ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 103, № 3, 2026, с. 131–150

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 103, No. 3, 2026, pp. 131–150

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 65.011.56

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-3-131-150

Достоверность измерений размеров канатной проволоки с использованием цифровых технологий и нейронных сетей*

В.С. ХОРЕВ[a], С.Г. ЦАПКО[b], Е.В. КУЗЬМИНСКАЯ[c], П.А. КОМАНДИНОВ[d]

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

[a] *horevvs@tpu.ru* [b] *tsapko@tpu.ru* [c] *bedareva@tpu.ru* [d] *pak37@tpu.ru*

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения достоверности и производительности контроля геометрических параметров канатной проволоки, поскольку традиционные контактные методы не позволяют проводить измерения в реальном времени на движущихся объектах, а визуальный контроль субъективен и не обеспечивает количественной оценки. Переход к бесконтактным оптическим системам в сочетании с интеллектуальной обработкой данных открывает возможность автоматизированного неразрушающего контроля с требуемой точностью и повторяемостью результатов.

Целью работы является разработка и метрологическое обоснование метода измерения диаметра и выявления поверхностных дефектов канатной проволоки на основе машинного зрения и нейросетевых алгоритмов. Для достижения поставленной цели решались задачи калибровки оптической системы с применением рабочих эталонов, создания алгоритмов сегментации и анализа изображений, а также классификации дефектов с использованием сверточной нейронной сети.

Предложен и реализован алгоритм обработки изображений, включающий адаптивную бинаризацию по методу Оцу, преобразование расстояний для определения диаметра, контурный анализ для локализации дефектов и их последующую классификацию нейросетевой моделью. Экспериментальная апробация на проволоке диаметром 1,80 мм с наработкой от 500 до 3500 ч подтвердила работоспособность подхода: погрешность измерений диаметра составила ±0,022 мм (менее 1,5 %), что обеспечивает дискретность результатов до 0,001 мм. Разработанный программный комплекс на языке Python позволяет осуществлять автоматизированный контроль в режиме, близком к реальному времени, и может быть рекомендован для внедрения в системы неразрушающего контроля качества.

Ключевые слова: канатная проволока, компьютерное зрение, бинарное изображение, видеофиксация, визуализация, фильтрация, зажатие, задир, перегиб, нейронная сеть, дефект, эталон, Python

* *Статья получена 07апреля 2026 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение достоверности измерений геометрических параметров канатной проволоки представляет собой комплексную метрологическую задачу, решение которой в современных условиях базируется на интеграции прецизионных оптических систем и методов интеллектуальной обработки данных на основе нейронных сетей. Традиционные контактные методы, включая использование рычажных скоб и цифровых микрометров, обеспечивают высокую точность в лабораторных условиях, однако их применение ограничено низкой производительностью и невозможностью контроля движущихся объектов в реальном времени. Поэтому доминирующее положение занимают бесконтактные оптические методы, среди которых промышленное распространение получили лазерные сканирующие микрометры и системы теневой проекции. Например, измерительная система TLAser 103 производства компании LaserLink Inc., основанная на сканирующем лазерном луче, демонстрирует возможность выполнения 1200 измерений в секунду с повторяемостью ±0,025 мкм и позиционной погрешностью ±0,25 мкм, что позволяет эффективно контролировать проволоку диаметром от 15 мкм, движущуюся с высокой скоростью, даже в неблагоприятных условиях промышленного производства [1, 4].

Лазерные дифракционные измерители представляют собой альтернативный подход, особенно эффективный для очень тонкой проволоки. Как показано в работе Ходиера, опубликованной в журнале Optics & Laser Technology, анализ комбинированной интерференционной и дифракционной картины, возникающей при облучении вертикальной металлической проволоки лазерным лучом, позволяет измерять диаметр в диапазоне 170…450 мкм с расширенной неопределенностью от ±1,45 мкм для тонкой проволоки до ±0,57 мкм для более толстой. Исследование подчеркивает, что метод является высокочувствительным, но требует контролируемых условий окружающей среды и отсутствия вибраций, а рассеяние света может влиять на точность измерений для проволок малого диаметра, что потребовало применения поляроидных пленок для подавления рассеянного излучения [2]. Развитие этого направления нашло отражение в европейском проекте ABSODIAM, целью которого стало создание прототипа абсолютной измерительной системы для цилиндрических объектов диаметром от 0,005 до 0,2 мм на основе анализа дифракционной картины с усовершенствованным аппаратным обеспечением и уточненной дифракционной формулой для обработки сигнала, а также разработка эталонных материалов для данного диапазона диаметров [8]. Коммерческие реализации дифракционного метода, такие как лазерный микрометр TRUBACH Microline L360, обеспечивают измерение диаметра сверхтонких проволок от 0,005 до 0,3 мм с точностью ±(0,03 + 0,03 % × D) мкм, при этом отсутствие движущихся частей гарантирует стабильность измерений в течение длительного срока эксплуатации [7]. Лазерные дифракционные системы также применяются для онлайн-измерения диаметра нитей в диапазоне 5…160 мкм с абсолютной точностью около 1 % от диаметра и чувствительностью к изменениям диаметра около 0,2 % [5].

Дальнейшее повышение достоверности измерений связывают с внедрением методов компьютерного зрения и нейросетевой обработки сигналов. Исследователи Национального института стандартов и технологий США (NIST)

разработали лазерный микрометр четвертого поколения, использующий усовершенствованный лазерный интерферометр для измерения диаметров объектов шириной менее 50 мм с неопределенностью всего 2 нм. Прибор, изготовленный практически полностью из инвара для обеспечения термической стабильности, позволяет варьировать силу контакта и экстраполировать недеформированный диаметр, что ставит его на уровень лучших мировых аналогов при меньшей стоимости и простоте эксплуатации [8]. Принципиально иной подход к обеспечению достоверности предлагают методы трехмерной реконструкции на основе глубокого обучения. В работе Харьюхахто с соавторами, представленной на международной конференции Jicable и доступной в архиве препринтов arXiv, описан разработанный метод топографического сканирования для мониторинга процесса изоляции силовых кабелей. Современные измерительные технологии в сочетании с высокопроизводительными встроенными вычислениями позволяют строить полные детализированные 3D-карты поверхности изолированной жилы, а для обнаружения поверхностных дефектов применяются методы глубокого обучения, при этом сверточные нейронные сети хорошо подходят для анализа данных измерений поверхности в реальном времени [3].

