

УДК 681.78

ВидеоЕндоскопирование рабочих лопаток паровых турбин и контроль их геометрических параметров

© 2020 г. Г. А. Шуть*, В. В. Коротаев**, ДОКТОР ТЕХН. НАУК; Е. И. Пузырев*;
В. А. Рыжова**, КАНД. ТЕХН. НАУК; А. Н. Тимофеев**, КАНД. ТЕХН. НАУК;
А. Х. Ахмеров**; Л. С. Родикова**

*ООО «Промышленные Технологии», Санкт-Петербург

**Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: victoria_ryz@itmo.ru

Поступила в редакцию 06.07.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-11-58-67

Рассматривается решение задачи контроля размеров рабочих лопаток паровых турбин с использованием системы видеоЕндоскопирования в режиме валоповорота. Определены взаимосвязи параметров оптической системы с формой, размером и скоростью перемещения рабочих лопаток при значительной глубине изображаемого пространства. Предложены метод и алгоритм обработки цифровых изображений. Исследуются составляющие погрешности контроля размера хорды рабочих лопаток при обработке цифровых изображений, получаемых синхронно с вращением ротора. Проведены экспериментальные исследования характеристик макета системы на физической модели периферийной части лопаточного аппарата паровой турбины К-1200-6.8/50. Предложены пути ослабления влияния составляющих погрешностей системы видеоЕндоскопирования.

Ключевые слова: система видеоЕндоскопирования, режим валоповорота, хорда рабочей лопатки, эрозионный износ, матричное поле приемника оптического излучения, анализ составляющих погрешности.

Коды OCIS: 080.3620, 120.4630

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации паровых турбин тепловых и атомных электростанций необходимо периодически контролировать процессы эрозионного износа и повреждения поверхности кромок рабочих лопаток (РЛ) [1]. Эта проблема особенно актуальна для последних ступеней турбины большой единичной мощности, когда на входные кромки РЛ воздействуют высокие каплеударные нагрузки, приводящие к возрастанию эрозии лопаточного аппарата [2, 3].

Одним из основных контролируемых параметров износа лопаточного аппарата цилиндров

высокого и низкого давления (ЦВД и ЦНД) паровых турбин является размер хорды РЛ (рис. 1). Под размером хорды РЛ в заданном сечении понимают расстояние между концами средней линии профиля, которое физически ограничено ее входной и выходной кромками [4].

Актуальными задачами являются автоматизация контроля и регистрация геометрии пера РЛ на закрытом цилиндре в процессе эксплуатации турбины, что существенно уменьшает время профилактических работ за счет бесконтактной оценки основных параметров эрозионного износа РЛ [5–8].

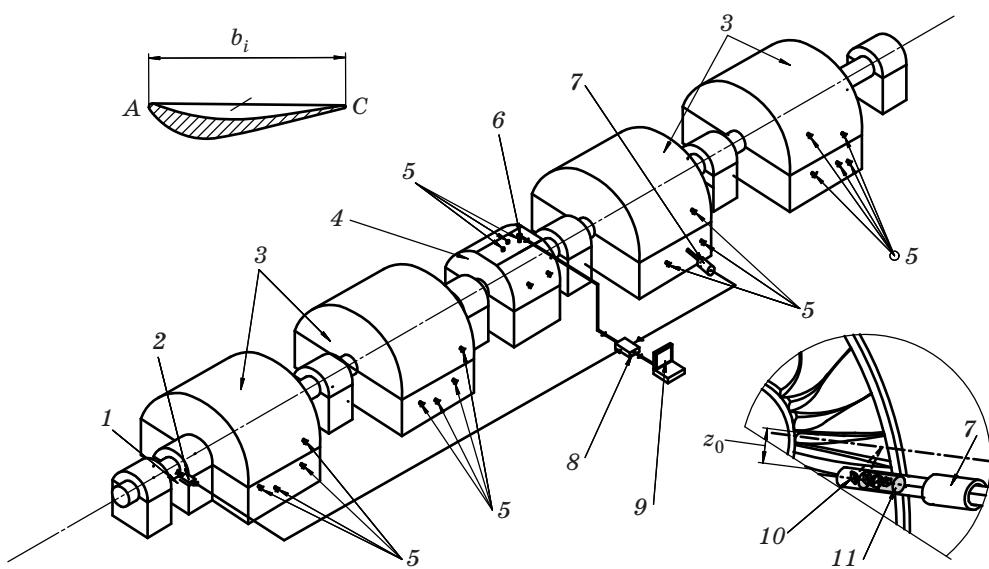


Рис. 1. Структура и схема размещения блоков системы видеоэндоскопирования на турбине. 1 — метка, 2 — синхродатчик, 3 — цилиндры низкого давления, 4 — цилиндр высокого давления, 5 — технологические каналы, 6 — видеозонд, 7 — жесткий зонд, 8 — блок согласования, 9 — базовый компьютер. Верхняя вставка — сечение РЛ: А — входная кромка, С — выходная кромка, b_i — хорда лопатки. Нижняя вставка — схема расположения жесткого зонда относительно оси РЛ: 10 — источник оптического излучения, 11 — видеокамера, z_0 — расстояние от главной точки объектива до предметной плоскости.

