}}$.

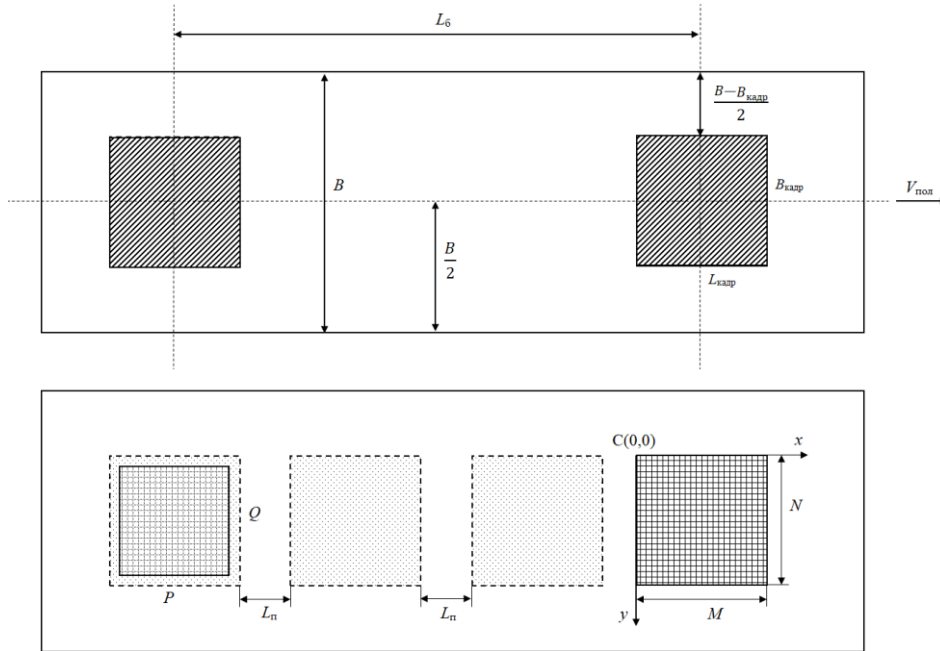


Рис. 2. Схема расположения участков съемки текущего и эталонного изображений

Расстояние, которое проходит полоса проката за время между последовательными кадрами камеры $L_{п}$, определяется выражением (4):

$$L_{п} = V_{пол} \cdot t_{п}, \quad (4)$$

где $t_{п}$ – интервал времени между кадрами (с), обратно пропорциональный частоте кадров камеры (f).

Величина $L_{п}$ показывает, на сколько метров смещается полоса за время, пока камера делает следующий снимок. Это необходимо учитывать, чтобы зафиксированный первой камерой участок гарантировано попал в кадр второй камеры. Для этого необходимо соблюдение условия $L_{п} < L_{кадр}$.

Скоростные режимы работы стана¹ 1700 ПХЛ создают ограничения для применяемого метода и оборудования. Так, для измерения скорости на участке проката на участке перед первой клетью при максимальной скорости полосы $V_{макс} = 5$ м/с, угле обзора камеры: $\alpha = 65$ град., частоте кадров 60 кадр/с, расстоянии до полосы $h = 1,3$ м, согласно формулам (3) и (4) $L_{п} = 0,084$ м, $L_{кадр} = 1,656$ м.

Взаимокорреляционная функция позволяет оценить сходство сигналов при различных временных сдвигах. Формула (1) была реализована в корреляционных экс-

¹ Харахнин К. А., Смыслова А. Л., Родин А. А. Оптимизация скоростных режимов работы стана бесконечной холодной прокатки в функции толщины подката // Вестник Череповецкого государственного университета. 2009. №3. С. 141–145.

тремальных системах, применяемых в металлургической промышленности для измерения скорости проката.

Разрабатываемая система не может использовать стандартную формулу, так как ее аппаратная часть основана на фотоэлектрических датчиках, пригодных для принятия одномерных входных сигналов, вследствие чего измеряется временной сдвиг двух сигналов. Изображения, полученные камерами, являются двумерными, потому измеряется не временной, а пространственный сдвиг двух изображений, однако принцип остается тем же – автоматическое слежение за максимумом взаимной корреляционной функции.

