

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-171-181

УДК 681.78, 343.77

Методика выбора параметров оптико-электронных систем контроля износа рабочих лопаток паровых турбин по заданной величине суммарной погрешности**Лиана Сергеевна Родикова¹✉, Валерий Викторович Коротаев²,
Александр Николаевич Тимофеев³, Виктория Александровна Рыжова⁴,
Антон Андреевич Мараев⁵, Сергей Васильевич Михеев⁶**^{1,2,3,4,5,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация¹ ls_rodikova@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-4499-5299>² korotaev_v_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>³ timofoev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>⁴ victoria_ryz@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>⁵ aamaraev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7287-0414>⁶ msv@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2042-7285>**Аннотация**

Введение. Оптико-электронные системы контроля износа рабочих лопаток цилиндров низкого давления паровых турбин обеспечивают оценку величины хорды рабочей лопатки в статике на закрытом цилиндре, но не позволяют оценить износ с необходимой погрешностью при валоповороте. Контроль затрудняется тем, что выходная кромка контролируемой лопатки может перекрываться входной кромкой следующей лопатки. Следовательно, требуется задать такое направление видеонаблюдения для каждого сечения, которое обеспечит формирование видеокадров, содержащих изображение лопатки, и будет включать ее входную и выходную кромки. Режим валоповорота требует применения импульсной подсветки передней и задней кромок рабочих лопаток для уменьшения величины смаза изображения. Исходя из этого, важно осуществить выбор фокусного расстояния объектива видеокамеры, диаметра входного зрачка объектива и мощности импульсных источников излучения. Разработка методики параметров системы является актуальной задачей с целью сокращения трудоемкости проектирования систем для различных моделей турбин и технологий применения. **Метод.** Разработана методика выбора параметров систем контроля износа рабочих лопаток, которая основана на критерии равенства основных составляющих суммарной погрешности величины хорды. При аналитических исследованиях использовались выявленные связи параметров матричного приемника оптического излучения, источников подсветки и оптической схемы с требуемыми характеристиками системы. Компьютерное моделирование процесса преобразования информации в исследуемой системе учитывало связь параметров перемещающихся при валоповороте рабочих лопаток и параметров оптической схемы. Экспериментальная оценка погрешности системы в статике и в динамике на макете лопаточного аппарата использовала многократные измерения после калибровки системы по известным параметрам рабочих лопаток. **Основные результаты.** Методика обеспечивает при необходимых углах наклона видеозонда требуемое поле зрения и заданную погрешность контроля величины хорды за счет выбираемых матричного приемника оптического излучения, фокусного расстояния объектива видеокамеры, диаметра входного зрачка объектива, мощности источников излучения. На примере, наиболее сильно подверженной износу пятой ступени лопаточного аппарата цилиндров низкого давления турбины большой единичной мощности К-1200, показано, что для предельно допустимых значений углов поворота видеозонда 19° и времени задержки кадровой синхронизации до 0,18 с фокусное расстояние объектива видеокамеры должно быть менее 2,4 мм при времени импульсной подсветки 0,05 с. Компьютерное моделирование показало, что предельная погрешность системы может достигать 0,011 мм, что указывает на возможность уменьшения суммарной погрешности. С использованием разработанной методики выбраны основные элементы и создан макет системы. Сформулированы требования к времени экспозиции и задержки кадровой синхронизации. **Обсуждение.** Эффективность методики выбора параметров подтверждена экспериментальными исследованиями макета системы, показавшими, что оценка стандартного отклонения случайной составляющей погрешности

контроля хорды в динамике составила 0,26 мм, что в три раза меньше, чем у ранее разработанной системы, и удовлетворяет требованиям, предъявляемым при оценке работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе эксплуатации и ремонта. Предложенная методика, направленная на достижение требуемой точности контроля, может быть использована разработчиками других оптико-электронных средств бесконтактного контроля линейных размеров деталей, ориентированных перпендикулярно линии визирования.

Ключевые слова

паровые турбины, рабочие лопатки, эрозионный износ, хорда рабочей лопатки, контроль износа рабочей лопатки, оптико-электронная система, выбор параметров

Ссылка для цитирования: Родикова Л.С., Коротаев В.В., Тимофеев А.Н., Рыжова В.А., Мараев А.А., Михеев С.В. Методика выбора параметров оптико-электронных систем контроля износа рабочих лопаток паровых турбин по заданной величине суммарной погрешности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 2. С. 171–181. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-171-181

Selection of parameters of optoelectronic systems for monitoring the wear for steam turbine rotor blading based on the value of the total error

Liliana S. Rodikova¹✉, Valery V. Korotaev², Alexander N. Timofeev³,
Victoria A. Ryzhova⁴, Anton A. Maraev⁵, Sergey V. Mikheev⁶

^{1,2,3,4,5,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ ls_rodikova@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-4499-5299>

² korotaev_v_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

³ timofeev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>

⁴ victoria_ryz@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>

⁵ amaraev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7287-0414>

⁶ msv@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2042-7285>

Abstract

Optoelectronic wear monitoring system of rotor blades of steam turbine low-pressure cylinders provide an assessment of the chord value of the working blade in static conditions on a closed cylinder. However, these systems do not allow the operator to assess the wear with the necessary error during shaft rotation. The control process is complicated by the fact that the output edge of the blade is overlapped by the input edge of the next blade; therefore it is necessary to set a scanning direction for each section that will ensure the formation of blade video frames, including both the input and output edges. The shaft rotation mode requires the use of pulsed illumination of the edges of the working blades to reduce the amount of image smudge; therefore it is necessary to select the focal length of the camera lens, the diameter of the entrance pupil of the lens and the power of pulsed radiation sources. The development of a methodology for selecting system parameters will help to reduce the complexity of designing systems for various turbine models and application technologies. Therefore, this is an important task. A methodology has been developed for selecting the parameters of the wear control systems of the working blades, which is based on the criterion of equality of the main components of the total error of the chord value. The analytical studies used the relationship of the parameters of the matrix receiver of optical radiation, illumination sources and the optical circuit with the required characteristics of the system. Computer modeling of the information conversion process in the system under study took into account the relationship between the parameters of the moving blades and the parameters of the optical circuit. The experimental estimation of the system error in statics and dynamics is based on multiple measurements after calibration of the system according to known parameters of the blades. When using the developed methodology, it is possible to achieve the required field of view and a given error in controlling the chord value, due to the choice of: matrix optical radiation receiver, focal length of the camera lens, diameter of the lens entrance pupil, and power of radiation sources. Using the example of the fifth stage of the vane device of the K-1200 high unit power turbine, which is most susceptible to wear, it is shown that for maximum values of the rotation angles of the video probe is 19° and the delay time of frame synchronization is up to 0.18 s, the focal length of the camera lens should be less than 2.4 mm with a pulse illumination time of 0.05 s. Computer modeling has shown that the marginal error of the system can reach 0.011 mm, which illustrates the possibility of reducing the total error. Using the developed methodology, the main elements were selected and a layout of the system was created. The requirements for exposure time and delay time of frame synchronization are formulated. The effectiveness of the parameter selection methodology was confirmed by experimental studies of the system layout, which showed that the estimate of the standard deviation of the random component of the chord control error in dynamics was 0.26 mm, which is three times less than that of the previously developed system and meets the requirements for evaluating the operability of the rotor blades of steam turbines during operation and repair. The proposed technique can be used by developers of other optoelectronic means of contactless control of linear dimensions of parts oriented non-perpendicular to the line of sight.