Критическим аспектом применения нейронных сетей в измерительных задачах является оценка достоверности их выходных данных. Исследование Мишани и Синтова, опубликованное в журнале Engineering Applications of Artificial Intelligence, посвящено изучению возможности оценки формы провода на основе измерений силы и крутящего момента без использования визуального восприятия. Авторы предлагают обучать супервизируемый автоэнкодер со сверточными слоями, который реконструирует пространственную форму провода, одновременно принуждая латентное пространство соответствовать пространству измерений силы и крутящего момента. Декодер модели, обученной на нитиноловых и стандартных электрических проводах, позволяет точно оценивать форму по данным силомоментных датчиков, а энкодер решает обратную задачу отображения желаемой формы в требуемое состояние силы и крутящего момента, что демонстрирует способность нейросетей учитывать неопределенности, такие как нелинейность датчиков, начальная кривизна и неоднородность провода [6]. Таким образом, современное состояние исследований в области обеспечения достоверности измерений размеров проволоки характеризуется переходом от автономных контактных средств к гибридным цифровым системам, интегрирующим высокоскоростные оптические сенсоры с алгоритмами глубокого обучения и методами количественной оценки неопределенности, что позволяет достигать субмикронной точности в широком диапазоне диаметров и условий эксплуатации.

Если продолжить обсуждение этой темы, то стоит особо отметить: точность и надежность результатов напрямую зависит от того, насколько грамотно организовано метрологическое обеспечение измерений. Сегодняшние методы уже умеют работать с погрешностями, которые связаны с калибровкой системы и нестабильностью условий эксперимента. Помимо этого, специалисты могут выделять и те составляющие ошибок, что возникают на этапах обработки снимков и распознавания дефектов.

Чтобы система работала надежнее, авторы настоящей статьи предлагают использовать рабочие эталоны с заранее известными размерами. Такой подход позволил свести к минимуму инструментальные погрешности и заметно повысить эффективность измерительного тракта в системе машинного

зрения. В ходе исследований было разработано несколько ключевых решений. Например, подход, при котором эталонные образцы калибруют измерительную систему прямо во время ее работы. Также был создан алгоритм, который корректирует оптические искажения и автоматически выделяет границы проволоки на цифровых изображениях. Инженеры ТПУ сконструировали устройство, которое совмещает эталон и исследуемый образец в одном оптическом поле. И наконец, участники исследовательской работы, результатам которой посвящена статья, написали программу для статистической обработки данных и нейросетевого анализа дефектов поверхности. Причем разработка ПО была выполнена с поправкой на метрологические характеристики самого тракта.

В итоге внедрение этих предложенных подходов и наработок позволяет резко снизить неопределенность измерений, а контроль геометрических параметров проволоки становится куда более достоверным [3].

1. КОНЦЕПЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ

В процессе контроля канатной проволоки могут быть обнаружены различные типы поверхностных дефектов, примеры которых приведены на рис. 1 и рис. 2, где показаны имитации прижатия коренной задвижкой и локальной эллипсности на проволоке диаметром 1,8 мм.

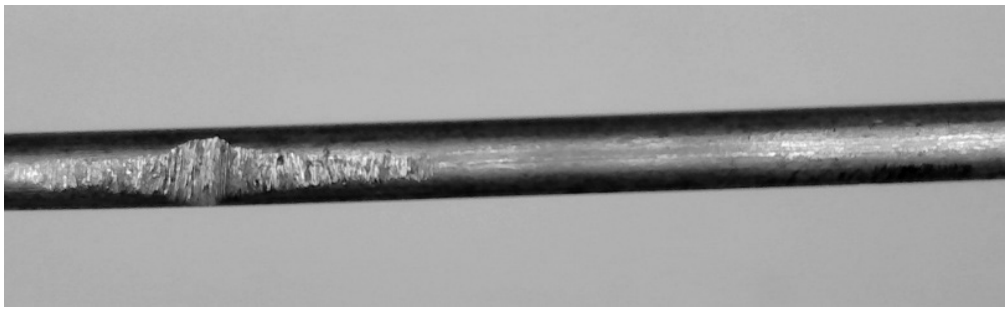


Рис. 1. Пример дефекта «вмятина» на канатной проволоке

Fig. 1. An example of a “dent” defect on the rope wire

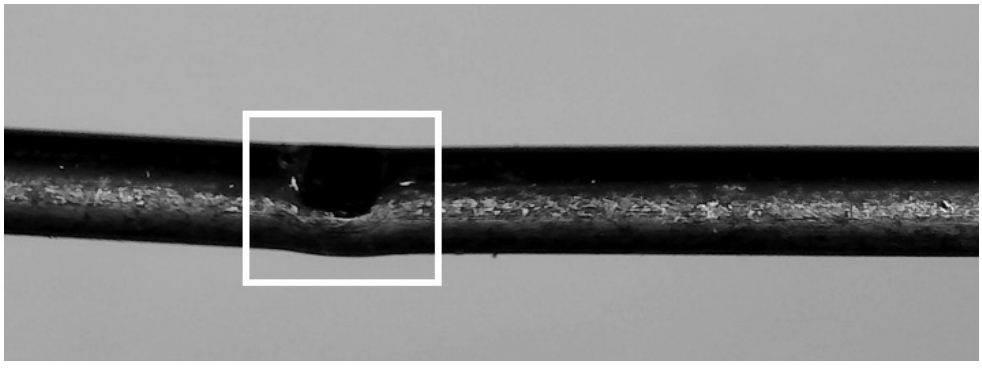


Рис. 2. Пример дефекта «поджатие» на канатной проволоке

Fig. 2. An example of a “compression” defect on the rope wire

Для количественной оценки геометрических параметров и выявления подобных неоднородностей был разработан специализированный алгоритм обработки изображений, позволяющий выполнять измерение диаметра объекта контроля с последующей детекцией дефектов. Перед проведением измерений необходимо подготовить исходное изображение. Для этого применяется метод бинаризации, преобразующий цветное изображение в черно-белое, где фон отображается черным цветом, а проволока – белым, что обеспечивает более четкое выделение границ. Бинарное изображение анализируется с использованием пороговой сегментации, при которой извлекается контур наибольшего объекта, соответствующего проволоке, после чего формируется маска и подготавливаются данные для дальнейшей обработки. Для сегментации проволоки от фона используется адаптивная пороговая бинаризация по методу Оцу, автоматически определяющая оптимальный порог путем максимизации межклассовой дисперсии интенсивностей пикселей, что обеспечивает устойчивость к вариациям освещенности и в результате дает бинарное изображение с проволокой, представленной белыми пикселями, а с фоном – черными.

Перед выполнением количественных измерений производится калибровка пиксельной системы для определения коэффициента пересчета пикселей в миллиметры. Пользователю предъявляется бинарное изображение, на котором необходимо последовательно указать две точки, соответствующие известному физическому расстоянию на эталонном участке проволоки, причем координаты точек фиксируются с учетом масштабирования окна отображения. Расстояние между выбранными точками в пикселях вычисляется по формуле Евклида

$$d_{px} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}\ , \tag{1}$$

где x_1 и y_1 – координаты эталона (начальная точка); x_2 и y_2 – координаты эталона (конечная точка).