Корреляционная функция R для изображений имеет вид¹ (5):

$$R = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [I(x, y) - \bar{I}_{u,v}] \cdot [T(x-u, y-v) - \bar{T}]}{\sqrt{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [I(x, y) - \bar{I}_{u,v}]^2 \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [T(x-u, y-v) - \bar{T}]^2}}, \quad (5)$$

где $I(x, y)$ – значение яркости пикселей ТИ в координатах (x, y) ; $T(x-u, y-v)$ – значение яркости пикселей ЭИ при различных пространственных сдвигах (u, v) ; $\bar{I}_{u,v}$ – среднее значение яркости пикселей ТИ в области наложения ЭИ; \bar{T} – среднее значение яркости пикселей ЭИ.

Для реализации поставленной в данной работе задачи был предложен алгоритм оценки сходства изображений (см. рис. 3), новизна которого заключается в адаптации классического алгоритма нормированной взаимной корреляции с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) для решения задачи бесконтактного измерения скорости листового проката в условиях холодной прокатки.

¹ Yoo J. C., Han T. H. Fast Normalized Cross-Correlation // Circuits Syst Signal Process. 2009. Vol. 28. Pp. 819–843; Цветков О. В. Тананыкина Л. В. Метод предварительного кодирования изображений в корреляционно-экстремальных системах // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 5. С. 738–743.

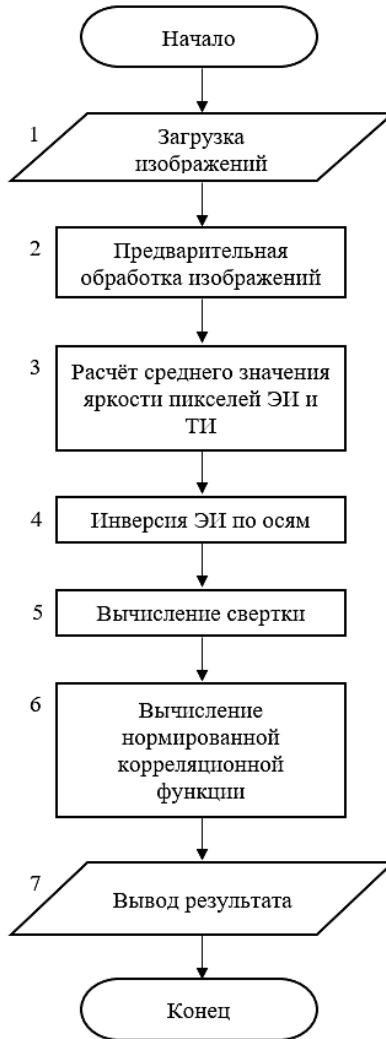


Рис. 3. Алгоритм оценки сходства изображений

В блоке 1 загружаются два изображения (ЭИ и ТИ). В блоке 2 они преобразуются в оттенки серого для упрощения вычислений. Это позволяет работать с одним цветовым каналом и уменьшает объем данных. Для корректного вычисления нормированной взаимной корреляции размерность ЭИ не должна превышать размерность ТИ.

В блоке 3 выполняется предварительный расчет среднего значения яркости пикселей ЭИ (\bar{T}) и ТИ ($\bar{I}_{u,v}$) в области наложения ЭИ.

Для каждого пикселя рассчитываются отклонения от среднего значения яркости и вычисляется сумма произведений этих отклонений между двумя изображениями.

В блоке 4 числитель рассчитывается через свертку и БПФ для сокращения времени расчетов. ЭИ инвертируется по осям $T(-x, -y)$. Это необходимо для корректного выполнения свертки, так как нормированная взаимная корреляция эквивалентна свертке с инвертируемым по осям ЭИ.

В блоке 5 вычисляется свертка двух сигналов в пространственной области, которая эквивалентна умножению их спектров в частотной области (6):

$$I * T = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}(I - \bar{I}_{u,v}) \cdot \mathcal{F}^*(T - \bar{T}) \}, \quad (6)$$

где $I * T$ – свертка ТИ и инвертируемого по осям ЭИ; \mathcal{F}^{-1} – обратное преобразование Фурье; $\mathcal{F}(I - \bar{I}_{u,v})$ – спектр ТИ; $\mathcal{F}^*(T - \bar{T})$ – комплексное сопряжение спектра ЭИ.

В блоке 6 вычисляется нормированная взаимная корреляция по формуле (5) для оценки сходства изображений.

На быстродействие расчетов напрямую влияет размер анализируемой области интереса на кадре и, следовательно, количество пикселей в ней.

На рис. 4 представлена зависимость затраченного на расчеты времени от количества пикселей ТИ образца стального листа размерностью ТИ 500×500, 400×400, 300×300, 200×200, 100×100, 50×50 пикселей. Размеры ЭИ представлены размерами ~85 % от ТИ.