Keywords

steam turbine, rotor blades, erosive wear, rotor blade chord, wear control of the rotor blade, optoelectronic system, parameter selection

For citation: Rodikova L.S., Korotaev V.V., Timofeev A.N., Ryzhova V.A., Maraev A.A., Mikheev S.V. Selection of parameters of optoelectronic systems for monitoring the wear for steam turbine rotor blading based on the value of the total error. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 171–181 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-171-181

Введение

Входные кромки рабочих лопаток (РЛ) цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин подвергаются сильному эрозионному износу, что ведет к сокращению ресурса их работы и возможным авариям. Это обуславливает необходимость периодического осмотра лопаточного аппарата с целью предотвращения аварий [1].

Применение современных видеоэндоскопов открывает возможности повышения точности бесконтактного контроля параметров формы РЛ при их статическом положении [2–4]. Однако существующие видеоэндоскопы непосредственно не могут применяться для эндоскопирования лопаточного аппарата в режиме валоповорота [5], который предполагает вращение ротора без поступления пара в ЦНД. При этом линейная скорость контролируемой области достигает 0,36 м/с, а в видеоэндоскопах не обеспечивается синхронизация видеокадров с положением РЛ.

Оптико-электронные системы контроля износа РЛ (ОЭСРЛ) [6–8] обеспечивают оценку величины хорды РЛ с погрешностью не более 0,9 мм без вскрытия ЦНД при непрерывном вращении ротора в режиме валоповорота с частотой до 1 об/мин.

Однако контроль величины хорды РЛ при применении ОЭСРЛ в режиме валоповорота затрудняется тем, что выходная кромка контролируемой лопатки может перекрываться входной кромкой следующей лопатки, поэтому необходимо задавать такое направление видеонаблюдения для каждого сечения, которое обеспечивает формирование видеокadres, содержащих изображение лопатки, включающее ее входную и выходную кромки. В результате хорды контролируемого сечения лопатки ориентированы перпендикулярно оптической оси системы, а плоскость изображения РЛ не совпадает с плоскостью фоточувствительной площадки приемника. Исходя из этого, в ОЭСРЛ величину хорды приходится определять по расфокусированному изображению лопатки, полученному при требуемом ракурсе видеонаблюдения [9–11].

Режим валоповорота также требует применения импульсной подсветки передней и задней кромок рабочих лопаток для уменьшения величины смаза изображения, что требует одновременного выбора фокусного расстояния объектива видеокамеры, диаметра входного зрачка объектива и мощности импульсных источников излучения.

Исследование сочетания геометрических и временных параметров элементов и ОЭСРЛ в целом, при ее эксплуатации в ограниченном пространстве актуально, поскольку позволяет сократить время оценки износа и диагностики состояния перемещающейся лопатки с требуемой погрешностью контроля не более 0,5 мм¹.

Целью работы является разработка методики выбора параметров оптико-электронных систем контроля

износа лопаточного аппарата ЦНД паровых турбин на закрытом цилиндре при валоповороте, которая обеспечивает требуемую погрешность контроля величины хорды РЛ посредством сочетания геометрических, энергетических и временных параметров элементов и системы в целом.

Возможности применения разрабатываемой методики оценивались при значениях параметров пятой (последней) ступени лопаточного аппарата ЦНД турбины большой единичной мощности К-1200, которая имеет наибольшие габариты и наиболее сильно подвержена износу, что позволяет находить предельно допустимые значения параметров элементов и ОЭСРЛ в целом.

Работа системы при контроле величины хорды рабочих лопаток

Обобщенная схема рассматриваемых ОЭСРЛ (рис. 1) содержит основные элементы: видеозонд 1, синхродатчик 2, метку 3 и компьютер 4.

Видеозонд 1 включает источники излучения 5 и 6, видеокамеру 7, содержащую объектив 8, и матричный фотоприемник 9. Видеокадр, фиксируемый видеокамерой 7, имеет размытие, ввиду того, что изображение РЛ не совпадает с чувствительной площадкой матричного фотоприемника 9 и из-за перемещения РЛ за время импульсной подсветки.

Цифровой сигнал, в котором содержится информация о проекции РЛ на плоскость матричного фотоприемника, в настоящей работе называется отображением объекта. Работа ОЭСРЛ заключается в обработке компьютером 4 отображений РЛ, получаемых с видеокамеры 7 видеозонда 1 при импульсной подсветке источниками излучения 5 и 6. При этом импульсы подсветки формируются по сигналам синхродатчика 2, основная функция которого — фиксировать моменты угловых положений осей РЛ при их пересечении оптической оси видеокамеры. При этом видеозонд фиксирует изображение первой исследуемой лопатки РЛ₁ и

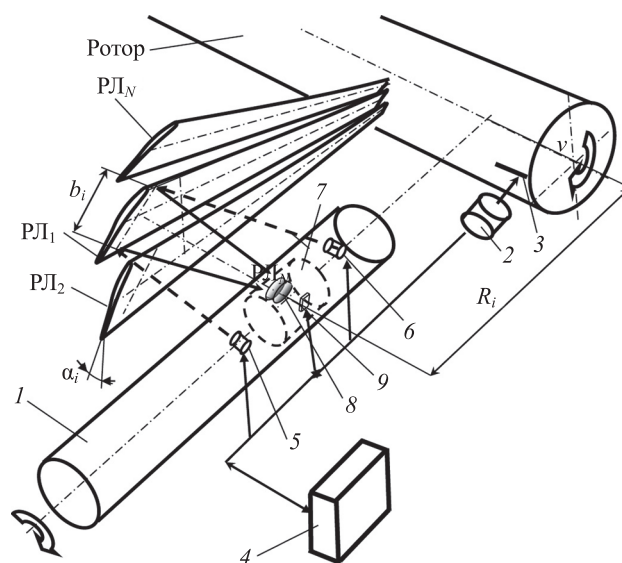


Рис. 1. Структурная схема системы и лопаточного аппарата
Fig. 1. Block diagram of system and blades unit of turbine

¹ РД 153-34.1-17.462-00. Методические указания о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта. Отраслевой руководящий документ. Утвержден РАО «ЕЭС России». М., ВТИ, 2001.

последней исследуемой лопаткой РЛ_N в данной ступени лопаточного аппарата при вращении ротора турбины с частотой ν .

Входная и выходная кромки РЛ требуют отдельной подсветки для обеспечения необходимого отношения сигнал/шум в обеих частях видеокadra, поэтому видеозонд содержит два импульсных источника оптического излучения 5 и 6. Контроль эрозийного износа РЛ происходит на основании изменения величины хорды b_i , которая определяется по координатам точек входной и выходной кромок профиля лопатки в конкретном сечении i . Вычисление величины хорды и оценка износа РЛ осуществляется с помощью компьютера 4. Полученная информация хранится в базе в течение всего срока эксплуатации турбины.

Особенностью эндоскопирования лопаточного аппарата паровых турбин является то, что видеозонд должен вводиться в межлопаточное пространство на величину R_i для последовательного контроля очередного сечения i , и при этом должен задаваться угол поворота видеозонда γ_i с учетом угла наклона хорды α_i . Угол γ_i , являющийся углом между нормалью к плоскости осей лопаток (ось OZ) и оптической осью видеокамеры, зависит от геометрии конкретного лопаточного аппарата и обусловлен тем, что для обеспечения наблюдения всей хорды AC (рис. 2) в одном кадре необходимо, чтобы лучи от точки C выходной кромки контролируемой лопатки РЛ₁ не экранировались поверхностью следующей лопатки РЛ₂ и попадали во входной зрачок объектива диаметром D . Величина угла поворота γ_i видеозонда в контролируемом сечении i в зависимости от конструктивных параметров ЦНД должна иметь величину [8]:

$$\gamma_i = \arctg \frac{s_i}{z_0} = \arctg \left(\frac{2\pi R_i}{b_i N \sin \alpha_i} + \frac{\pi R_i}{z_0 N} - \frac{D}{2z_0} - \text{ctg} \alpha_i \right), \quad (1)$$

где s_i — величина смещения оптической оси видеокамеры в плоскости осей лопаток для i -го контролируемого сечения; z_0 — расстояние от главной точки объектива видеокамеры до центра хорды в контролируемом сечении РЛ; R_i — расстояние от контролируемого сечения РЛ до оси ротора; b_i — величина хорды в контролиру-

руемом сечении; N — количество рабочих лопаток в исследуемой ступени ротора; α_i — угол наклона хорды.