Перспективным решением этой технологической задачи является применение систем видеоэндоскопирования (СВЭ) [9, 10].

Для обеспечения осмотра лопаточного аппарата турбина переводится в режим валоповорота, при котором ротор вращается с постоянной угловой частотой в пределах одного оборота в минуту. Далее через специальные технологические каналы (рис. 1) турбины вводится жесткий зонд или видеозонд, с помощью которого и осуществляется осмотр лопаток. Жесткие зонды используются для прямых технологических каналов, видеозонды применяются для каналов сложной формы. Синхродатчики позволяют в режиме валоповорота идентифицировать номер РЛ и зону осмотра.

Накопленный к настоящему времени опыт многолетней эксплуатации системы оперативного контроля и диагностики РЛ на турбинах Т-1 10/120-130 и Г-250/300-240 Минской ТЭЦ-4 [10, 11] показал целесообразность дальнейшего развития интеллектуальных средств контроля рабочего состояния РЛ на закрытой турбине.

При построении СВЭ можно применять различные виды видеозондов, вводимых в меж-

лопаточное пространство турбины: на основе гибкой волоконно-оптической системы, на основе жестких оптических систем с многократным перепроектированием изображения лопаток и на основе миниатюрных видеокамер [12–14].

Наиболее перспективным решением при автоматизации контроля размера хорды РЛ в нескольких сечениях РЛ является применение СВЭ, содержащих зонды на основе миниатюрных видеокамер с обработкой изображений на принципах машинного зрения [10, 15].

Сложность решаемой задачи определяется тем, что границы изображения контролируемого элемента находятся за пределами границ (ближней и дальней) изображаемого пространства, размыты на краях, а в пространстве цифровой обработки изображения дополнительно возникает скоростной смаз изображения в матричном приемнике оптического излучения (МПОИ — *digital image sensor* — DIS).

Целями настоящей работы являются исследование возможности создания СВЭ рабочих лопаток паровых турбин с учетом ограниченности межлопаточного пространства, разработка алгоритма обработки изображения, разработка методики расчета параметров

оптической системы зондов, теоретическое и экспериментальное исследование составляющих погрешности определения размера хорды рабочих лопаток ЦНД и ЦВД паровых турбин средствами СВЭ при использовании валоповорота турбины.

ПРОЦЕДУРА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВИДЕОЗОНДА ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМ ВИДЕОЭНДОСКОПИРОВАНИЯ

Исследуемую СВЭ можно представить структурой, содержащей базовый компьютер, жесткий зонд или видеозонд, в состав которых входят источник оптического излучения и видеокамера (ВК), синхродатчик, блок согласования и соединительные кабели (рис. 1).

Создание оптимальных условий наблюдения обеспечивается возможностью зондов разворачиваться в технологическом канале турбины относительно собственной оси и перемещаться от края РЛ к центру вращения ротора.

В режиме функционирования СВЭ синхродатчик срабатывает при прохождении метки и формирует тактовые импульсы, соответствующие положению ротора при валоповороте. Синхродатчик отправляет через блок согласования реперные сигналы о появлении очередной РЛ в поле зрения зондов и информацию о ее порядковом номере. При получении реперного сигнала блок согласования отправляет на ВК запрос о начале съемки кадров. Цифровые изображения с зондов передаются через блок согласования на базовый компьютер, который обрабатывает цифровые изображения, а также управляет режимом съемки кадров ВК (съемка одиночных кадров, непрерывная съемка) и режимом работы источника излучения (импульсная подсветка, непрерывная подсветка).

Вычисление фактического размера хорды РЛ (рис. 1, верхняя вставка) осуществляется базовым компьютером путем интеллектуальной обработки совокупности цифровых изображений РЛ, получаемых с фотоприемного матричного поля ВК.

Результаты измерений хорды РЛ сравниваются с проектными размерами и с результатами предыдущих измерений. При необходимости оценки состояния отдельных участков лопаточного аппарата оператор имеет возможность наблюдать на дисплее базового компью-

тера соответствующие кадры, сохраненные в его памяти, и результаты интеллектуального анализа уменьшения размера хорды РЛ в процессе эксплуатации. По результатам анализа принимается решение о допустимости продолжения эксплуатации турбины или необходимости ее вскрытия и ремонта.

Особенностью условий эксплуатации СВЭ является невозможность обеспечить необходимую глубину резко изображаемого пространства. Например, расстояние от ВК до входной кромки РЛ ЦВД паровой турбины может изменяться от 20 до 120 мм, а расстояние до выходной кромки может достигать 300 мм. Такой большой разброс расстояний обусловлен технологическими возможностями прокладки каналов для осмотра РЛ и задается проектировщиками турбин. В результате расстояние z_0 от ВК до оси РЛ у различных турбин (рис. 1, нижняя вставка) находится в широком диапазоне значений.