После ввода реального расстояния в миллиметрах коэффициент разрешения определяется как отношение пиксельного расстояния к физическому согласно выражению (2), причем полученное значение используется для последующих линейных и площадных измерений.

$$k = \frac{d_{px}}{d_{mm}}, \tag{2}$$

где d_{px} – диаметр в пикселях; d_{mm} – диаметр в миллиметрах (исходные размеры эталона).

Для определения диаметра применяется метод преобразования расстояний, который включает следующие этапы: на бинарном изображении находятся внешние контуры, среди которых выбирается контур с наибольшей площадью, соответствующий контуру проволоки; создается маска проволоки, заполненная значением 255; для каждой точки внутри объекта вычисляется евклидово расстояние до ближайшей границы, после чего находится глобальный максимум преобразования расстояний, соответствующий радиусу наибольшей вписанной окружности, центр которой принимается за геометрический центр сечения проволоки. Диаметр в пикселях определяется как удвоенное значение этого радиуса, а диаметр в миллиметрах получается делением пиксельного

диаметра на калибровочный коэффициент. Результат измерения диаметра для проволоки диаметром 1,8 мм показан на рис. 3.

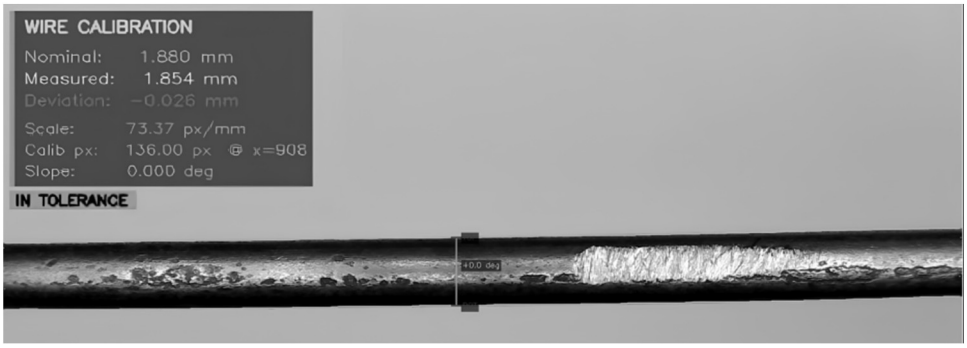


Рис. 3. Пример измерения диаметра на канатной проволоке диаметром 1,8 мм

Fig. 3. An *e*xample of diameter measurement on the rope wire with a diameter of 1,8 mm

Детекция дефектов основана на анализе темных областей внутри маски проволоки, которые соответствуют локальным нарушениям сплошной закраски поверхности. Алгоритм включает инвертирование бинарного изображения с последующим наложением маски основного контура проволоки на инвертированное изображение, что позволяет выделить только внутренние темные области. Затем выполняется поиск контуров потенциальных дефектов с фильтрацией мелких контуров по площади (порог не менее пяти пикселей) для исключения шума, причем для каждого значимого контура вычисляется площадь, а результаты визуализируются путем нанесения ограничивающих рамок и меток на исходное бинарное изображение в цвете, как показано на рис. 4, где представлены примеры детекции дефектов различных размеров.



Рис. 4. Пример детекции дефекта на канатной проволоке диаметром 1,8 мм:
1 – дефект размером 1,11 × 0,8 мм; *2* – дефект размером 0,36 × 0,46 мм; *3* – дефект размером 1,23 × 1,7 мм

Fig. 4. An example of defect detection on the rope wire with a diameter of 1,8 mm:
1 is a defect measuring 1,11 × 0,8 mm; *2* is a defect measuring 0,36 × 0,46 mm; *3* is a defect measuring 1,23 × 1,7 mm

Повреждения определяются как темные области внутри маски проволоки, для каждого дефекта определяются контуры, площадь, размеры ограничивающего прямоугольника и реальные значения ширины и высоты в миллиметрах, после чего на изображение наносится визуальная разметка в виде рамок и масок. Таким образом, использование описанного алгоритма позволяет измерять геометрические параметры и обнаруживать наличие дефектов в канатной проволоке.

2. АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ КАНАТНОЙ ПРОВОЛОКИ

Изложенная концепция измерения размеров закладывает теоретический фундамент для количественной оценки геометрических параметров канатной проволоки. В ее рамках определены ключевые методы обработки изображений: адаптивная бинаризация по Оцу, калибровка пространственного разрешения, преобразование расстояний для определения диаметра и алгоритмы поиска темных областей внутри маски для выявления поверхностных дефектов. Эти методы образуют основу, на которой строится дальнейшая практическая реализация системы контроля.

Предложенная концепции была реализована в программно-аппаратном комплексе на основе разработанного детализированного алгоритма. Его особенностью является то, что он последовательно реализует все этапы обработки данных. Сначала обеспечивается подготовка оборудования и калибровка устройства по эталонному образцу. В последующем выполняется захват видео движущейся проволоки, покадровая обработка с применением описанных математических процедур. На завершающем этапе выполняется агрегация результатов. По мнению авторов статьи, алгоритм выступает связующим звеном между теорией и инженерной реализацией, обеспечивая автоматизированное выполнение измерений в соответствии с установленными метрологическими требованиями. Сам алгоритм состоит из нескольких этапов, рассмотренных далее.

Этап 1. На этом этапе, как было указано ранее, выполняется подготовка и калибровка системы.

1. Производится выбор эталонного образца. Для этого используется самая распространенная проволока с известным диаметром (например, 1,80 мм по ГОСТ 7372–79) и геометрическими параметрами, аттестованными производителем проволоки.

2. В процессе настройки оптической системы устанавливаются камеры высокого разрешения, а также обеспечивается равномерное освещение и фокусировка.

3. Калибровка разрешения выполняется в пикселях на миллиметр. Для этого получаем бинарное изображение эталона по методу Оцу. Далее осуществляется выбор двух точек на изображении, расстояние между которыми известно в миллиметрах. При этом данные предоставляются оператором системы или с помощью автоматического алгоритма выбора. На основе выбранных параметров вычисляется евклидово расстояние в пикселях по формуле (1) и коэффициент разрешения по формуле (2).

4. Для оценки погрешности системы выполняется серия измерений эталона (не менее 20 раз) в одинаковых условиях. В последующем вычисляется средняя ошибка, СКО и доверительный интервал. Авторы статьи на основе проведенных апробаций получили погрешность ±0,022 мм, что значительно меньше допустимой, составляющей 1,5 %. Конечно, при необходимости выполняется повторная корректировка персональных настроек, таких как освещение и пороги бинаризации.