При изменении угла поворота γ_i выполним корректировку времени запаздывания t_0 при захвате видеокadров, которое зависит от линейного смещения s_i центра хорды относительно оптической оси, а также от частоты вращения ротора ν :

$$t_0 = \frac{s_i}{2\pi \nu R_i} = \frac{z_0}{\nu b_i N \sin \alpha_i} + \frac{1}{2\nu N} - \frac{z_0 \text{ctg} \alpha_i}{2\pi \nu R_i} - \frac{D}{4\pi \nu R_i}. \quad (2)$$

Исследования показали [8, 9], что для реальных геометрических параметров РЛ наиболее сильно подверженной износу последней ступени лопаточного аппарата ЦНД турбин большой единичной мощности существует такая граничная величина радиуса R_b , при которой угол γ_i принимает значение [8]

$$\gamma_i = \alpha_i. \quad (3)$$

Если $R_i > R_b$, то ось видеокамеры устанавливается перпендикулярно хорде, и изображение хорды будет сформировано на матричном поле анализа, в то время как при $R_i < R_b$ ось видеокамеры невозможно установить перпендикулярно хорде, и плоскость изображения хорды Y' будет ориентирована под углом к матричному полю анализа Y'_{DIS} , что приводит к расфокусировке изображения по краям хорды.

Найдем величину R_b из выражения (1) с учетом соотношения (3)

$$R_b = \frac{Nb_i(4z_0 + D \sin 2\alpha_i)}{4\pi \cos \alpha_i (2z_0 + b_i \sin \alpha_i)}$$

Компьютерное моделирование характеристик ОЭСРЛ с учетом параметров лопаточного аппарата К-1200 ($1500 \text{ мм} > R_i > 2500 \text{ мм}$; $250 \text{ мм} > b_i > 150 \text{ мм}$; $25^\circ > \alpha_i > 10^\circ$) показало, что если $R_i < R_b$, то угол поворота видеозонда γ_i при эксплуатации может достигать 19° , а время запаздывания t_0 увеличивается до 0,18 с.

Если радиусы контролируемых сечений $R_i > R_b$, то вычисление величины хорды b_i осуществляется по величине ее изображения b'_i на матричном фотоприемнике с учетом фокусного расстояния объектива f и рассчитывается по формуле:

$$b_i = (z_0 - f \cos \alpha_i) B'_i / f \cos \alpha_i, \quad (4)$$

в то время как для контролируемых сечений при $R_i < R_b$ вычисление величины хорды b_i осуществляется по величине проекции B'_i ее изображения b'_i на матричном фотоприемнике [8]:

$$b_i = \frac{z_0 \sqrt{\left(z_0^2 f^2 - (z_0 - f \cos \gamma_i)^2 \times \right.}{0,5(z_0 - f \cos \gamma_i) B'_i \sin^2(\alpha_i - \gamma_i) \cos(\alpha_i - \gamma_i) \cos \gamma_i}. \quad (5)$$

В ранее проведенных исследованиях [11] показано, что уменьшение погрешности контроля возможно на основе использования метода нахождения связной компоненты точек входной и выходной кромок по половине максимального уровня облученности в

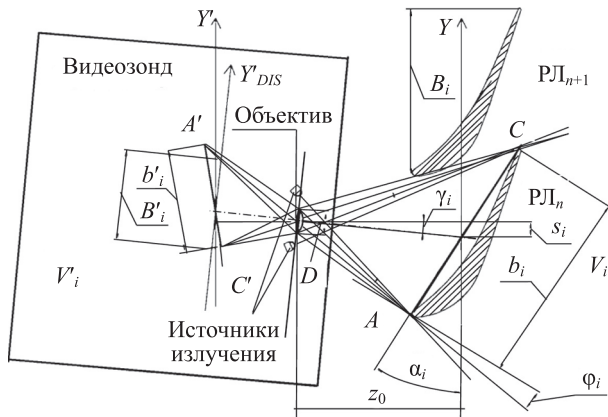


Рис. 2. Ход лучей в оптической схеме оптико-электронной системы контроля износа

Fig. 2. Ray diagram in the optical scheme of the video probe

бинаризованном отображении РЛ B'_i на матричном фотоприемнике. Однако в этом случае необходимо учитывать пространственное распределение облученности на матричном фотоприемнике, которое и определяет предельную погрешность ОЭСРЛ.

Предельная погрешность определения величины хорды рабочих лопаток

Под предельной погрешностью ОЭСРЛ следует понимать такую погрешность, для которой единственным ее источником является шумовая погрешность определения координат границ кромок РЛ в проекции изображения на матричном фотоприемнике [12].

При использовании алгоритма определения координат кромок по заданному уровню облученности их предельная погрешность определения координат проекций точек A' и C' изображений кромок РЛ зависит от размера пиксела, уровня внутренних шумов матричного фотоприемника, разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и методов обработки кадров [13, 14].

Величина среднего квадратического отклонения (СКО) погрешности определения размера хорды на матричном приемнике оптического излучения (МПОИ — digital image sensor, DIS) δb_i^{DIS} зависит от СКО погрешностей δB_{iA}^{DIS} и δB_{iC}^{DIS} определения координат точек A и C кромок. Основываясь на выражении (5), а также отношении db_i^{DIS}/dB_{iA}^{DIS} , рассчитаем погрешность определения координат точки A :

$$\delta b_{iA}^{DIS} = \frac{z_0/\cos\gamma_i - 0,5b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i) - f}{f \cos(\alpha_i - \gamma_i)} \delta B_{iA}^{DIS}, \quad (6)$$

и для точки C кромки:

$$\delta b_{iC}^{DIS} = \frac{z_0/\cos\gamma_i + 0,5b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i) - f}{f \cos(\alpha_i - \gamma_i)} \delta B_{iC}^{DIS}. \quad (7)$$

Поскольку определение координат границ кромок происходит на едином матричном поле, то выполняется равенство $\delta B_{iA}^{DIS} = \delta B_{iC}^{DIS} = \delta B_{i\Sigma}^{DIS}$ и суммарная величина предельной погрешности определения величины хорды δb_i^{DIS} рассматривается для расположения оптической оси видеокамеры согласно граничному условию (3). Определим суммарную величину предельной погрешности с учетом нормальности функции распределения составляющих δB_{iA}^{DIS} (6) и δB_{iC}^{DIS} (7):

$$\delta b_i^{DIS} = \frac{\sqrt{(2z_0/\cos\gamma_i - f)^2 + 0,5b_i^2 \sin^2(\alpha_i - \gamma_i)}}{f \cos(\alpha_i - \gamma_i)} \delta B_{i\Sigma}^{DIS}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что в процессе эксплуатации существенное влияние на погрешность δb_i^{DIS} будут оказывать величина $\delta B_{i\Sigma}^{DIS}$, которая обусловлена прежде всего отношением сигнал/шум и такими параметрами, как расстояние от объектива до оси РЛ и фокусным расстоянием объектива.