Контролируемые сечения РЛ последних ступеней лопаточного аппарата турбин большой единичной мощности располагаются на расстояниях от оси вращения ротора в диапазоне от 1250 до 2500 мм. При обследовании лопаточного аппарата зонды перемещаются, как правило, от края РЛ к основанию.

Размеры хорд лопаток различных ЦНД могут достигать 250 мм. При перемещении зондов вдоль лопатки угол наклона хорды изменяется и может достигать 40°.

Указанные параметры лопаточного аппарата требуют обеспечивать большое угловое поле оптической системы зондов, большую глубину резкости изображаемого объекта и особое расположение зондов в технологических каналах относительно контролируемого участка поверхности РЛ. Например, жесткий зонд СВЭ имеет объектив ВК с угловым полем не менее 90°, при этом глубина резко изображаемого пространства [8, 9] находится в диапазоне от 2 до 155 мм.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗОНДОВ СИСТЕМ ВИДЕОЭНДОСКОПИРОВАНИЯ

Положение ВК относительно РЛ приведено на рис. 2. Ось OX РЛ ориентирована перпендикулярно плоскости чертежа. Вектор линейной скорости n -ой лопатки в i -ом сечении V_i

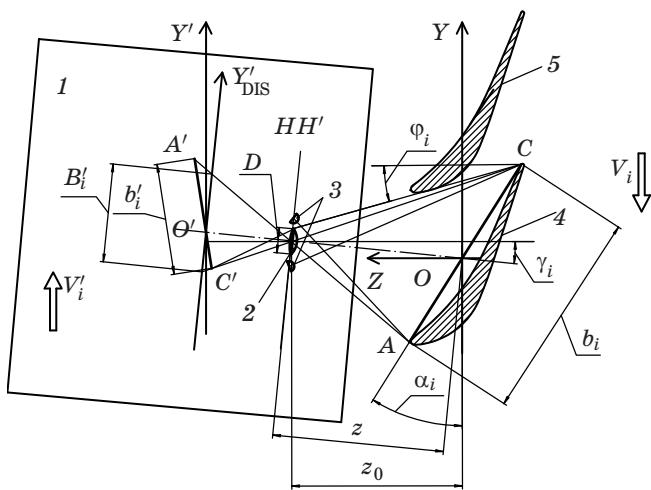


Рис. 2. Ход лучей в оптической системе ВК видеозонда при контроле размера хорды рабочей лопатки. 1 — ВК, 2 — объектив, 3 — источники оптического излучения, 4 — контролируемое i -ое сечение n -ой РЛ, 5 — i -ое сечение следующей ($n + 1$)-ой РЛ.

направлен противоположно оси OY . При осмотре очередной n -ой лопатки в i -ом сечении ВК перемещается параллельно оси OX . Оптическая ось ВК ориентирована под углом γ_i к оси OZ .

Такая ориентация обусловлена тем, что рассматриваемое сечение контролируемой лопатки должно полностью находиться в поле зрения объектива ВК при том, что сечение РЛ ориентировано под углом α_i к оси OY .

Положение и ориентация оптической оси объектива ВК относительно i -го сечения n -ой лопатки (рис. 2) должны быть заданы так, чтобы и входная A , и выходная C кромки, по которым измеряется хорда лопатки b_i , находились в пределах углового поля объектива ВК, а лучи от выходной кромки C не перекрывались входной кромкой A следующей ($n + 1$)-ой лопатки. В этом случае лучи, исходящие от крайних точек хорды лопатки A и C , будут находиться в пределах чувствительной площадки МПОИ.

Так как РЛ не перпендикулярна оптической оси ВК, изображение $A'C'$ хорды AC не совпадает с плоскостью МПОИ $X'O'Y'_{DIS}$, и это накладывает свои условия на построение схемы зонда.

Для осуществления подсветки кромок A и C контролируемой РЛ в представленную схему введены источники излучения.

В процессе контроля РЛ перемещаются в плоскости XOY . При этом линейная скорость

V_i каждого i -го сечения РЛ определяется частотой вращения ротора v при валоповороте и расстоянием R_i от оси вала до сечения лопатки (радиусом сечения), на котором проводится контроль параметров РЛ. Сопряженное изображение $A'C'$ хорды AC РЛ согласно законам геометрической оптики [16, 17] будет перемещаться с линейной скоростью V_i' в плоскости $X'O'Y'$, сопряженной с плоскостью XOY ,

$$V_i' = \frac{2\pi v R_i f'}{z_0 - f'}, \quad (1)$$

где f' — фокусное расстояние объектива ВК, z_0 — расстояние от главной точки объектива до плоскости осей лопатки XOY .

Контроль размера хорды b_i проводится в условиях последовательного перемещения видеозонда вдоль РЛ. При этом происходит одновременно и изменение размера хорды AC , и изменение угла ее наклона α_i , что вызывает изменение положения изображения $A'C'$ хорды РЛ относительно плоскости $X'O'Y'$.