Этап 2. Этот этап алгоритма является унифицированным и заключается в основном в сборе данных на основе видеофиксации. В качестве основных действий авторы выделяют:

– протяжку исследуемой проволоки с наработкой 500…3500 ч перед камерами;

– видеозахват с высокой частотой кадров;

– декомпозицию видео на отдельные кадры (например, каждый кадр или с заданным шагом).

Этап 3. На этом этапе проводится измерение диаметра и поиск дефектов, что подразумевает последовательную обработку каждого кадра. Для каждого кадра выполняется последовательность операций.

3.1. Операция предварительной обработки изображения подразумевает три действия: преобразование в оттенки серого; адаптивная бинаризация методом Оцу, при котором фон окрашивается в черный цвет, а проволока – в белый; извлечение основного контура, определенного по максимальной площади, который является маской проволоки.

3.2. При необходимости выполняется операция калибровки текущего кадра, если условия съемки меняются и можно применить калибровку по реперным точкам. Однако в настоящей работе авторы предполагают неизменность коэффициента k, полученного на этапе 1.

3.3. Операция измерения диаметра подразумевает следующие действия:

– преобразование расстояний к маске проволоки;

– определение глобального максимума $r_{\max}$, который определяется как радиус максимальной вписанной окружности;

– расчет диаметра в пикселях: $D_{px} = 2r_{\max} D_{px} = 2r_{\max}$;

– пересчет результата в миллиметрах: $D_{mm} = D_{px} / k$;

– сохранение результата как текущий диаметр сечения.

3.4. Операция выявления поверхностных дефектов состоит из последовательности следующих действий:

– инвертирование бинарного изображения, при котором дефекты преобразуются в темные области на светлой проволоке и становятся светлыми на темном фоне;

– маскирование проволоки используется для того, чтобы рассматривать только внутренние области;

– поиск контуров потенциальных дефектов;

– фильтрация шумов по площади (например, порог ≥5 пикселей);

– вычисление для каждого найденного дефекта:

  o площади (в пикселях в квадрате и миллиметрах в квадрате после умножения на $k2k2$);

- габаритов ограничивающего прямоугольника (ширина, высота в миллиметрах);
- координат центра;

– визуализация дефектов рамками на изображении.

3.5. Операция нейросетевой классификация дефектов основана на использовании нейросетевой модели, разработанной авторами статьи, которая предварительно обучена. При этом изображения дефектных областей в виде вырезанных фрагментов подаются на вход сверточной нейронной сети. Далее сеть определяет дефект и относит его к одному из классов: «поджатие», «задир», «перегиб», «эллипсность», «прочие». При этом также возможно использование нейросети для уточнения границ дефекта, например сегментация на основе U-Net, если качество бинаризации недостаточное.

3.6. Операция записи результатов обеспечивает сохранение в базу данных или файл таких характеристик дефекта, как номер кадра, измеренный диаметр, список дефектов с характеристиками и классами.

Этап 4. На этапе агрегации и анализа по всей длине проволоки строится профиль диаметра, который определяется графиком зависимости диаметра от координаты. Также вычисляются статистические параметры: средний диаметр, минимальный / максимальный, отклонения от номинала. При этом отчет о количестве дефектов каждого типа формируется относительно единиц длины. Если выявляется превышение заданных допусков, система сигнализирует о браке.

Этап 5. На последнем этапе выполняется периодическая верификация как повторное измерение эталонного образца для контроля дрейфа характеристик системы. Также при необходимости выполняется перекалибровка или дообучение нейросети на новых размеченных данных.

Представленный алгоритм охватывает все стадии автоматизированного контроля канатной проволоки: от первичной калибровки оптической системы до финальной агрегации результатов и периодической верификации. Он объединяет классические методы обработки изображений (бинаризация по Оцу, преобразование расстояний, контурный анализ) с современными нейросетевыми подходами к классификации дефектов, что позволяет не только количественно оценивать геометрические параметры, но и идентифицировать типы повреждений. Последовательное выполнение этапов обеспечивает получение достоверных данных о диаметре, выявление поверхностных дефектов и формирование статистических отчетов, необходимых для контроля качества.

Для практической реализации описанного алгоритма разработан программный комплекс на языке Python, структура которого полностью соответствует логике технологического процесса. Модульная архитектура включает компоненты калибровки, предварительной обработки, измерения диаметра, детекции и нейросетевой классификации дефектов, а также модули обработки видеопотока и анализа погрешностей. Использование библиотек OpenCV для операций компьютерного зрения и TensorFlow/Keras для нейросетевых моделей обеспечивает высокую производительность и гибкость настройки системы под конкретные условия эксплуатации.

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАНАТНОЙ ПРОВОЛОКИ

Разработанный алгоритм контроля канатной проволоки реализован в виде программного комплекса, построенного по модульному принципу на языке Python с использованием библиотек компьютерного зрения и машинного обучения. Выбор языка Python обусловлен наличием развитой экосистемы библиотек для обработки изображений и научных вычислений, а также возможностью быстрого прототипирования и отладки алгоритмов. Архитектура программного комплекса обеспечивает гибкость настройки, возможность замены отдельных компонентов и масштабирования системы при переходе к промышленной эксплуатации. Основными функциональными модулями являются модуль захвата и предварительной обработки изображений, модуль калибровки, модуль измерения геометрических параметров, модуль детекции дефектов и модуль нейросетевой классификации. Взаимодействие между модулями организовано через четко определенные интерфейсы, что позволяет независимо развивать каждый компонент и адаптировать систему под конкретные условия эксплуатации.

Модуль калибровки системы предназначен для определения коэффициента пересчета пикселей в миллиметры, что является необходимым условием для получения количественных результатов измерений. Процесс калибровки реализован в интерактивном режиме с использованием графического интерфейса на основе библиотеки OpenCV. Оператору предъявляется бинарное изображение эталонного участка проволоки с известным физическим расстоянием, на котором необходимо последовательно указать две точки. Координаты выбранных точек фиксируются с учетом масштабирования окна отображения, после чего вычисляется евклидово расстояние между ними в пикселях. Коэффициент разрешения определяется как отношение полученного пиксельного расстояния к известному физическому расстоянию в миллиметрах. Полученное значение сохраняется в файл конфигурации и используется во всех последующих измерениях. Для повышения точности калибровки предусмотрена возможность усреднения результатов по нескольким парам точек и проведения повторной калибровки при изменении условий съемки.