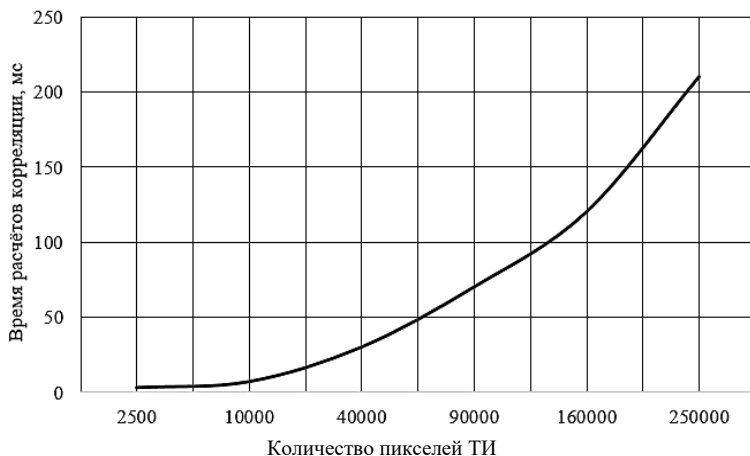


Рис. 4. Зависимость затраченного на расчеты времени от количества пикселей ТИ

Как видно из графика, время расчетов прямо пропорционально количеству пикселей изображения. Однако, если область интереса слишком мала, уникальные признаки участка могут быть потеряны, что приведет к ложным совпадениям. Для проверки работы алгоритма для области интереса была подобрана размерность 200×200 для ТИ и 160×160 для ЭИ, как показано на рис. 5.

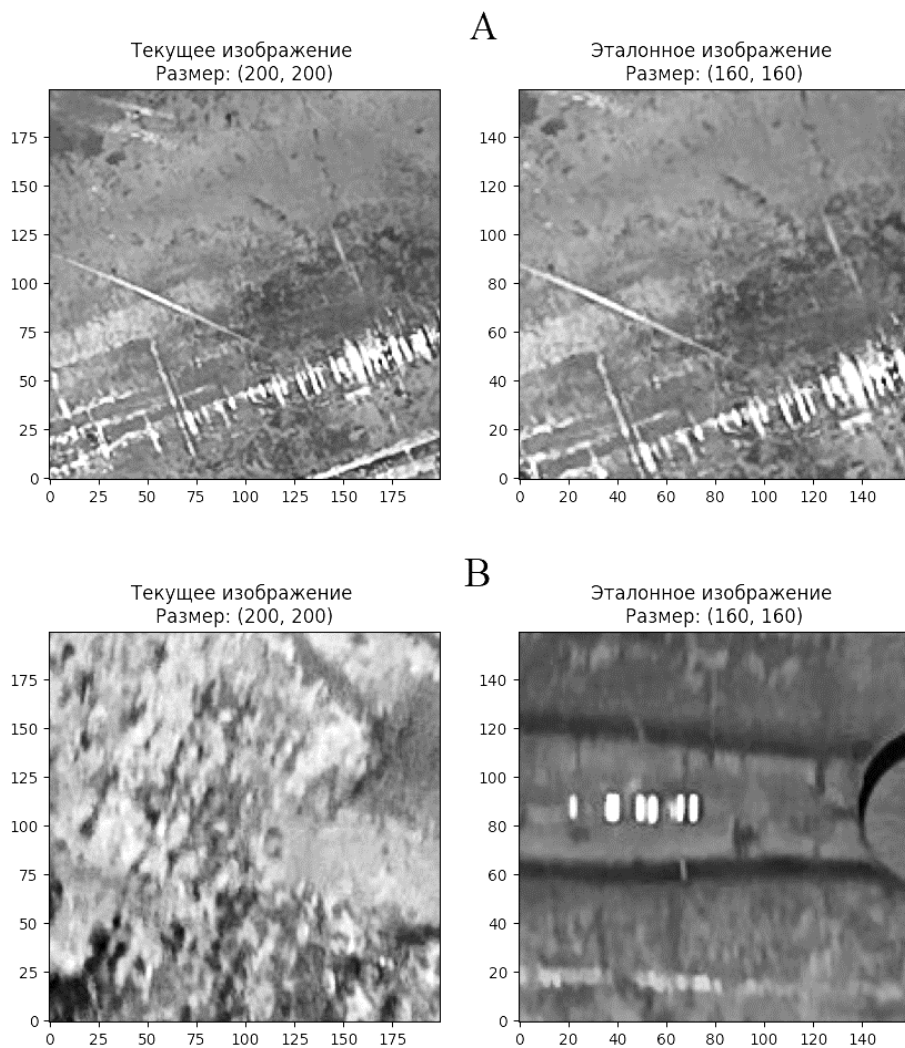


Рис. 5. Примеры ТИ и ЭИ одного участка (А) и двух различных участков (В)

Результаты работы алгоритма показаны на рис. 6.