В оптической системе ВК в принципе нет возможности подфокусировки изображения РЛ на плоскости МПОИ, поэтому приходится регистрировать лишь проекцию B_i' изображения $A'C'$ на плоскости МПОИ $X'O'Y'_{DIS}$.

В результате на чувствительной площадке МПОИ формируется размытое изображение РЛ, характеризуемое распределением облученности сложной формы. Размер проекции B_i' размытого изображения предлагается определять по заданному пороговому значению облученности [18–20], которая составляет, например, 0,5 от максимального значения облученности [10]. По размеру проекции B_i' затем вычисляется размер хорды b_i .

Условие нулевого виньетирования выходной кромки контролируемой лопатки входной кромкой следующей ($n + 1$)-ой лопатки в схеме ВК будет достигаться в том случае, если лучи от выходной кромки лопатки будут падать на край объектива диаметром D под углом, большим, чем φ_i .

$$\varphi_i = \arctg \left[\left(\cos \alpha_i - \frac{2\pi R_i}{b_i N} \right) \middle/ \sin \alpha_i \right], \quad (2)$$

где N — количество рабочих лопаток в ступени ротора, R_i — радиус сечения РЛ.

При технологическом ограничении расстояния z_0 выполнение этого условия возможно путем ориентации оптической оси ВК под углом γ_i к оси OZ

$$\gamma_i = \arctg \left(\frac{2\pi R_i}{b_i N \sin \alpha_i} + \frac{\pi R_i}{z_0 N} - \frac{D}{2z_0} - \operatorname{ctg} \alpha_i \right). \quad (3)$$

Анализ реальных параметров РЛ показал, что практически при контроле параметров в каждой ступени лопаточного аппарата турбины приходится корректировать угловое положение ВК путем разворота зонда в технологическом канале турбины вокруг его оси на угол γ_i для каждого i -го сечения лопатки.

В этом случае точное выражение для вычисления размера b_i имеет вид

$$b_i = \frac{2z_0 \left[\sqrt{z_0^2 f'^2 \operatorname{ctg}^2(\alpha_i - \gamma_i) + (z_0 - f')^2 B_i'^2} - z_0 f' \operatorname{ctg}(\alpha_i - \gamma_i) \right]}{(z_0 - f') B_i' \sin(\alpha_i - \gamma_i) \cos \gamma_i}. \quad (5)$$

В свою очередь, для расстояний R_i больше, чем $R_{i \text{ opt}}$, оптическая ось ВК должна устанавливаться перпендикулярно хорде AC , т.е. должно выполняться равенство углов $\gamma_i = \alpha_i$, и вычисление размера хорды b_i должно проводиться с помощью более простого выражения

$$b_i = \frac{(z_0 - f')}{f'} B_i' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_i}. \quad (6)$$

В базовом компьютере СВЭ при определении размера проекции хорды B_i' на размытом цифровом изображении РЛ на МПОИ использован алгоритм, основанный на нахождении связной компоненты, соответствующей анализируемой РЛ, на ее бинаризированном изображении [10, 18, 19].

Для вычисления размера проекции B_i' в системе координат МПОИ используется следующая формула:

$$B_i' = \sqrt{[(x_{2i} - x_{1i}) p_x]^2 + [(y_{2i} - y_{1i}) p_y]^2}, \quad (7)$$

где x_{1i} , y_{1i} — координаты точки A' связной компоненты на изображении, x_{2i} , y_{2i} — координаты точки C' связной компоненты на изображении, p_x — линейный размер пикселя

Для большинства фактических параметров РЛ ЦНД паровой турбины существует оптимальное расстояние $R_{i \text{ opt}}$, при котором угол γ_i равен углу α_i . В этом случае оптическая ось ВК перпендикулярна хорде РЛ, а радиус сечения определяется выражением

$$R_{i \text{ opt}} = \frac{Nb_i(4z_0 + D \sin 2\alpha_i)}{4\pi \cos \alpha_i (2z_0 + b_i \sin \alpha_i)}. \quad (4)$$

Из приведенных выше рассуждений можно сделать вывод, что для расстояний R_i меньше, чем $R_{i \text{ opt}}$, требуется осуществлять наклон оптической оси видеозонда на угол γ_i согласно выражению (3).

МПОИ в направлении линии развертки, p_y — линейный размер пикселя МПОИ по высоте строки.

Таким образом, при реализации алгоритма учитывалась размытость изображений входной и выходной кромок РЛ вследствие разницы в глубине резко изображаемого на матричном поле МПОИ пространства крайних точек кромок, а также вследствие изменения угла наклона хорды α_i' при последовательном перемещении видеозонда вдоль пера лопатки в ходе технологической процедуры контроля состояния эрозионного износа кромок рабочих лопаток паровой турбины.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ХОРДЫ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ

Выражения (5) и (6) описывают обработку информации в СВЭ, их анализ позволяет оценить составляющие погрешности определения размера хорды РЛ.