Модуль предварительной обработки изображений выполняет сегментацию проволоки на исходном изображении и формирование маски для последующих измерений. Основным методом сегментации является адаптивная пороговая бинаризация по методу Оцу, который автоматически определяет оптимальный порог на основе анализа гистограммы интенсивностей пикселей, обеспечивает устойчивость к вариациям освещенности и не требует ручной настройки пороговых значений. После бинаризации выполняется поиск всех внешних контуров на изображении, среди которых выбирается контур с максимальной площадью, соответствующий искомой проволоке. На основе выбранного контура формируется бинарная маска, где область проволоки заполнена значением 255, а фон представлен нулями. Для удаления мелких шумовых артефактов применяются морфологические операции открытия и закрытия с ядром небольшого размера, что позволяет сгладить границы маски и устранить единичные выбросы.

Модуль измерения диаметра реализует определение геометрического центра и диаметра проволоки на основе маски, полученной на предыдущем этапе. Ключевым методом является преобразование расстояний (distance transform), которое для каждой точки внутри маски вычисляет евклидово расстояние до ближайшей границы. Результатом преобразования является матрица, значения которой соответствуют расстоянию от каждой внутренней точки до границы объекта. Глобальный максимум этой матрицы соответствует радиусу наибольшей вписанной окружности, а его координаты определяют геометрический центр сечения проволоки. Диаметр в пикселях вычисляется как удвоенное значение этого радиуса, после чего с использованием калибровочного коэффициента выполняется пересчет в миллиметры. Для оценки стабильности измерений модуль поддерживает режим многократных измерений с небольшими пространственными смещениями области интереса, что позволяет оценить воспроизводимость результатов и выявить возможные аномалии.

Модуль детекции дефектов предназначен для выявления поверхностных повреждений проволоки, таких как поджатие, задиры, перегибы и локальная эллипсность. Алгоритм детекции основан на анализе темных областей внутри маски проволоки, которые соответствуют локальным нарушениям сплошности поверхности. Исходное бинарное изображение инвертируется, после чего на него накладывается маска проволоки, что позволяет выделить только внутренние области, потенциально содержащие дефекты. Далее выполняется поиск контуров на полученном изображении с последующей фильтрацией по минимальной площади для исключения шумовых артефактов. Для каждого значимого контура вычисляются геометрические характеристики: площадь в пикселях и миллиметрах, габариты ограничивающего прямоугольника, ширина и высота в миллиметрах, координаты центра. Полученные данные сохраняются для последующей классификации и визуализации. Для повышения надежности детекции предусмотрена возможность настройки пороговых значений и применения дополнительных морфологических операций для улучшения качества выделения границ дефектов.

Модуль нейросетевой классификации и детекции дефектов реализован на базе архитектуры YOLOv8. Данная модель выбрана благодаря высокой эффективности обработки видеопотока и способности выполнять одновременную локализацию и классификацию объектов в рамках одного прохода. Архитектура модели включает *backbone*-сеть (на базе C2f blocks) для извлечения иерархических признаков, *neck*-структуру для агрегации признаков разных масштабов и *head*-блоки, ответственные за предсказание границ дефектов (bounding boxes) и их вероятностную классификацию.

В отличие от классических классификаторов с функцией softmax, в YOLOv8 для классификации используется функция активации sigmoid, что позволяет независимо оценивать вероятность принадлежности объекта к каждому из целевых классов: «поджатие», «задир», «перегиб», «эллипсность» и др. Обучение модели проводилось методом transfer learning с использованием предобученных весов при разрешении входного изображения 640×640 пикселей. Для оптимизации процесса обучения применялся оптимизатор Adam и комплексная функция потерь, объединяющая компоненты регрессии ограничивающих рамок (CIoU loss) и классификации (Binary Cross-Entropy). Использование

методов геометрической и фотометрической аугментации позволило повысить устойчивость модели к вариативности условий освещенности и ракурса съемки.

Модуль обработки видеопотока обеспечивает возможность непрерывного контроля движущейся проволоки в реальном времени или при обработке предварительно записанных видеоматериалов; выполняет декомпозицию видео на отдельные кадры с заданной частотой (например, каждый кадр или с определенным шагом), после чего последовательно применяет к каждому кадру описанные выше алгоритмы предварительной обработки, измерения диаметра, детекции и классификации дефектов. Для обеспечения производительности при работе с высокоскоростными видеопотоками реализована поддержка многопоточной обработки с использованием библиотеки multiprocessing, что позволяет эффективно загружать многоядерные процессоры. Результаты обработки каждого кадра сохраняются в структурированном формате JSON, включая измеренный диаметр, координаты центра, количество обнаруженных дефектов и их характеристики. Визуализированные кадры с нанесенной разметкой сохраняются в отдельную директорию для последующего визуального контроля и анализа.

Модуль анализа погрешности и валидации реализует статистическую обработку результатов многократных измерений эталонных образцов в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.736–2011. Модуль вычисляет основные статистические характеристики: среднее арифметическое значение, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы случайной погрешности, а также систематическую составляющую погрешности на основе сравнения с аттестованным значением эталона. Для выявления грубых погрешностей и выбросов применяется критерий Граббса. Результаты анализа представляются в виде отчета, содержащего оценку точности измерительной системы, что позволяет обоснованно судить о достоверности получаемых результатов и принимать решения о необходимости дополнительной калибровки или корректировки алгоритмов.

Для тестирования разработанного программного комплекса был подобран набор эталонных изображений и видеоматериалов, данные для которого предоставило ООО «Альтаир» (г. Томск). Полученные результаты тестирования подтвердили адекватность и корректность разработанного алгоритма, а также соответствие требуемым метрологическим характеристикам. При этом модульность, заложенная в программное обеспечение, позволяет в дальнейшем выполнить расширение функциональности. Это позволит в будущем обеспечить интеграцию дополнительных методов анализа, реализовать поддержку новых типов дефектов и провести адаптацию к различным условиям эксплуатации. В работе авторов были использованы оптимизированные библиотеки компьютерного зрения и методы распараллеливания вычислительной нагрузки. Это, в свою очередь, позволяет достичь производительности, достаточной для использования системы в режимах, приближенных к реальному времени. По мнению авторов, работа открывает широкие перспективы для внедрения разработанных методов и подходов для промышленных линий контроля качества канатной проволоки.

4. АПРОБАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе серии экспериментальных исследований была доказана достоверность и адекватность предложенного алгоритма, а также подтверждена его пригодность для применения в практических задачах поиска дефектов канатной проволоки. Необходимость автоматизации контроля качества проволоки обусловлена ограничениями традиционных визуальных методов, которые характеризуются субъективностью и подвержены влиянию человеческого фактора, что особенно критично при больших объемах производства. Внедрение систем технического зрения позволяет не только повысить объективность контроля, но и обеспечить его непрерывность в реальном времени с высокой точностью измерений.