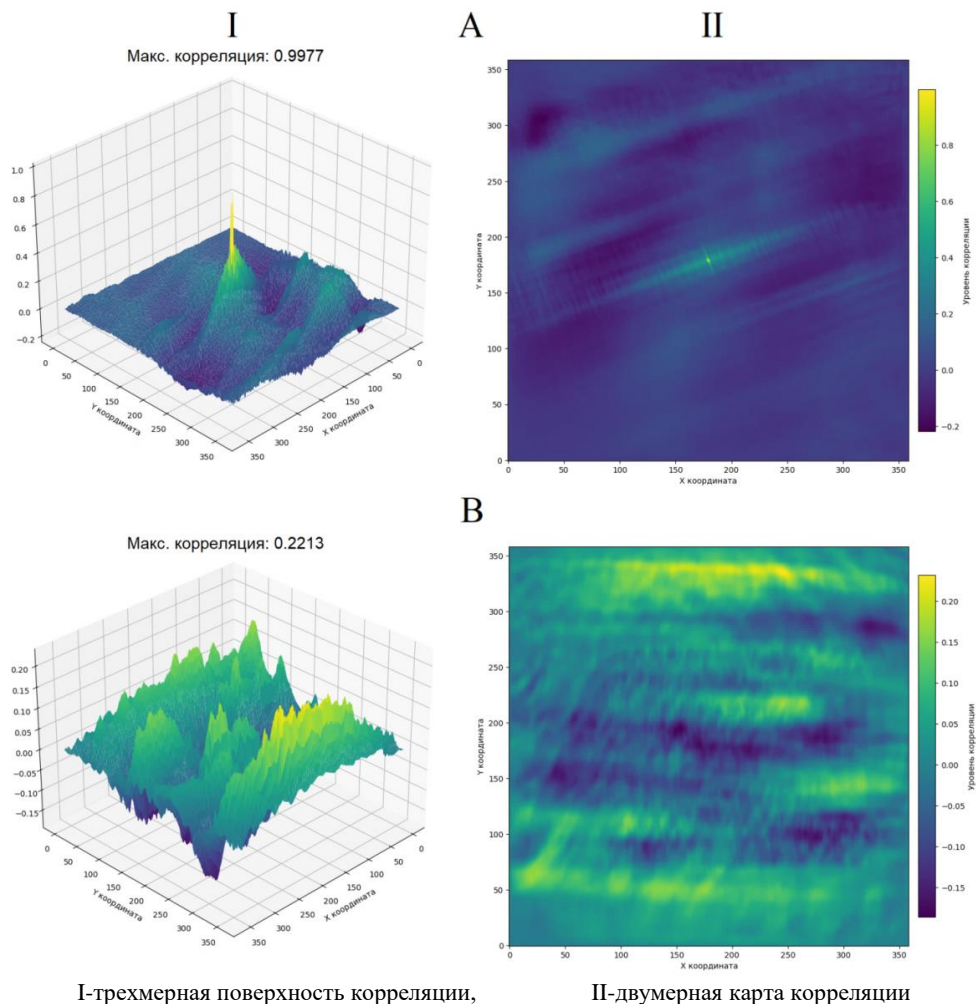


Рис. 6. Применение алгоритма для одного участка (А) и для различных участков (В)

Коэффициент нормированной взаимной корреляции принимает значения от -1 до $+1$. При этом значение -1 соответствует полной отрицательной корреляции, 0 – отсутствию корреляции и $+1$ – о полной положительной корреляции величин. Чем ближе значение корреляции к $+1$, тем сильнее связь между двумя изображениями¹. Этот показатель используется для оценки сходства между ЭИ и ТИ.

В процессе проверки алгоритма проведена серия тестов на репрезентативной выборке пар изображений поверхности проката. Для кадров, полученных с одного и

¹ Чертков В. М., Железняк В. К. Алгоритм определения меры схожести идентификационных образов закладных устройств // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. 2018. №4. С. 20–27.