Суммарная погрешность системы определяется совокупностью ряда составляющих, имеющих случайный характер и обусловленных наличием большого количества влияющих факторов.

К анализу суммарной погрешности определения размера хорды РЛ

Влияющий фактор	Частичная составляющая суммарной погрешности
Погрешность определения границ изображения РЛ на МПОИ δb_i^{DIS}	$\delta b_i^{\text{DIS}} = \delta b_i'^{\text{DIS}} \sqrt{2(1 + A_i^2)}, \quad (8)$
где $A_i = \frac{2\pi R_i}{b_i N \sin \alpha_i} + \frac{\pi R_i}{z_0 N} - \frac{D}{2z_0} - \operatorname{ctg} \alpha_i$	
Погрешность фокусного расстояния оптической системы ВК $\delta f'$	$\delta b_i^{f'} = \frac{z_0 b_i}{f'(z_0 - f')} \delta f' \quad (9)$
Погрешность, вызванная неопределенностью расстояния до центра РЛ, δz_0	$\delta b_i^{z_0} = \left[\frac{1}{f' - z_0} + \frac{(2\pi R_i - ND)A_i}{2Nz_0^2(1 + A_i^2)} \right] b_i \delta z_0 \quad (10)$
Погрешность, вызванная изменением углов наклона хорды по сечениям РЛ, $\delta \alpha_i$	$\delta b_i^{\alpha_i} = \frac{(b_i N - 2\pi R_i \cos \alpha_i)A_i}{N \sin^2 \alpha_i (1 + A_i^2)} \delta \alpha_i \quad (11)$
Погрешность, вызванная неопределенностью радиуса сечения РЛ, δR_i	$\delta b_i^{R_i} = \frac{(\pi b_i \sin \alpha_i + 2\pi z_0)A_i}{z_0 N \sin \alpha_i (1 + A_i^2)} \delta R_i \quad (12)$
Погрешность, вызванная нестабильностью времени экспозиции ВК, δt_{exp}	$\delta b_i^{t_{\text{exp}}} = -\frac{2\pi v R_i f' \sqrt{1 + A_i^2}}{(z_0 - f')} \delta t_{\text{exp}} \quad (13)$
Погрешность, вызванная температурной деформацией корпуса зонда, ΔT , град	$\delta b_i^{\Delta T} = \frac{b_i(z_0 - f')l\alpha_{Al}}{z_0 f'} \Delta T \quad (14)$
Погрешность, вызванная нестабильностью частоты вращения ротора, δv	$\delta b_i^v = \left[\frac{2\pi R_i f' \sqrt{1 + A_i^2}}{(z_0 - f')} t_{\text{exp}} \right] \delta v \quad (15)$

Для оценки степени влияния составляющих погрешности на ее суммарное значение использовался метод частных производных [21] от функций (5) и (6) по соответствующим влияющим факторам. Получены выражения (8)–(15) для оценки значений частных составляющих погрешностей (таблица).

В среде MATLAB была создана компьютерная модель, позволяющая численно оценить суммарную погрешность δb_i^{Σ} и степень влияния приведенных в таблице факторов.

На рис. 3 представлены результаты расчета составляющих погрешности в зависимости от расстояния до РЛ ЦНД, наиболее подверженных влиянию эрозии.

Расчет выполнен при следующих типовых параметрах лопаточного аппарата: расстояние

от оси вала до сечения лопатки $R_i = 1750$ мм, контролируемый размер хорды $b_i = 200$ мм, сечение хорды ориентировано под углом $\alpha_i = 40^\circ$, частота вращения ротора $v = 1,1$ об/мин.

Расчет выполнен при следующих параметрах СВЭ: объектив с фокусным расстоянием 3,5 мм, размер пикселя МПОИ — $2,25 \times 2,25$ мкм, частота кадров — 30 Гц, время экспозиции составляет 0,8 от времени кадра ($t_{\text{exp}} = 0,8t_{\text{fr}}$), отношение сигнал/шум — 300.

Для оценки вклада составляющих погрешности использовалась относительная величина $\delta_i = \delta b_i / \delta b_i^{\Sigma}$. Расчет выполнен для технологического уровня точности изготовления деталей и элементов зонда: относительная погрешность фокусного расстояния $\delta f' = 1\%$, погрешность неопределенности расстояния