В работах [15, 16] показано, что при разрядности АЦП равной 8, для наиболее распространенных матричных фотоприемников на основе КМОП-структур, СКО погрешности определения координат точек в ото-

бражении объектов зависят от отношения сигнал/шум [13, 17]. Отношение сигнал/шум в диапазоне значений $200 \geq \mu \geq 5$ допустимо аппроксимировать выражением [18]:

$$\delta B_i^{DIS} = 0,9 p/\mu, \quad (9)$$

где p — размер пиксела матричного фотоприемника; μ — отношение сигнал/шум.

Выполнено компьютерное моделирование оценок предельной погрешности определения величины хорды РЛ пятой ступени лопаточного аппарата ЦНД турбины большой единичной мощности К-1200 при контроле хорды величиной $b = 200$ мм с расстояний $z_0 = 120$ мм и $z_0 = 160$ мм. Моделирование осуществлено при использовании видеокамеры на основе КМОП-структур с размером пиксела матричного фотоприемника $p = 2,25$ мкм, частоте кадров равной 70, отношении сигнал/шум не менее 10 дБ, величине фокусного расстояния объектива $f = 4,5$ мм и разрядности АЦП — 8.

Полученные результаты (рис. 3) показали, что оценки СКО определения координат точки A δb_{iA}^{DIS} (кривые 1 и 3) и точки C δb_{iC}^{DIS} (кривые 2 и 4) кромок РЛ при $R_i = 1750$ мм с углом наклона хорды $\alpha = 20^\circ$ отличаются на 35 %. Вместе с тем оценка СКО предельной погрешности δb_i^{DIS} (кривые 5 и 6) не превышает 0,011 мм.

При увеличении R_i величина оценки СКО предельной погрешности δb_i^{DIS} (кривые 5 и 6) изменяется незначительно (менее 1 %). Следовательно, для анализа погрешностей и выбора параметров системы в целом

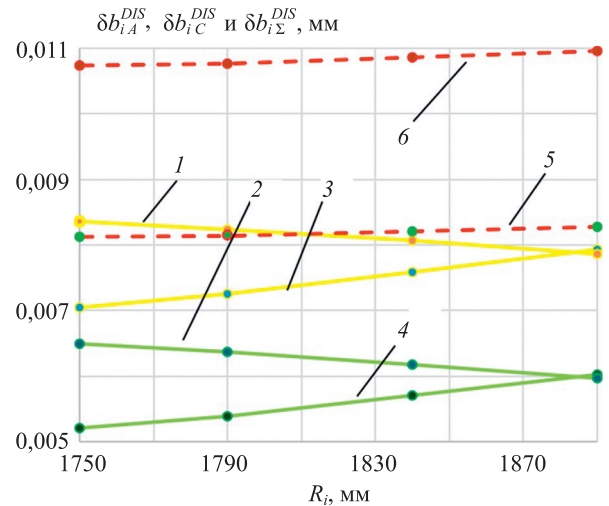


Рис. 3. Графики оценок предельной погрешности определения координат кромки A (кривые 1, 3) δb_{iA}^{DIS} и кромки C (кривые 2, 4) δb_{iC}^{DIS} хорды рабочей лопатки, а также предельной погрешности определения величины хорды δb_i^{DIS} (кривые 5, 6) в зависимости от радиусов контролируемого сечения R_i для расстояний $z_0 = 120$ мм (кривые 1, 2, 5) и $z_0 = 160$ мм (кривые 3, 4, 6)

Fig. 3. Graphs of the limit error of determining coordinates of the edge A (lines 1, 3) δb_{iA}^{DIS} , of the edge C (lines 2, 4) δb_{iC}^{DIS} of the chord of the RB, and of the error of determining the value of the chord as a whole δb_i^{DIS} (5, 6) vs. radii R_i of the section controlled and values of distances $z_0 = 120$ mm (1, 2, 5) and $z_0 = 160$ mm (3, 4, 6)

можно руководствоваться формулой связи параметров (4), а из выражения (8), и с учетом условия (3), предельную погрешность контроля величины хорды допустимо рассчитать с помощью выражения:

$$\delta b_i^{DIS} = \frac{(z_0 - f \cos \alpha_i) \sqrt{2}}{f \cos \alpha_i} \delta B_i^{DIS}. \quad (10)$$

При проектном расчете характеристик ОЭСРЛ, с учетом выбранных параметров объектива видеокамеры и матричного фотоприемника, выражение (10) позволяет находить предельную погрешность контроля величины хорды b_i^{DIS} для любого контролируемого сечения РЛ R_i при учете выражения (9), включающего и отношение сигнал/шум.

Методика выбора и расчета параметров видеозонда системы

Для достижения требуемой погрешности контроля величины хорды РЛ необходимо обеспечивать выбор и расчет геометрических параметров оптической системы (фокусное расстояние объектива, диаметр входного зрачка оптической системы, и др.), а также энергетических параметров источников оптического излучения, размера матричного поля фотоприемника l_{DIS} , размера пиксела и времени экспозиции.

Предлагаемая методика выбора параметров элементов ОЭСРЛ и ОЭСРЛ в целом базируется на основе критерия равенства влияния основных составляющих суммарной погрешности определения величины хорды δb_i^{Σ} и содержит следующие этапы: выбор размера площадки фотоприемника и фокусного расстояния объектива видеокамеры; выбор диаметра входного зрачка объектива и мощности источников излучения; выбор требуемого времени экспозиции t_{exp} матричного фотоприемника.

Этап 1. Выбор размера фотоприемной площадки и фокусного расстояния объектива видеокамеры. Фокусное расстояние объектива видеокамеры f является одним из основных параметров, который, с одной стороны, обеспечивает в ОЭСРЛ требуемое поле зрения $2\beta_i$, а с другой стороны — предельную погрешность контроля величины хорды δb_i^{DIS} (8).

Поскольку величина поля зрения обеспечивается фокусным расстоянием объектива f и размером фотоприемной площадки фотоприемника l_{DIS} , то из рис. 2 следует:

$$2\beta_i^A = 2 \arctg \frac{l_{DIS}(z_0 - f \cos(\alpha_i - \gamma_i))}{2z_0 f}. \quad (11)$$

Для обеспечения требуемого диапазона контроля величины хорды (как правило, от 120 мм до 200 мм) из (8) и (11) для случая, когда $R_i < R_b$, определим величину фокусного расстояния:

$$f = \frac{l_{DIS} z_0 [z_0 - 0,5 b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i) \cos \gamma_i]}{z_0 b_i \cos(\alpha_i - \gamma_i) \cos \gamma_i + l_{DIS} \cos \gamma_i \times [z_0 - 0,5 b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i) \cos \gamma_i]}$$

а когда $R_i > R_b$ ($\gamma_i = \alpha_i$):

$$f = l_{DIS} z_0 / (b_i + l_{DIS}) \cos \alpha_i.$$

Если задать равное влияние основных составляющих погрешности на суммарную погрешность определения величины хорды δb_i^{Σ} , то в зависимости от количества составляющих m , можно рассчитать допустимую величину предельной погрешности:

$$\delta b_i^{DIS} = \delta b_i^{\Sigma} / \sqrt{m}.$$

Для обеспечения требуемой величины суммарной погрешности контроля хорды δb_i^{Σ} и с учетом предельной погрешности определения величины хорды δb_i^{DIS} , в соответствии с выражениями (10) и (9) для выбранного типа матричного фотоприемника, при $R_i > R_b$, рассчитаем искомое фокусное расстояние объектива:

$$f = \frac{1,8 p z_0 \sqrt{m}}{(\mu \delta b_i^{\Sigma} + 0,9 p \sqrt{m}) \cos \alpha_i}.$$

На рис. 4 показаны результаты моделирования зависимостей требуемых фокусных расстояний объектива f от величин расстояний z_0 для контролируемых сечений РЛ в ее корневой (кривые 1 и 3) ($R_i = 1750$ мм) и периферийной (кривые 2 и 4) ($R_i = 2090$ мм) частях.