того же участка, максимальное значение взаимной корреляции варьировалось в пределах 0,98–1, для различных участков максимальное значение не превышало 0,4.

Выводы

1. Разработана функциональная схема системы измерения скорости движущейся полосы на стане бесконечной холодной прокатки.
2. Предложен алгоритм на основе нормированной взаимной корреляции для оценки сходства изображений. Значения корреляции для идентичных участков проката составили 0,98–1, для различных участков значения не превышали 0,4.
3. В целях сокращения времени вычислений применено быстрое преобразование Фурье (БПФ) и подобраны размеры области интереса для текущего (200×200 пикселей) и эталонного (160×160 пикселей) изображений.
4. Система обеспечивает измерение скоростей 0,5–5 м/с с циклом обработки 154 мс.

Список литературы / References

Аникин А., Федосейский А. Лазерные доплеровские измерители в системе учета горячего проката. *Современные технологии автоматизации*, 2007, № 1, с. 24–28.

Anikin A., Fedoseiskii A. Laser doppler units in hot rolled stock metering system. *Modern automation technologies*, 2007, no. 1, pp. 24–28. (In Russ.)

Бесконтактные датчики скорости и длины ИСД компании «Сенсорика-М». *Информатизация и системы управления в промышленности*, 2022, № 6 (102), с. 61–63.

Non-contact speed and length ISD sensors of Sensorika-M company. *Informatisation and management systems in industry*, 2022, no. 6 (102), pp. 61–63. (In Russ.)

Гынгазова Г. С., Миляев Д. В., Ермошин Н. И. Разработка измерителя длины немагнитных протяженных изделий вихрековым методом. *Векторы благополучия: экономика и социум*, 2013, №1 (7), с. 117–128.

Gyngazova G. S., Miliarov D. V., Ermoshin N. I. Development of a length meter for non-magnetic extended products by the eddy current method. *Journal of Wellbeing Technologies*, 2013, no. 1 (7), pp. 117–128. (In Russ.)

Харахнин К. А., Смылова А. Л., Родин А. А. Оптимизация скоростных режимов работы стана бесконечной холодной прокатки в функции толщины подката. *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2009, № 3, С. 141–145. EDN: NBYQMD

Kharakhnin K. A., Smyslova A. L., Rodin A. A. The optimization of high-speed operating regime of continuous cold-rolling mill in the function of billet thickness. *Cherepovets State University Bulletin*, 2009, no. 3, pp. 141–145. (In Russ.) EDN: NBYQMD

Цветков О. В. Тананыкина Л. В. Метод предварительного кодирования изображений в корреляционно-экстремальных системах. *Компьютерная оптика*, 2015, т. 39, № 5, с. 738–743. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-5-738-743>

Tsvetkov O. V., Tananykina L. V. A preprocessing method for correlation-extremal systems. *Computer Optics*, 2015, vol. 39, no. 5, pp. 738–743. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-5-738-743>

Чертков В. М., Железняк В. К. Алгоритм определения меры схожести идентификационных образов закладных устройств. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки*, 2018, № 4, с. 20–27.

Chertkov V. M., Zhelezniak V. K. Algorithm for determining the degree of similarity of identification images from secret intelligence device. *Herald of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*, 2018, no. 4, pp. 20–27. (In Russ.)

Wang T., Yan Y., Wang L., Hu Y. and S. Zhang Instantaneous Rotational Speed Measurement Using Image Correlation and Periodicity Determination Algorithms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, vol. 69, no. 6, pp. 2924–2937. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2932154>

Yoo J. C., Han T. H. Fast Normalized Cross-Correlation. *Circuits Syst Signal Process*, 2009, vol. 28, pp. 819–843 <https://doi.org/10.1007/s00034-009-9130-7>

Сведения об авторах

Владимир Васильевич Мухин – доктор физико-математических наук, профессор; mukhin@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Vladimir V. Mukhin** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, mukhin@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharsky, 162600 Cherepovets, Russia).

Родион Сергеевич Пылев – аспирант, rspylev@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Rodion S. Pylev** – Postgraduate Student, rspylev@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharsky, 162600 Cherepovets, Russia).

Константин Аркадьевич Харахнин – кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0009-0008-4532-286X>, kakharakhnin@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Konstantin A. Kharakhnin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, kakharakhnin@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharsky, 162600 Cherepovets, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.07.2025; одобрена после рецензирования 29.07.2025; принята к публикации 25.08.2025.

The article was submitted 14.07.2025; Approved after reviewing 29.07.2025; Accepted for publication 25.08.2025.