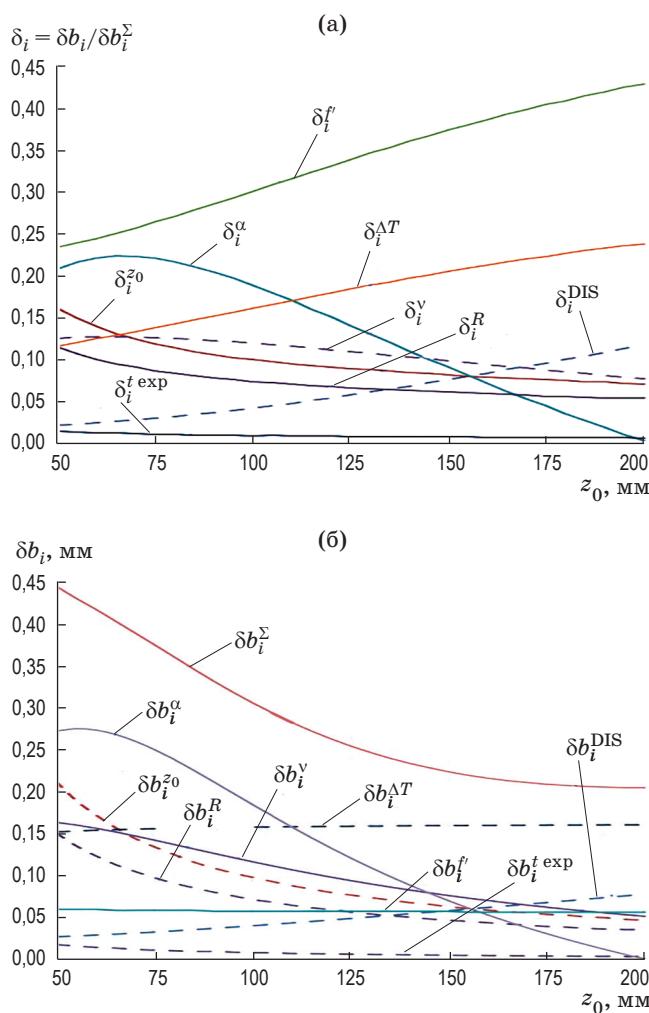


Рис. 3. Графики к оценкам степени влияния составляющих погрешностей на суммарную погрешность измерения хорды РЛ в зависимости от дистанции z_0 : до калибровки системы в относительных величинах погрешностей (а), после калибровки в абсолютных величинах погрешностей (б).

от ВК до РЛ $\delta z_0 = 0,1$ мм, погрешность, вызванная изменением углов наклона хорды по сечениям РЛ, $\delta\alpha_i = 1^\circ$, погрешность, вызванная неопределенностью радиуса сечения РЛ, $\delta R_i = 1$ мм, погрешность, вызванная нестабильностью частоты вращения ротора, $\delta v = 1\%$.

Анализ показал, что суммарная погрешность уменьшается с увеличением дистанции от 50 до 200 мм почти в два раза (рис. 3б).

Результаты расчетов на компьютерной модели показали, что наиболее сильное влияние на суммарную погрешность (рис. 3а) по степени убывания оказывают следующие частичные составляющие: погрешность неопре-

деленности фокусного расстояния объектива ВК δ_i^f' , погрешность, вызванная изменением углов наклона хорды по сечениям РЛ, δ_i^α , погрешность, вызванная температурной деформацией корпуса зонда, $\delta_i^{\Delta T}$, погрешность, вызванная неопределенностью расстояния от видеокамеры до РЛ, δ_i^{z0} .

При этом на суммарную погрешность слабо влияют погрешность определения границ изображения РЛ на МПОИ δ_i^{DIS} , погрешность от нестабильности частоты вращения ротора при валоповороте δ_i^v , погрешность, вызванная неопределенностью радиуса сечения РЛ, δ_i^R .

Ничтожное влияние оказывает нестабильность времени экспозиции видеокамеры $\delta_i^{t exp}$.

Важным этапом при изготовлении и введении в эксплуатацию зондов являются их калибровка и юстировка. Калибровка зондов осуществляется в режиме валоповорота на стенде с помощью образцов РЛ с известными параметрами хорды b_i и α_i путем уточнения параметров программных средств системы f' и z_0 . В этом случае предел уточнения ограничен значением погрешности МПОИ δ_i^{DIS} .

После компенсации и юстировок видеозонда при $z_0 = 115$ мм суммарная погрешность определения хорды лопатки ЦНД турбины К-1200-6.8/50 в статике не превысила 0,27 мм (рис. 3б).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ КОНТРОЛЯ РАЗМЕРА ХОРДЫ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ

С целью подтверждения характеристик СВЭ в Университете ИТМО был разработан испытательный стенд (рис. 4), состоящий из модели вала ротора, моделей РЛ ЦНД и имитатора валоповорота турбины, установленных на основании стендса.

Модель РЛ ЦНД выполнена в масштабе 1:5 относительно размеров РЛ ЦНД паровой турбины К-1200-6.8/50, установленной на ЛАЭС-2.

Имитатор валоповорота установлен на поворотной платформе фирмы *Standa*, скорость вращения которой управляется персональным компьютером. Компьютер задает линейную скорость перемещения моделей лопаток, равную скорости периферийной зоны реальных лопаток ЦНД паровой турбины К-1200-6.8/50 на валоповороте.