Методология апробации разработанного алгоритма основывалась на сравнительном анализе результатов измерений, полученных с помощью программного комплекса, и эталонных значений. В качестве объекта исследований использовалась проволока диаметром 1,80 мм, изготовленная по ГОСТ 7372–79, с наработкой от 500 до 3500 ч, на которой был выявлен ряд потенциальных дефектов, включая поджатие, задиры, перегиб и прочие поверхностные повреждения. Эксперимент проводился в статических условиях при фиксированном положении проволоки перед камерами высокого разрешения. Для обеспечения репрезентативности результатов было выполнено двадцать последовательных измерений диаметра эталонного образца в идентичных условиях, что соответствует требованиям ГОСТ Р 8.736–2011 к обработке результатов прямых многократных измерений. Полученные данные представлены в табл. 1, демонстрирующей незначительный разброс значений от 1,79 до 1,81 мм при номинальном диаметре 1,80 мм, метрики – в табл. 2.

На точность измерения геометрических размеров объектов с применением системы машинного зрения влияет не только пространственное расположение камеры относительного самого объекта, но также внутренние технические характеристики камеры, дискретизация яркости и шумы изображения [10].

При использовании веб-камеры ключевым источником систематической погрешности измерения диаметра такой проволоки является погрешность квантования, обусловленная дискретной (пиксельной) природой цифрового изображения.

При настройке измерительной системы с использованием образца с известными геометрическими размерами был определен масштабный коэффициент системы $k = 0{,}0328$ мм/пиксель.

Поскольку диаметр исследуемой проволоки достаточно малого размера и его изображение не занимает целое число пикселей, это приводит к погрешности квантования. При этом погрешность квантования можно рассчитать по формуле

$$\Delta d = \sqrt{\Delta x_1{}^2 + \Delta x_2{}^2} \cdot k = 0{,}7k,$$

где Δx_1, Δx_2 – погрешность определения левой и правой границ проволоки, вызванная нецелочисленным заполнением пикселя, каждая из которых принимается равной $\pm 0{,}5$ пикселя; k – масштабный коэффициент, мм/пиксель.

Таким образом, погрешность квантования равна 0,022 мм.

При использовании веб-камеры однозначно возникают случайные погрешности, которые могут быть вызваны недостаточным освещением и яркостью изображения.

Для определения суммарной погрешности измерения диаметра с учетом систематической и случайной составляющих погрешности воспользуемся ГОСТ Р 8.736.

Благодаря возможностям измерительной системы был получен массив данных измерения диаметра канатной проволоки в различных точках. Для расчета случайной составляющей погрешности учитывались только первые 20 измерений. При этом среднее арифметическое значение равно 1,80 мм, среднеквадратическое отклонение 0,0013, следовательно, случайная составляющая погрешности измерения диаметра проволоки составляет ± 0,002 мм. В соответствии с алгоритмом обработки прямых многократных измерений получена суммарная погрешность измерения диаметра с применением разработанной измерительной системы, и она составила ± 0,023 мм.

Таблица 1

Table 1

Группа измерений

Measurement Group

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр, мм	1,80	1,79	1,81	1,80	1,79	1,81	1,80	1,80	1,81	1,79
Номер измерения	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Диаметр, мм	1,80	1,80	1,79	1,81	1,80	1,80	1,81	1,79	1,80	1,80

Обработка экспериментальных данных включала расчет суммарной и случайной погрешностей для каждого измерения, результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Обработанные экспериментальные данные

Processed experimental data

Группа измерений	Номер измерения	Суммарная погрешность	Случайная погрешность, мм
1	1,80	0,00	0,0000
2	1,79	–0,01	0,0001
3	1,81	0,01	0,0001
4	1,80	0,00	0,0000
5	1,79	–0,01	0,0001

Окончание табл. 2

End of the Tab. 2

Группа измерений	Номер измерения	Суммарная погрешность	Случайная погрешность, мм
6	1,81	0,01	0,0001
7	1,80	0,00	0,0000
8	1,80	0,00	0,0000
9	1,81	0,01	0,0001
10	1,79	-0,01	0,0001
11	1,80	0,00	0,0000
12	1,80	0,00	0,0000
13	1,79	–0,01	0,0001
14	1,81	0,01	0,0001
15	1,80	0,00	0,0000
16	1,80	0,00	0,0000
17	1,81	0,01	0,0001
18	1,79	–0,01	0,0001
19	1,80	0,00	0,0000
20	1,80	0,00	0,0000

Таблица 3

Table 3

Метрики качества

Quality metrics

Класс дефекта	Точность (Precision)	Полнота (Recall)	F1-Score
Поджатие	0,94	0,92	0,93
Задир	0,91	0,89	0,90
Перегиб	0,96	0,95	0,95
Эллипсность	0,88	0,91	0,89
Прочие	0,85	0,82	0,83
Среднее (mAP@0.5)	0,91	0,90	0,90

Анализ погрешностей показал, что отклонения измеренных значений от эталонного диаметра носят случайный характер и не превышают ±0,01 мм для

отдельных измерений. На основе полученной выборки была рассчитана итоговая погрешность измерительной системы, составившая ±0,022 мм, что соответствует относительной погрешности не более 1,5 % от номинального диаметра. Достигнутая точность позволяет проводить измерения диаметра и геометрических параметров дефектов с погрешностью менее 1 % и дискретностью до 0,001 мм.

Полученные результаты согласуются с современными тенденциями развития оптических измерительных систем. В качестве подтверждения был проведен анализ результатов проекта VisionPlus Швейцарской высшей школой прикладных наук. Результаты этого проекта продемонстрировали, что возможность измерения диаметра проволоки в диапазоне от 0,010 до 5,000 мм и с точностью 1 % именно для диаметров свыше 0,200 мм и около 1 мкм можно использовать для более тонких изделий [12]. Представленные исследования в области контроля волоконно-оптических катушек также можно интерпретировать как подтверждение эффективности использования методов машинного зрения. Однако надо отметить, что разработанный алгоритм использует метод бинаризации Оцу, а преобразования расстояний, как правило, обеспечивают точность, очень близкую к коммерческим системам, имеющим стоимость на порядок выше стоимости разработки авторов статьи. Было доказано, что при меньшей вычислительной сложности можно достичь сопоставимых результатов, что подтверждается успешным применением аналогичных подходов в задачах комбинации оптических элементов.

