

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

© 2003 А. И. Данилин

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье описывается оптоэлектронный дискретно-фазовый метод измерения деформаций лопаток вращающихся колес турбоагрегатов. Рассматриваются достоинства и недостатки различных вариантов реализации оптоэлектронного дискретно-фазового метода. Вводится критерий, связывающий между собой параметры отражающей поверхности и длину волны излучателя и позволяющий сформулировать необходимые условия для осуществления метода. Приводятся примеры структурных схем устройств, реализующих этот метод.

Стремление к увеличению единичной мощности турбомашин при условии сохранения или повышения их экономичности и надежности сопровождается ростом напряженности ряда деталей, узлов и, в первую очередь, лопаточного аппарата. Поэтому определение деформационного состояния лопаток является актуальной задачей как на стадии экспериментально-доводочных работ, так и при эксплуатации турбоагрегатов.

Среди методов измерения, контроля и регистрации динамических деформационных параметров лопаток известны оптоэлектронные способы реализации дискретно-фазового метода (ДФМ), предназначенные для определения деформаций динамически нагруженных лопаток вращающихся колес турбоагрегатов посредством определения угловых положений торцов лопаток. В их основу положен физический принцип зависимости отражающих свойств поверхностей материалов от качества их обработки и частоты электромагнитного излучения. Сущность метода заключается в том, что торец лопатки, деформированной при вращении лопаточного колеса, отклоняется от первоначального положения на некоторый угол α . Положение индикатрисы потока, отражённого от торца зеркально, зависит прямо пропорционально от изменения его углового положения, поэтому максимум индикатрисы зеркально отраженного потока отклоняется от первоначального положения на тот же угол α . Индикатриса диффузно отраженного потока имеет практически круговой вид, и поэтому ее положение в малой степени зависит от ориентации

отражающего участка. Таким образом, если зафиксировать во времени положения максимумов индикатрис обоих потоков, отраженных от торца движущейся контролируемой лопатки, то по временному интервалу между ними возможно судить о величине ее деформации, используя связь напряженных состояний деформированных консольно закреплённых лопаток с угловыми положениями их торцов.

Главным достоинством оптоэлектронного дискретно-фазового метода (ОЭДФМ) является то, что определение деформаций лопаток осуществляется при отсутствии корневых датчиков. Это существенно снижает объем препарирования турбомашины и уменьшает трудоемкость проводимых измерений. Установка первичных оптоэлектронных преобразователей (ОЭП) в корпусе турбоагрегата заподлицо с внутренним защитным кольцом практически полностью исключает влияние измерительных средств на процессы внутреннего тракта двигателя.

Оптоэлектронные измерители позволяют расширить функциональные возможности ДФМ при определении деформаций лопаток, получить дополнительную информацию о состоянии лопаточного венца и устранить недостатки, присущие таким реализациям ДФМ, как электроннолучевые устройства регистрации и измерения амплитуд колебаний лопаток (ЭЛУРА и ЭЛИА) [1]. Так, например, при измерении деформаций, вызванных высшими формами колебаний лопаток, диапазон перемещений периферийных кромок уменьшается, соответственно умень-

шается и чувствительность традиционных измерительных средств ДФМ [1], но при этом диапазон угловых положений торцов лопаток увеличивается. Поэтому чувствительность ОЭДФМ при определении подобных деформаций также увеличивается, и вследствие этого становится возможным измерение локальных деформаций, обусловленных кромочными или пластиночными высокочастотными колебаниями верхних частей лопаток.

Предложено несколько способов осуществления ОЭДФМ и ряд устройств для их реализации [2-5]. Все реализации ОЭДФМ можно разделить на две группы. В устройствах первой группы на торцах лопаток формируются зеркально и диффузно отражающие участки, в реализациях второй группы измеряют величину микронеровностей на торцах лопаток и выбирают соответствующие излучатели и фотоприемники. Наличие операций формирования отражающих участков на торцах лопаток является сдерживающим фактором использования устройств первой группы на штатных турбомашинах, поскольку подобные операции должны планироваться на стадии разработки технологических процессов изготовления и сборки лопаточного аппарата двигателя. Поэтому ниже будут рассмотрены варианты реализации ОЭДФМ второй группы, как более универсальные.