Моделирование выполнялось при отношении сигнал/шум равном 5, размере пиксела матричного фотоприемника — 2,25 мкм, размере матричного поля — 7,3 мм, количестве составляющих погрешности — 9 и требуемой погрешности контроля хорды у края РЛ — $\delta b_i^{\Sigma} = 0,1$ мм.

На начальном этапе проектирования ОЭСРЛ все расчеты проведены для сечений, близких к корневым сечениям РЛ (кривые 1 и 3), так как для них угол наклона хорды и ее размеры максимальны. Из полученных графиков (рис. 4) следует, что необходимая величина фокусного расстояния объектива f_{opt} (пересечение кривых 1 и 3) равна 2,4 мм при расстоянии от объектива до оси РЛ равном $z_{0opt} = 106$ мм.

Отметим, что при перемещении видеозонда к периферийным сечениям РЛ фокусное расстояние было

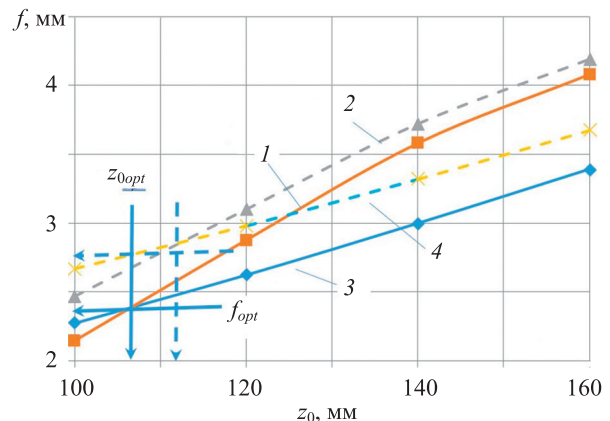


Рис. 4. Графики требуемых фокусных расстояний объектива f видеокамеры для корневой (кривые 1, 3) и периферийной (кривые 2, 4) сечений i в зависимости от расстояний от объектива до рабочей лопатки

Fig. 4. Graphs of the required focal lengths f of the camera lens for the root section (1, 3) and for the peripheral section (2, 4) of RB distance from the lens to the RB axis

увеличено до 2,6 мм (пересечение кривых 2 и 4). В этом случае допустимое расстояние от объектива до РЛ изменено до значения $z_{0opt} = 114$ мм. При этом в ОЭСРЛ использован объектив с переменным фокусным расстоянием, в противном случае необходимо допустить увеличение погрешности контроля хорды РЛ.

Этап 2. Выбор диаметра входного зрачка объектива и мощности источников излучения. В ОЭСРЛ для реализации требуемых значений погрешности определения величины хорды РЛ δb_i^{Σ} требуется обеспечить отношение сигнал/шум μ , которое зависит от величины распределения облученности на фотоприемнике, физических параметров матричного фотоприемника и характеристик РЛ [13, 19].

При выборе матричного фотоприемника необходимо учитывать инвариант Лагранжа–Гельмгольца, который определяет взаимосвязь размера входного зрачка D , поля зрения объектива видеокамеры β_{ob} , апертурного угла фотоприемника θ_{DIS} и размера фоточувствительной площадки l_{DIS} [20]. Тогда размер входного зрачка D должен быть:

$$D \leq (l_{DIS} \sin \theta_{DIS}) / 2 \text{tg} \beta_{ob}. \quad (12)$$

Из рис. 2 следует, что для возможных параметров α_i , b_i , z_0 и при требуемых значениях γ_i (1) величина угла объектива имеет вид:

$$\beta_{ob} = \arctg \frac{0,5b_i \cos(\alpha_i - \gamma_i)}{z_0 / \cos \gamma_i - 0,5b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i)}. \quad (13)$$

Тогда из выражений (12) и (13) получим максимальное допустимое значение диаметра входного зрачка:

$$D \leq \frac{[2z_0 / \cos \gamma_i - b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i)] l_{DIS} \sin \theta_{DIS}}{b_i \cos(\alpha_i - \gamma_i)}. \quad (14)$$

Для эффективной работы алгоритма обработки кадров РЛ максимальная величина облученности E^C в изображении наиболее удаленной точки C кромки РЛ на матричном фотоприемнике должна приближаться к уровню насыщения матричного фотоприемника E_{sat}^{DIS} , но не превышать его [21–23]. При использовании матричного фотоприемника в различных оптико-электронных системах контроля применим соотношение [20]:

$$E^C = 0,7 E_{sat}^{DIS}. \quad (15)$$

В качестве источников импульсной подсветки целесообразно использовать полупроводниковые источники оптического излучения, у которых диаграмму излучения можно аппроксимировать как ламбертовскую в пределах угла излучения $\theta_{1/2}$. Тогда из выражений (13)–(15) получим относительное отверстие объектива видеокамеры:

$$\frac{D}{f} = \frac{(z_i^C)^2 \sin \theta_{1/2}}{[z_0 / \cos \gamma_i + 0,5b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i) - f]} \times \sqrt{\frac{2,8 E_{sat}^{DIS} \cos(\alpha_i - \gamma_i)}{\tau \rho_i^C K P_e \cos \varphi_i^C \cos \varepsilon_i^C}} \quad (16)$$

где z_i^C — расстояние от источника излучения до выходной кромки C РЛ; φ_i^C — угол между нормалью к поверхности РЛ в точке C кромки и падающим на него пучком оптического излучения (рис. 2); ε_i^C — угол между направлением луча и нормалью к кромке в точке C ; K — коэффициент корректировки диаграммы излучения источников [20]; P_e — мощность излучения источника излучения; ρ_i^C — коэффициент диффузного отражения кромки РЛ; τ — интегральный коэффициент пропускания оптической системой отраженного излучения от РЛ.

Анализ выражения (16) показал, что для возможных расстояний z_0 , параметров РЛ (α_i , b_i), угла поворота видеозонда γ_i , величины коэффициента диффузного отражения ρ_i^C и уровня насыщения матричного фотоприемника E_{sat}^{DIS} , относительное отверстие объектива D/f находится в пределах от 1/2 до 1/1.

Тогда из выражения (16) следует, что для величин D/f в указанном диапазоне, требуемый уровень мощности источников излучения P_e для подсветки выходной кромки в точке C определяется выражением:

$$P_e = \frac{2,8 E_{sat}^{DIS} f^2 (z_i^C \sin \theta_{1/2})^2 \cos(\alpha_i - \gamma_i)}{\tau \rho_i^C K_2 D^2 [z_0 / \cos \gamma_i + 0,5b_i \sin(\alpha_i - \gamma_i) - f]^2 \cos \varphi_i^C \cos \varepsilon_i^C}.$$

Полученное выражение позволяет выбрать величину мощности источников излучения для обеспечения необходимой облученности РЛ.