В заключение следует отметить, что экспериментальная апробация полностью подтвердила работоспособность предложенного алгоритма, показано его соответствие современным требованиям к точности измерений в системах технического зрения. Достигнутые показатели погрешности позволяют рекомендовать разработанный метод для практического применения в задачах неразрушающего контроля канатной проволоки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненного исследования разработан алгоритмический и программный базис системы неразрушающего контроля геометрических параметров канатной проволоки, интегрирующий методы компьютерного зрения и нейросетевой классификации поверхностных дефектов. Предложенный подход включает калибровку оптической системы с использованием эталонных образцов, адаптивную бинаризацию по методу Оцу для сегментации проволоки, преобразование расстояний при определении диаметра и контурный анализ для выявления локальных повреждений, классификация которых выполняется сверточной нейронной сетью. Программная реализация на языке Python с применением библиотек OpenCV и TensorFlow обеспечивает модульность, масштабируемость и возможность обработки видеопотока в режиме, близком к реальному времени.

Экспериментальная апробация на эталонных образцах проволоки диаметром 1,80 мм с наработкой от 500 до 3500 ч подтвердила достоверность получаемых результатов. После двадцати циклов измерений удалось выйти на среднеквадратическую погрешность ±0,022 мм. В относительном выражении это не превышает 1,5 %. При таких показателях диаметр проволоки и геомет-

рические параметры дефектов можно фиксировать с дискретностью до 0,001 мм.

Полученные метрологические характеристики вполне сопоставимы с теми, которые дают современные коммерческие оптические системы. А значит, разработанный метод вполне пригоден для автоматизированного контроля качества прямо в производственных условиях.

Дальнейшие планы авторы связывают с доработкой нейросетевых моделей как для сегментации, так и для классификации дефектов. Кроме того, предстоит адаптировать алгоритмы к работе с высокоскоростными видеопотоками непосредственно на технологической линии. В качестве отдельного направления дальнейших исследований можно выделить задачу встраивания системы в единую цифровую платформу управления качеством. Это позволит накапливать статистику и в перспективе прогнозировать остаточный ресурс канатной проволоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новый лазерный микрометр от компании LaserLink // RusCable.ru. – 2016. – URL: https://www.ruscable.ru/news/2016/06/27/Novyj_lazernyj_mikrometr_ot_kompanii_LaserLink/ (дата обращения: 19.02.2026).

2. *Khodier S.A.* Measurement of wire diameter by optical diffraction // Optics & Laser Technology. – 2004. – Vol. 36 (1). – P. 63–67. – DOI: 10.1016/S0030-3992(03)00134-8.

3. Topography scanning as a part of process monitoring in power cable insulation process / J. Harjuhahto, J. Harjuhahto, M. Lahti, J. Hanhirova, B. Sonerud // arXiv.org. – 2026. – arXiv:2602.06519. – URL: https://arxiv.org/abs/2602.06519 (accessed: 19.02.2026).

4. США: LaserLink Inc. выпустила сканирующий лазерный микрометр // Ukrmach. – 2016. – URL: https://ukrmach.dp.ua/2016/07/04/ssha-laserlink-inc-vypustila-skaniruyushhij-lazernyj-mikrometr.html (дата обращения: 19.02.2026).

5. *West P.* On-line gauge for wire and fibre diameter measurement // Measurement and Control. – 1974. – Vol. 7 (2). – P. 45–46. – DOI: 10.1177/002029407400700201.

6. *Mishani I., Sintov A.* Learning configurations of wires for real-time shape estimation and manipulation planning // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 121. – DOI: 10.1016/j.engappai.2023.105967.

7. Лазерный микрометр TRUBACH Microline L360 // Катай машиностроение: сайт. – URL: https://czcathay.ru/equipment/lazernyj-mikrometr-trubach-microline-l360 (дата обращения: 19.02.2026).

8. Absolute diameter measurement of thin wire, thread and fibre // CORDIS. – URL: https://cordis.europa.eu/project/id/SMT4952042 (accessed: 19.02.2026).

9. As Good as it Gets: NIST Develops Its Fourth Generation Wire Micrometer that Rivals Best in the World // National Institute of Standards and Technology. – 2021. – URL: https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/good-it-gets-nist-develops-its-fourth-generation-wire-micrometer-rivals (accessed: 19.02.2026).

10. Комплексный подход к неразрушающему контролю исследовательской проволоки с использованием цифровых технологий и нейронных систем / С.Г. Цапко, В.С. Хорев, И.В. Цапко, А.А. Друки // Перспективы науки. – 2025. – № 11 (194). – С. 89–96. – URL https://moofrnk.com/assets/files/journals/science-prospects/194/science-prospect-11(194)-main.pdf (дата обращения: 31.03.2026).

11. New system for measuring wire diameter with linear cameras // Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana (SUPSI): website. – 2024. – URL: https://www.supsi.ch/en/nuovo-sistema-per-misurare-il-diametro-dei-fili-con-telecamere-lineari (accessed: 31.03.2026).

12. VisionPlus: Next generation inspection system for wires and filaments // ARIS: Accessible Research Information System of SUPSI. – URL: https://aris.supsi.ch/entities/funding/239b9917-28b0-4028-af2f-479ea00d8cc9 (accessed: 31.03.2026).

Хорев Владимир Сергеевич, исполняющий обязанности руководителя отделения информационных технологий инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета, доцент, кандидат технических наук. Основное направление научных исследований – неразрушающие методы контроля. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: horevvs@tpu.ru

Цапко Сергей Геннадьевич, директор научно-образовательного центра топ-инженерии в сфере информационных технологий инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета, доцент, кандидат технических наук. Основное направление научных исследований – разработка огнетушащих средств специального назначения, разработка нейросетвых алгоритмов идентификации личности, предсказания аварийных ситуаций в сложных технических системах, разработка и синтез высокопрочных изделий на основе новых композитных материалов, автоматизация промышленных производств, использование нейросетвых алгоритмов в задачах прогнозирования динамики изменения курса акций, имитационное моделирование сложных технических систем. Имеет более 130 печатных работ. E-mail: tsapko@tpu.ru

Кузьминская Елена Вячеславовна, доцент отделения автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета, доцент, кандидат технических наук. Основное направление научных исследований – метрология, стандартизация и сертификация, автоматизация управления жизненным циклом продукции, основы технического регулирования. Имеет более 30 печатных работ. E-mail: bedareva@tpu.ru

Командинов Павел Александрович, инженер отделения информационных технологий инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – мехатроника, программирование. E-mail: pak37@tpu.ru

Khorev Vladimir S., Acting Head of the Information Technology Division, School of Information Technology and Robotics, Tomsk Polytechnic University; Associate Professor; PhD (Eng.). His primary research focusis non-destructive testing methods. He is the author of over 10 publications. E-mail: horevvs@tpu.ru