Способ определения деформаций лопаток с использованием разнородных источников излучения

В этом способе реализации ОЭДФМ [4] используются различные отражающие свойства материалов, зависящие от размеров микронеровностей поверхности торцов лопаток, их упорядоченности и длины волны излучения, падающего на эту поверхность. Известно, что поверхность обладает зеркальным отражением в случае, если длина волны λ падающего на нее излучения больше в восемь раз высоты микронеровностей h и отражает падающий на нее поток абсолютно диффузно, если λ равна или меньше h и расположение микронеровностей хаотично [6].

При абсолютно диффузном отражении интенсивность по сечению пучка отраженного потока одинакова во всех направлениях.

Это означает, что индикатриса рассеяния (ИР) отраженного потока имеет форму круга, точка касания которого с отражающей поверхностью является местом падения исследуемого луча, а ось ИР совпадает с нормалью, восстановленной из точки падения. Соответственно, ось ИР потока, отраженного не абсолютно диффузно, образует с нормалью, восстановленной из точки падения, угол $\alpha_0 \neq 0$. Если описанные процессы рассмотреть в пределах фотометрической поверхности, приведенной на рис. 1, то величину отклонения оси ИР от нормали в точке падения луча можно охарактеризовать некоторой безразмерной величиной: $a = \sin \alpha_0$.

Для получения относительной оценки получаемых отклонений предлагается ввести коэффициент неидеальности отражения (КНО) $K(\alpha)$:

$$K(\alpha) = \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_n} = f(h/\lambda),$$

где α_0 - угол отражения луча; α_n - угол падения луча (рис. 1).

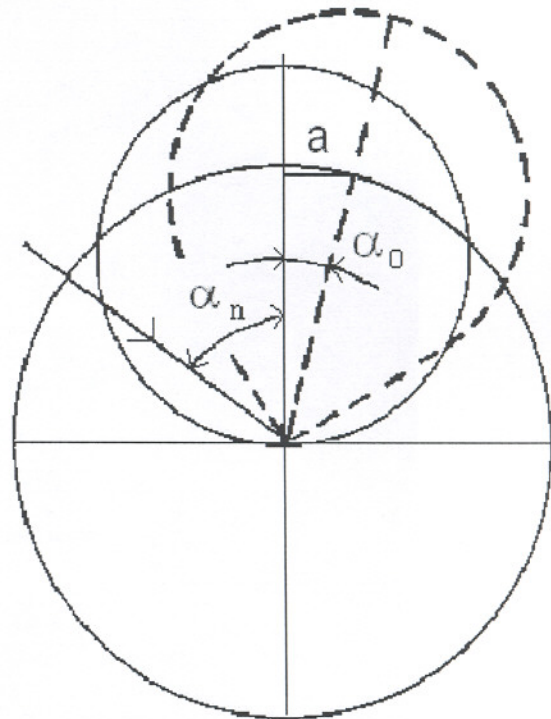


Рис. 1. Положение ИР отраженных потоков на фотометрической поверхности

Следует отметить, что КНО связывает между собой различные виды отражений по отношению к величинам микронеровностей отражающей поверхности и длине волны падающего излучения. В условиях рассматриваемой задачи КНО может служить оценочным критерием ожидаемых результатов. Вид обобщенной зависимости $K(\alpha) = f(h/\lambda)$, часть точек которой получены экспериментальным путем, приведен на рис. 2. Из него следует, что при правильном идеальном зеркальном отражении $\alpha_n = \alpha_0$ и $K(\alpha) = 1$. При абсолютно диффузном отражении $K(\alpha) = 0$. Зная отношение h/λ , по этой кривой можно оценить неидеальность зеркального отражения: $K_3 = 1 - f(h/\lambda)$ и неидеальность диффузного отражения: $K_d = f(h/\lambda)$.