Этап 3. Выбор времени экспозиции кадров. При валоповороте равномерное движение контролируемого сечения РЛ со скоростью V_{Ri} за время экспозиции t_{exp} вызывает смаз в изображении [24, 25]. Этот смаз приводит к увеличению размера цифрового отображения лопатки. С учетом несовпадения плоскостей изображения и фотоприемного матричного поля рассчитаем погрешность, вызванную смазом изображения:

$$\delta b_i^{smear} = V_{Ri} t_{exp} / \cos(\alpha_i - \gamma_i) = \frac{2\pi v R_i t_{exp}}{\cos(\alpha_i - \gamma_i)}, \quad (17)$$

где v — частота вращения ротора при валоповороте в оборотах в секунду.

Из выражения (17) следует, что погрешность, вызванная смазом δb_i^{smear} , пропорциональна радиусу контролируемого сечения и времени экспозиции.

Как отмечено на этапе 1, при равном влиянии всех составляющих погрешностей на суммарную погрешность контроля величины хорды δb_i^{Σ} , допустимую величину погрешности от смаза δb_i^{smear} можно рассчитать по формуле:

$$\delta b_i^{smear} = \delta b_i^{\Sigma} / \sqrt{m}. \quad (18)$$

В этом случае из (17) и с учетом (18) определим требуемое время экспозиции t_{exp} на матричном фотоприемнике:

$$t_{exp} = \frac{\delta b_i^{\Sigma} \cos(\alpha_i - \gamma_i)}{2\pi v R_i \sqrt{m}}.$$

Компьютерное моделирование ОЭСРЛ при частоте вращения ротора $v = 1$ об/с, числе составляющих погрешности равно 9, требуемой суммарной погреш-

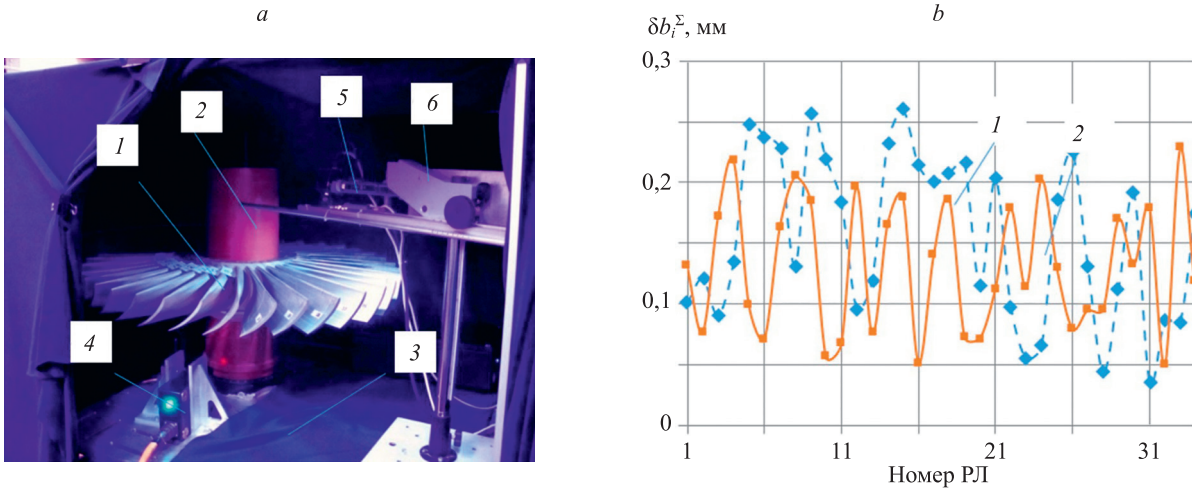


Рис. 5. Установка для исследования погрешности измерения хорды рабочей лопатки в динамике (а) и оценки среднеквадратического отклонения погрешности определения величины хорды δb_i^Σ для каждой рабочей лопатки в статике (кривая 1) и в динамике (кривая 2) (b)

Fig. 5. Model for the study of the RB chord value measurement error in dynamics (a), and estimated RMS of the chord value δb_i^Σ determining error for each RB in statics — graph 1 and in dynamics — graph 2 (b)

ности $\delta b_i^\Sigma = 0,1$ мм показало, что для радиусов контролируемых сечений R_i в диапазоне от 1500 до 2500 мм требуемое время экспозиции t_{exp} изменяется в диапазоне от 0,05 до 0,06 с, что в ОЭСРЛ обеспечивается регулировкой времени импульсной подсветки.

Экспериментальные исследования макета системы

Для подтверждения эффективности предложенной методики проведено экспериментальное исследование характеристик элементов образца ОЭСРЛ, сформированной для применения на пятой ступени ЦНД паровой турбины К-1200-6.8/50.

Образец ОЭСРЛ содержал: видеозонд, использующий видеозондоскоп Мереон 33251 и имеющий разрешение 640×480 пикселей; синхродатчик в виде датчика метки ODY A44A5-49N-25C2Ю с зеркальной меткой; источники импульсной подсветки, выполненные в виде светодиодов GNL-5053PGC, и компьютер, реализованный на основе ноутбука Acer Nitro 5 AN515-54-52N7 (Intel Core i5 9300H 2400 MHz). Целью экспериментов являлось исследование величины одного из основных параметров ОЭСРЛ — суммарной погрешности определения величины хорды РЛ δb_i^Σ при валоповороте ротора.

В макете лопаточного аппарата использовано 36 прототипов РЛ (рис. 5, а), напечатанных на 3D-принтере Ultimaker 2 Extended и имеющих величину хорды $b_i = 102,1 \pm 0,1$ мм. Прототипы РЛ были закреплены равномерно на валу 2, диаметром 200 мм, который устанавливался на автоматической угловой подвижке 3 Standa 8MRB240-152-59. Синхродатчик 4 позволяет определять угловое положение вала 2 с погрешностью $12'$.

Подвижка 3 обеспечивала стабильное вращение вала 2 со скоростью 4 об/мин, имитирующее режим валоповорота при равенстве линейной скорости точек поверхности РЛ₁ с линейной скоростью точки поверх-

ности РЛ пятой ступени ЦНД паровой турбины К-1200 при валоповороте. Расстояние от видеозонда 5, закрепленном на кронштейн 6, до РЛ₁ составляло 70 мм, время экспозиции 0,014 с. Перед экспериментами проводилась калибровка макета системы по определению масштабного коэффициента на основе измеренных контактными средствами величин хорд каждого из 36 прототипов РЛ.

Оценка погрешности определения хорды с помощью видеозонда производилась по каждой из 36 РЛ по 10 сериям измерений.

Анализ результатов эксперимента показал, что с учетом погрешности изготовления прототипа РЛ, не превышавшей 0,1 мм и отношении сигнал/шум не менее 10 дБ, оценка СКО погрешности контроля величины хорды δb_i^Σ в статике составила 0,22 мм (кривая 1), а в динамике — 0,26 мм (кривая 2) (рис. 5, б). Полученные результаты практически в три раза лучше, чем в ранее разработанной системе [8], что подтверждает эффективность применения предложенной методики выбора и расчета параметров системы.

Заключение

Показано, что предельная погрешность предложенного метода контроля величин хорды рабочих лопаток, основанного на нахождении координат их входной и выходной кромок для отношения сигнал/шум не менее 10 дБ, составляет величину 0,011 мм и более чем на порядок превышает требования к суммарной погрешности определения величины хорды, что доказывает возможности снижения погрешности контроля.