Tsapko Sergey G., Director of the Top Engineering Research and Education Center in Information Technology, School of Information Technology and Robotics, Tomsk Polytechnic University; Associate Professor; PhD (Eng.). His research interests include development of special-purpose fire-extinguishing agents, neural network algorithms for personal identification, prediction of emergencies in complex technical systems, development and synthesis of high-strength products based on new composite materials, automation of industrial processes, application of neural network algorithms in stock price dynamics forecasting, and simulation modeling of complex technical systems. He is the author of over 130 publications. E-mail: tsapko@tpu.ru

Kuzminskaya Elena V., Associate Professor, Division of Automation and Robotics, School of Information Technology and Robotics, Tomsk Polytechnic University; Associate Professor; PhD (Eng). Her research interests cover metrology, standardization and certification, automated product lifecycle management, and fundamentals of technical regulation. She is the author of over 30 publications. E-mail: bedareva@tpu.ru

Komandinov Pavel A., engineer, Information Technology Division, School of Information Technology and Robotics, Tomsk Polytechnic University. His research interests include mechatronics and programming. E-mail: pak37@tpu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-3-131-150

Reliability of measuring rope wire dimensions using digital technologies and neural networks *

V.S. KHOREV [a], S.G. TSAPKO [b], E.V. KUZMINSKAYA [c], P.A. KOMANDINOV [d]

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

[a] horevvs@tpu.ru [b] tsapko@tpu.ru [c] bedareva@tpu.ru [d] pak37@tpu.ru

Abstract

The relevance of the study is driven by the need to improve the reliability and efficiency of monitoring the geometric parameters of rope wire, since traditional contact methods do not allow real-time measurements on moving objects, while visual inspection is subjective and does not provide quantitative assessment. The transition to non-contact optical systems combined with intelligent data processing opens up the possibility of automated non-destructive testing with the required accuracy and repeatability of results.

The aim of the work is to develop and provide metrological substantiation for a method of measuring the diameter and detecting surface defects of rope wire based on machine vision and neural network algorithms. To achieve this goal, the following tasks were addressed: calibration of the optical system using working standards, development of image segmentation and analysis algorithms, and defect classification using a convolutional neural network.

As a result, an image processing algorithm has been proposed and implemented, including adaptive Otsu binarization, distance transformation for diameter determination, contour analysis for defect localization, and subsequent classification of defects using a neural network model. Experimental testing on wire with a diameter of 1.80 mm and a service life ranging from 500 to 3500 hours confirmed the viability of the approach: the measurement error of the diameter was ±0.022 mm (less than 1.5 %), ensuring result resolution down to 0.001 mm. The developed software package in Python enables automated monitoring in near real-time and can be recommended for implementation into non-destructive quality control systems.

Keywords: rope wire, computer vision, binary image, video recording, visualization, filtering, jamming, scoring, bending, neural network, defect, reference standard, python

REFERENCES

1. New laser micrometer from LaserLink company. *RusCable.ru*, 2016. (In Russian). Available at: https://www.ruscable.ru/news/2016/06/27/Novyj_lazernyj_mikrometr_ot_kompanii_LaserLink/ (accessed 19.02.2026).

2. Khodier S.A. Measurement of wire diameter by optical diffraction. *Optics & Laser Technology*, 2004, vol. 36 (1), pp. 63–67. DOI: 10.1016/S0030-3992(03)00134-8.

3. Harjuhahto J., Harjuhahto J., Lahti M., Hanhirova J., Sonerud B. Topography scanning as a part of process monitoring in power cable insulation process. *arXiv.org*, 2026, arXiv:2602.06519. Available at: https://arxiv.org/abs/2602.06519 (accessed 19.02.2026).

4. USA: LaserLink Inc. released scanning laser micrometer. *Ukrmach*, 2016. Available at: https://ukrmach.dp.ua/2016/07/04/ssha-laserlink-inc-vypustila-skaniruyushhij-lazernyj-mikrometr.html (accessed 19.02.2026).

5. West P. On-line gauge for wire and fibre diameter measurement. *Measurement and Control*, 1974, vol. 7 (2), pp. 45–46. DOI: 10.1177/002029407400700201.

* *Received 07 April 2026.*

6. Mishani I., Sintov A. Learning configurations of wires for real-time shape estimation and manipulation planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, vol. 121. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.105967.

7. Laser micrometer TRUBACH Microline L360. *Changzhou Cathay Machinery Intelligent Technology Co., Ltd*. Website. (In Russian). Available at: https://czcathay.ru/equipment/lazernyj-mikrometr-trubach-microline-l360 (accessed 19.02.2026).

8. CORDIS. *Absolute diameter measurement of thin wire, thread and fibre*. Available at: https://cordis.europa.eu/project/id/SMT4952042 (accessed 19.02.2026).

9. As Good as it Gets: NIST Develops Its Fourth Generation Wire Micrometer that Rivals Best in the World. *National Institute of Standards and Technology*, 2021. Available at: https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/good-it-gets-nist-develops-its-fourth-generation-wire-micrometer-rivals (accessed 19.02.2026).

10. Tsapko S.G., Khorev V.S., Tsapko I.V., Druki A.A. Kompleksnyi podkhod k nerazrushayushchemu kontrolyu issledovatel'skoi provoloki s ispol'zovaniem tsifrovykh tekhnologii i neironnykh sistem [A comprehensive approach to non-destructive testing of research wire using digital technologies and neural systems]. *Perspektivy nauki = Prospects of Science*, 2025, no. 11 (194), pp. 89–96. Available at: https://moofrnk.com/assets/files/journals/science-prospects/194/science-prospect-11(194)-main.pdf (accessed 31.03.2026).

11. New system for measuring wire diameter with linear cameras. *Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana*: website, 2024. Available at: https://www.supsi.ch/en/nuovo-sistema-per-misurare-il-diametro-dei-fili-con-telecamere-lineari (accessed 31.03.2026).

12. VisionPlus: Next generation inspection system for wires and filaments. *ARIS: Accessible Research Information System of SUPSI*. Available at: https://aris.supsi.ch/entities/funding/239b9917-28b0-4028-af2f-479ea00d8cc9 (accessed 31.03.2026).

Для цитирования:

Достоверность измерений размеров канатной проволоки с использованием цифровых технологий и нейронных сетей / В.С. Хорев, С.Г. Цапко, А.В. Кузьминская, П.А. Командинов // Системы анализа и обработки данных. – 2026. – № 3 (103). – С. 131–150. – DOI: 10.17212/2782-2001-2026-3-131-150.

For citation:

Khorev V.S., Tsapko S.G., Kuzminskaya A.V., Komandinov P.A. Dostovernost' izmerenii razmerov kanatnoi provoloki s ispol'zovaniem tsifrovykh tekhnologii i neironnykh setei [Reliability of measuring rope wire dimensions using digital technologies and neural networks]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2026, no. 3 (103), pp. 131–150. DOI: 10.17212/2782-2001-2026-3-131-150.