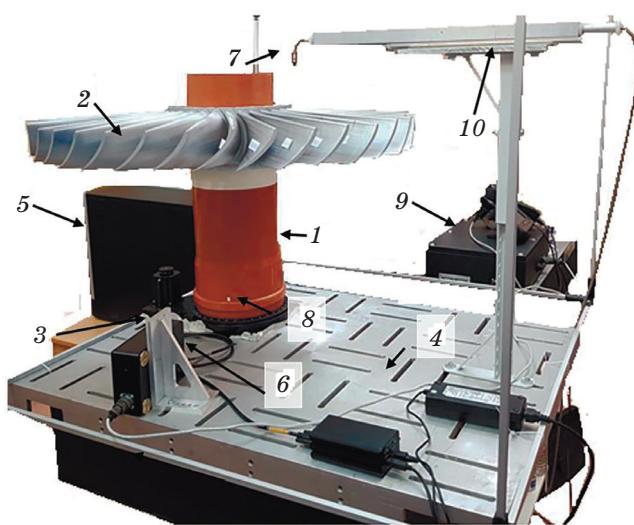


Рис. 4. Общий вид стенда исследований СВЭ с установленным видеозондом и снятым кожухом. 1 — модель вала ротора, 2 — модели РЛ ЦНД, 3 — модель имитатора валоповорота турбины, 4 — основание стенда, 5 — персональный компьютер, 6 — синхродатчик, 7 — видеозонд, 8 — референтная метка, 9 — блок синхронизации, 10 — штанга.

Синхродатчик исследуемой СВЭ установлен на основании стенда. Референтная метка синхродатчика размещена на модели вала ротора. Информация о положении ротора от синхродатчика и от видеозонда через блок синхронизации поступает на персональный компьютер, который управляет всеми процедурами эксперимента.

Видеозонд, установленный на штанге, имеет следующие параметры: $f' = 4,5$ мм, размер пикселя матрицы ВК $5,5 \times 5,5$ мкм, время экспозиции 0,017 с.

Экспериментальное определение суммарной погрешности измерения хорды осуществлялось на примере десятой РЛ с размером хорды $b_{10} = 103$ мм (рис. 5а).

Эксперименты в статике выполнены без вращения модели РЛ. Оценка размера хорды составила 103,09 мм при среднем квадратичном отклонении (СКО) результатов измерений 0,39 мм (рис. 5б).

Полученные результаты неплохо согласуются с расчетным значением суммарной погрешности измерения хорды лопатки (рис. 3б), которое составляет 0,27 мм.

Эксперименты в динамике проводились в режиме валоповорота с линейной скоро-

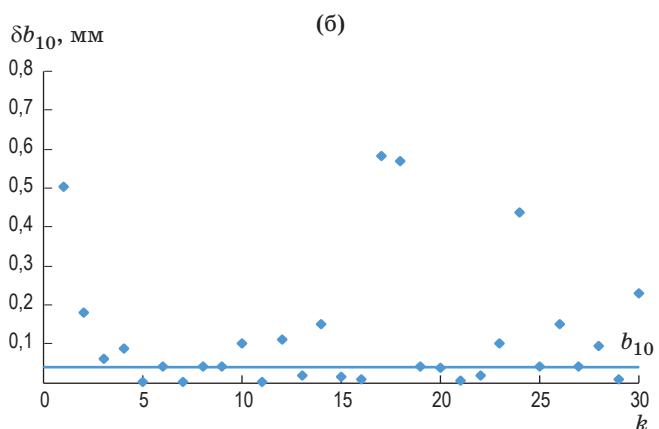
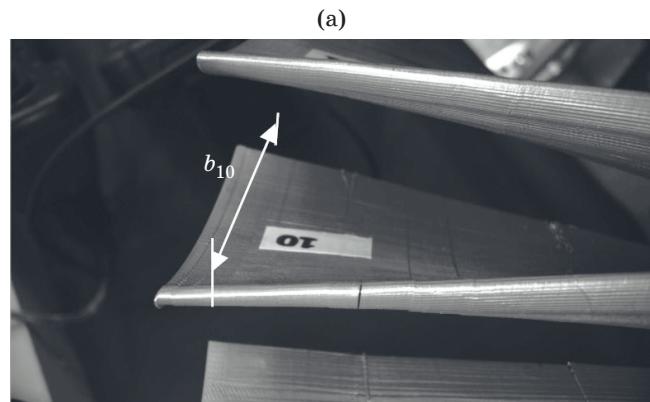


Рис. 5. Изображение модели РЛ № 10, на примере которой определялась оценка суммарной погрешности размера хорды b_{10} (а), и поле рассеяния отклонений отсчетов $k = 30$ полученного размера хорды b_{10} (б).

стью, равной скорости периферийной зоны реальных лопаток ЦНД паровой турбины К-1200-6.8/50. Оценка размера хорды составила 103,33 мм при СКО результатов измерений 0,88 мм. Ожидаемое увеличение суммарной погрешности обусловлено нестабильностью частоты вращения ротора Δv (15) и скоростным смазом изображения.

Эксперименты проводились с модулями опытного образца СВЭ в лабораторных условиях. Результаты исследований можно считать удовлетворительными и достаточными для проведения дальнейших экспериментов на ЦНД паровой турбины К-1200-6.8/50.