Разработана методика выбора параметров оптико-электронных систем контроля величины хорды рабочих лопаток цилиндров низкого давления паровых турбин на закрытом цилиндре при валоповороте, основанная на равенстве влияния основных составляющих суммарной погрешности определения величины хорды

с учетом угла поворота видеозонда и расстояния до рабочей лопатки, которая содержит:

- выбор фокусного расстояния объектива видеокамеры, обеспечивающего требуемое поле зрения и предельную погрешность контроля величины хорды;
- выбор диаметра входного зрачка объектива и мощности источников излучения, необходимых для обеспечения требуемого уровня подсветки рабочих лопаток в зависимости от расстояния от источников излучения до входной и выходной кромок рабочих лопаток, угла наклона видеозонда, коэффициента диффузного рассеивания излучения кромками рабочих лопаток и максимально допустимого уровня облученности на выбранном матричном фотоприемнике;
- выбор требуемого времени экспозиции матрично-го фотоприемника, исходя из допустимой вели-

ны скоростного смаза в изображении рабочей лопатки.

Экспериментальные исследования макета, разработанного в соответствии с предложенной методикой, показали, что оценка среднеквадратического отклонения погрешности измерения хорды в статике составила 0,22 мм, а в динамике — 0,26 мм, что лучше, чем в ранее разработанных системах, решающих поставленную задачу. Полученные результаты подтвердили эффективность применения предложенной методики выбора и расчета параметров системы.

Разработанная методика, направленная на достижение требуемой точности контроля, может быть использована разработчиками других оптико-электронных средств бесконтактного контроля линейных размеров деталей, ориентированных перпендикулярно линии визирования.

Литература

1. Назолин А.Л. Предупреждение аварий и катастроф вращающегося оборудования критически и стратегически важных объектов техносферы (на примере мощных турбоагрегатов атомных и тепловых электростанций): научный доклад / Российская академия наук. М., 2017. 40 p.
2. Geng J., Xie J. Review of 3-D endoscopic surface imaging techniques // *IEEE Sensors Journal*, 2014. V. 14. N 4. P. 945–960. <https://doi.org/10.1109/jssen.2013.2294679>
3. Горевоy А.В., Мачихин А.С., Хохлов Д.Д., Батшев В.И., Калошин В.А., Перфилов А.М. Применение трассировочной модели оптико-электронной системы для повышения точности стереоскопических эндоскопических измерений // *Дефектоскопия*, 2017. № 9. С. 44–53.
4. Чичигин Б.А., Гроо И.А. Разработка малогабаритной высокоскоростной системы измерительной дефектоскопии и ее испытание на макетных объектах // *Радиотехника и электроника*, 2022. Т. 67. № 7. С. 668–675. <https://doi.org/10.31857/S0033849422070075>
5. Щинников П.А., Ноздренко Г.В., Михайленко А.И., Дворцовой А.И., Сафронов А.В. Автоматизация технологических процессов на ТЭС и управление ими. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 291 с.
6. Хаимов В.А., Кокин Е.Ш., Пузырев Е.И., Воронков Е.О., Ганжин В.А. Внедрение системы оперативного контроля и диагностики эрозийного износа рабочих лопаток мощных паровых турбин // *Электрические станции*, 2006. № 12. С. 32–36.
7. Kasl J., Matějová M., Mrštík J. Failure analysis of rotating blades of lowpressure steam turbine rotors and possibility of prediction corrosion-fatigue ruptures // *MATEC Web of Conferences*, 2018. V. 188. P. 04020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818804020>
8. Shut G.A., Korotaev V.V., Puzyrev E.I., Ryzhova V.A., Timofeev A.N., Akhmerov A.H., Rodikova L.S. Videoendoscopy of working blades of steam turbines and control of their geometrical parameters // *Journal of Optical Technology*, 2020. V. 87. N 11. P. 677–683. <https://doi.org/10.1364/jot.87.000677>
9. Малорасходные режимы ЦНД турбины Т-250/300-240 / под ред. В.А. Хаимова. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 240 с.
10. Leiner D. Digital Endoscope Design. SPIE, 2015. <https://doi.org/10.1117/3.2235283>
11. Шуть Г.А., Пузырев Е.И., Васильева А.В., Васильев А.С., Некрылов И.С., Ахмеров А.Х., Тимофеев А.Н. Комплексная система эндоскопирования для контроля эрозийного износа лопаток паровых турбин // *Известия вузов. Приборостроение*, 2020. Т. 63. № 3. С. 228–237. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-228-236>
12. Todros K., Hero A.O. Measure-transformed quasi-maximum likelihood estimation // *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017. V. 65. N 3. P. 748–763. <https://doi.org/10.1109/tsp.2016.2621732>
13. Андреев А.Л. Моделирование и расчет автоматизированных видеодиагностических систем наблюдения за объектами: методи-

References

1. Nazolin A.L. *Prevention of accidents and disasters of rotating equipment for critically and strategically important technospheric facilities (based on the example of powerful turbine units of nuclear and thermal power plants): contribution report*. Moscow, RAS, 2017, 40 p. (in Russian)
2. Geng J., Xie J. Review of 3-D endoscopic surface imaging techniques. *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 945–960. <https://doi.org/10.1109/jssen.2013.2294679>
3. Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Khokhlov D.D., Batshev V.I., Kaloshin V.A., Perfilov A.M. Applying a ray tracing model of an optoelectronic system to improve the accuracy of endoscopic measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 9, pp. 660–668. <https://doi.org/10.1134/S1061830917090054>
4. Chichigin B.A., Groo I.A. Development of a small-scale high-speed system of measuring defectoscopy and its testing on different objects. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, vol. 67, no. 7, pp. 827–833. <https://doi.org/10.1134/s1064226922070075>
5. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Mikhailenko A.I., Dvortcevoi A.I., Safronov A.V. *Automation and Management of Technological Processes at Thermal Power Plants*. Novosibirsk, NSTU, 2014, 291 p. (in Russian)
6. Khaimov V.A., Kokin E.Sh., Puzyrev E.I., Voronkov E.O., Ganzhin V.A. Implementation of a system for operational monitoring and diagnosis of working blades erosive wear in powerful steam turbines. *Electrical Stations*, 2006, no. 12, pp. 32–36. (in Russian)
7. Kasl J., Matějová M., Mrštík J. Failure analysis of rotating blades of lowpressure steam turbine rotors and possibility of prediction corrosion-fatigue ruptures. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 188, pp. 04020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818804020>
8. Shut G.A., Korotaev V.V., Puzyrev E.I., Ryzhova V.A., Timofeev A.N., Akhmerov A.H., Rodikova L.S. Videoendoscopy of working blades of steam turbines and control of their geometrical parameters. *Journal of Optical Technology*, 2020, vol. 87, no. 11, pp. 677–683. <https://doi.org/10.1364/jot.87.000677>
9. *Low-Flow Modes of T-250/300-240 LPC Turbine*. Ed. by V.A. Khaimov. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2007, 240 p. (in Russian)
10. Leiner D. Digital Endoscope Design. SPIE, 2015. <https://doi.org/10.1117/3.2235283>
11. Shut G.A., Puzyrev A.V., Vasileva A.V., Vasilev A.S., Nekrylov I.S., Akhmerov A.K., Timofeev A.N. Integrated endoscopy system for monitoring erosion wear of steam turbine blades. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 3, pp. 228–237. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-228-236>
12. Todros K., Hero A.O. Measure-transformed quasi-maximum likelihood estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, vol. 65, no. 3, pp. 748–763. <https://doi.org/10.1109/tsp.2016.2621732>
13. Andreev A.L. *Modeling and Calculation of Automated Video Information Systems for Objects Monitoring: Guidelines*

- ческие указания к лабораторным работам. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 82 с.
14. Uss M., Vozel B., Lukin V., Chehdi K. Potential accuracy of translation estimation between radar and optical images // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9643. P. 96430W. <https://doi.org/10.1117/12.2194071>
 15. Tan Q., Kou Y., Miao J., Liu S., Chai B. A model of diameter measurement based on the machine vision // *Symmetry*. 2021. V. 13. N 2. P. 187. <https://doi.org/10.3390/sym13020187>
 16. Фам Н.Т., Тимофеев А.Н., Коротаев В.В., Рыжова В.А., Родригеш Ж.Ж.П.К. Анализ дополнительных погрешностей оптико-электронной системы контроля положения железнодорожного пути // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 1. С. 15–23. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-1-15-23>
 17. Старосотников Н.О., Фёдоров П.В. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 1. С. 79–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86>
 18. Pham N.T., Timofeev A.N., Nekrylov I.S. Study of the errors of stereoscopic optical-electronic system for railroad track position // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11056. P. 110562F. <https://doi.org/10.1117/12.2526081>
 19. Potapov A.I., Kul'chitskii A.A., Smorodinskii Y.G. Analyzing the accuracy of a device for controlling the position of a rotating plane // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. N 11. P. 757–764. <https://doi.org/10.1134/S1061830918110086>
 20. Коротаев В.В., Мараев А.А., Тимофеев А.Н. Телеориентирование в луче с оптической равносигнальной зоной. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 326 с.
 21. Nose A., Yamazaki T., Katayama H., Uehara S., Kobayashi M., Shida S., Odahara M., Takamiya K., Matsumoto S., Miyashita L., Watanabe Y., Izawa T., Muramatsu Y., Nitta Y., Ishikawa M. Design and performance of a 1 ms high-speed vision chip with 3D-stacked 140 GOPS column-parallel PEs // *Sensors*. 2018. V. 18. N 5. P. 1313. <https://doi.org/10.3390/s18051313>
 22. Stefanov K.D., Clarke A.S., Ivory J., Holland A.D. Design and performance of a pinned photodiode CMOS image sensor using reverse substrate bias // *Sensors*. 2018. V. 18. N 1. P. 118. <https://doi.org/10.3390/s18010118>
 23. Maraev A.A., Shut G.A., Timofeev A.N., Mikheev S.V., Akhmerov A.Kh., Rodikova L.S., Konyakhin I.A. Effect of illumination on errors in estimation of a rotor blade chord value during intelligent video endoscopy of a closed steam turbine cylinder // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. V. 419. P. 169–185. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97004-8_13
 24. Ting-Fa X., Peng Z. Image motion-blur-based object's speed measurement using an interlaced scan image // *Measurement Science and Technology*. 2010. V. 21. N 7. P. 075502. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/7/075502>
 25. Фам Н.Т., Пантюшина Е.Н., Тимофеев А.Н., Васильев А.С., Динь Б.М. Влияние скорости движения оптико-электронной системы на погрешность контроля положения железнодорожного пути // *Известия вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61. № 9. С. 814–822. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-9-814-822>
 - for laboratory work. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 82 p. (in Russian)
 14. Uss M., Vozel B., Lukin V., Chehdi K. Potential accuracy of translation estimation between radar and optical images. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9643, pp. 96430W. <https://doi.org/10.1117/12.2194071>
 15. Tan Q., Kou Y., Miao J., Liu S., Chai B. A model of diameter measurement based on the machine vision. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 187. <https://doi.org/10.3390/sym13020187>
 16. Pham N.T., Timofeev A.N., Korotaev V.V., Ryzhova V.A., Rodrigues J.J.P.C. An analysis of additional errors of the optical-electronic system for monitoring the railway track position. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 15–23. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-1-15-23>
 17. Starasotnikau M.A., Feodortsau R.V. Accuracy comparison of algorithms for determination of image center coordinates in optoelectronic devices. *Science and Technique*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 79–86. (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86>
 18. Pham N.T., Timofeev A.N., Nekrylov I.S. Study of the errors of stereoscopic optical-electronic system for railroad track position. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11056, pp. 110562F. <https://doi.org/10.1117/12.2526081>
 19. Potapov A.I., Kul'chitskii A.A., Smorodinskii Y.G. Analyzing the accuracy of a device for controlling the position of a rotating plane. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 11, pp. 757–764. <https://doi.org/10.1134/S1061830918110086>
 20. Korotaev V.V., Maraev A.A., Timofeev A.N. *Beam Ride Using an Optical Equal-Signal Zone*. St. Petersburg, ITMO University, 2015, 326 p. (in Russian)
 21. Nose A., Yamazaki T., Katayama H., Uehara S., Kobayashi M., Shida S., Odahara M., Takamiya K., Matsumoto S., Miyashita L., Watanabe Y., Izawa T., Muramatsu Y., Nitta Y., Ishikawa M. Design and performance of a 1 ms high-speed vision chip with 3D-stacked 140 GOPS column-parallel PEs. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 1313. <https://doi.org/10.3390/s18051313>
 22. Stefanov K.D., Clarke A.S., Ivory J., Holland A.D. Design and performance of a pinned photodiode CMOS image sensor using reverse substrate bias. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 118. <https://doi.org/10.3390/s18010118>
 23. Maraev A.A., Shut G.A., Timofeev A.N., Mikheev S.V., Akhmerov A.Kh., Rodikova L.S., Konyakhin I.A. Effect of illumination on errors in estimation of a rotor blade chord value during intelligent video endoscopy of a closed steam turbine cylinder. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2022, vol. 419, pp. 169–185. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97004-8_13
 24. Ting-Fa X., Peng Z. Image motion-blur-based object's speed measurement using an interlaced scan image. *Measurement Science and Technology*, 2010, vol. 21, no. 7, pp. 075502. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/7/075502>
 25. Pham N.T., Pantyushina E.N., Timofeev A.N., Vasilev A.S., Dinh B.M. Influence of the speed of the optical-electronic system movement on the control error of the railway track position. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 814–822. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-9-814-822>

Авторы

Родикова Лилиана Сергеевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57225009764](https://orcid.org/0009-0007-4499-5299), <https://orcid.org/0009-0007-4499-5299>, ls_rodikova@itmo.ru

Коротаев Валерий Викторович — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603855670](https://orcid.org/0000-0001-7102-5967), <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>, korotaev_v_v@mail.ru

Тимофеев Александр Николаевич — кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57189271286](https://orcid.org/0000-0002-7344-9832), <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>, timofeev@itmo.ru

Рыжова Виктория Александровна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195127229](https://orcid.org/0000-0002-2682-8311), <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>, victoria_ryz@itmo.ru

Authors

Liliana S. Rodikova — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57225009764](https://orcid.org/0009-0007-4499-5299), <https://orcid.org/0009-0007-4499-5299>, ls_rodikova@itmo.ru

Valery V. Korotaev — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603855670](https://orcid.org/0000-0001-7102-5967), <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>, korotaev_v_v@mail.ru

Alexander N. Timofeev — PhD, Associate Professor, Senior Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57189271286](https://orcid.org/0000-0002-7344-9832), <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>, timofeev@itmo.ru

Victoria A. Ryzhova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195127229](https://orcid.org/0000-0002-2682-8311), <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>, victoria_ryz@itmo.ru

Мараев Антон Андреевич — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55803972300](https://orcid.org/0000-0002-7287-0414), <https://orcid.org/0000-0002-7287-0414>, aamaraev@itmo.ru

Михеев Сергей Васильевич — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2042-7285>, msv@itmo.ru

Anton A. Maraev — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55803972300](https://orcid.org/0000-0002-7287-0414), <https://orcid.org/0000-0002-7287-0414>, aamaraev@itmo.ru

Sergey V. Mikheev — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2042-7285>, msv@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 23.01.2024
Одобрена после рецензирования 05.02.2024
Принята к печати 24.03.2024

Received 23.01.2024
Approved after reviewing 05.02.2024
Accepted 24.03.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»