Для исследования влияния скоростного смаза изображения на погрешность измерения параметров эрозионного износа РЛ в рассмотренной схеме целесообразно продолжить работы с применением высокоскоростных видеокамер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана структура системы видеоэндоскопирования, позволяющая осуществлять контроль состояния и измерение хорды рабочих лопаток цилиндров низкого и высокого давления паровых турбин большой единичной мощности без их вскрытия в режиме валоповорота.

Определены соотношения между основными параметрами оптической системы зондов и параметрами лопаточного аппарата для обеспечения нулевого виньетирования соседними лопатками контролируемого сечения исследуемой рабочей лопатки.

Сформированы алгоритмы вычисления длины хорды рабочей лопатки по размытым изображениям на матричном поле анализа при относительно небольшом расстоянии от исследуемой лопатки до объектива видеокамеры. Полученные алгоритмы позволяют системе контролировать геометрические параметры рабочих лопаток паровых турбин за пределами резко изображаемого пространства.

Предложена методика расчета погрешности контроля размера хорды рабочих лопаток

в режиме валоповорота, которая позволяет осуществить выбор параметров оптической системы в процессе проектирования зондов, работающих в динамическом режиме на малых расстояниях до контролируемых сечений лопаток.

Теоретические и экспериментальные исследования составляющих погрешности контроля размера хорды рабочих лопаток турбин показали, что наибольший вклад по степени убывания оказывают следующие составляющие погрешности: погрешность от неопределенности фокусного расстояния объектива видеокамеры, погрешность, вызванная температурной деформацией корпуса зонда, погрешность, вызванная неопределенностью расстояния от видеокамеры до рабочей лопатки, погрешность, вызванная изменением углов наклона хорды по сечениям рабочих лопаток.

Испытания модулей опытного образца системы видеоэндоскопирования на сформированном стенде подтвердили результаты компьютерного моделирования.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации 08-08.

ЛИТЕРАТУРА

- Хаимов В.А. Малорасходные режимы ЦНД турбины Т-250/300-240. СПб: БХВ-Петербург, 2007. 240 с.
- Шкотов Ю.Д. Об эрозионном износе проточных частей паровых турбин // Энергетик. 1990. № 4. С. 16–17.
- Поваров О.А., Станиша Б., Рыженков В.А. Исследование эрозионного износа лопаток паровых турбин // Теплоэнергетика. 1988. № 4. С. 66–69.
- 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. 107 с.
- Лагерев А.В. Вероятностное прогнозирование эрозии паровых турбин / в кн. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход: в 3 т. Т. 2. М.: Машиностроение, 2006. 295 с.
- Федяков И.В. Электроэнергетика: износ оборудования как системная проблема отрасли // Академия Энергетики. 2013. № 1. С. 4–9.
- Явельский М.Б., Рошаль М.Д., Поршинев М.Б. Исследование эрозионного разрушения радиационным методом // Теплоэнергетика. 1989. № 4. С. 61–62.
- Хаимов В.А., Качуринер Ю.Я., Воропаев Ю.А. Эрозионный износ твердыми частицами проточной части ЦСД-1 турбин Т-250/300-240 // Электрические станции. 2004. № 4. С. 14–22.
- Хаимов В.А., Кокин Е.П., Пузырев Е.И. Внедрение системы оперативного контроля и диагностики эрозионного износа рабочих лопаток мощных паровых турбин // Электрические станции. 2006. № 12. С. 32–36.
- Шутъ 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 эрозионного износа лопаток паровых турбин // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 3. С. 228–237.
- Хаимов В.А., Ляпунов В.М., Рубинов А.М. Система оперативного контроля и диагностики эрозионного износа лопаточного аппарата паровых турбин // Труды ЦКТИ. 2003. Вып. 292. С. 114–122.

12. *Мачихин А.С.* Измерительные возможности современных видеоэндоскопов // Двигатель. 2009. № 3. С. 8–9.
13. *Schick A., Forster F., Stockmann M.* 3D measuring in the field of endoscopy // Proc. SPIE. 2011. V. 8082. Art. № 808216.
14. *Pears N., Liu Y., Bunting P.* 3D imaging, analysis and applications. London: Springer-Verlag, 2012. 500 р.
15. *Пузырев Е.И., Шутъ Г.А.* Устройство мониторинга состояния внутри турбинных узлов и деталей паровых турбин // Патент РФ № 2624380.
16. *Сарвин А.А.* Системы бесконтактных измерений геометрических параметров. Л.: изд. ЛГУ, 1983. 144 с.
17. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. М.: Машиностроение, 1966. 563 с.
18. *Гонсалес Р., Будс Р.* Цифровая обработка изображений: практические советы / пер. Чочиа П.А., Рубанова Л.И. 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
19. *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. 1979. V. 9. № 1. P. 62–66.
20. *Коротаев В.В., Красняцких А.В.* Видеоинформационные измерительные системы: уч. пособ. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 124 с.
21. *Латыев С.М.* Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Лань, 2015. 560 с.