Структурная схема для определения деформаций лопаток с использованием разнородных источников излучения приведена на рис. 3. Ее составной частью является торец 1 лопатки; корпус 2 турбомшины, в котором установлена светопроводящая система 3 (СПС); источники излучения 4 и 5, длины волн которых, соответственно, λ_1 и λ_2 ; селективные фотоприемники 6 и 7; компараторы 8 и 9; блоки 10, 11 выделения средин прямоугольных импульсов и блок 12 измерения-регистрации временных интервалов.

При реализации разнородного способа измеряется средняя высота микронеровностей, характеризующая в терминах ГОСТ 2789-73 параметром шероховатости R_z , на торцах уже готовых лопаток. После этого формируется поток излучения с $\lambda_1 \geq 8h$, обеспечивающий зеркальное отражение от торцов лопаток, и поток излучения с $\lambda_2 \leq h$, обеспечивающий диффузное отражение от тех же торцов. Затем выбираются селективные фотоприемники, имеющие максимальную спектральную чувствительность, соответственно, при λ_1 и λ_2 .

При измерении деформаций лопаток потоки излучения от источников 4 и 5 анализируются по СПС 3. Приемо-передающий коллектор (ППК) СПС 3 устанавливается в корпусе 2 турбомшины против траектории движения торцов 1 лопаток вращающегося лопаточного колеса. Потоки излучения с ППК попадают на торцы лопаток и отражаются от них: один - зеркально, второй - диффузно. Отраженные потоки принимаются ППК и с помощью СПС 3 подводятся к селективным фотоприемникам 6 и 7, которые выделяют из общего отраженного потока части, соответствующие λ_1 для зеркально отраженного потока и λ_2 для диффузно отраженного потока. Электрические сигналы с фотоприемников обрабатываются в компараторах 8, 9,

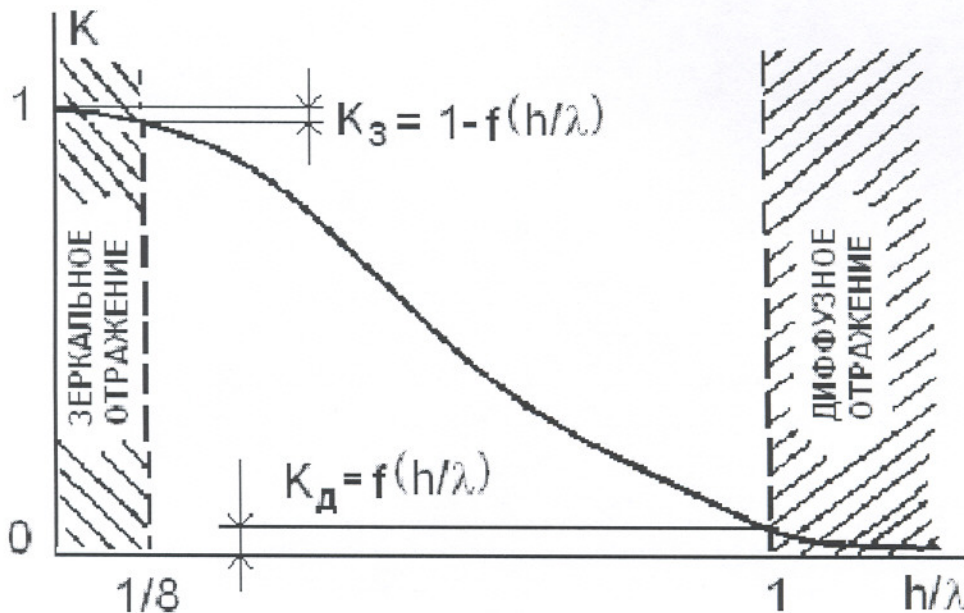


Рис. 2. Зависимость КНО от отношения средней высоты микронеровностей к длине волны излучения

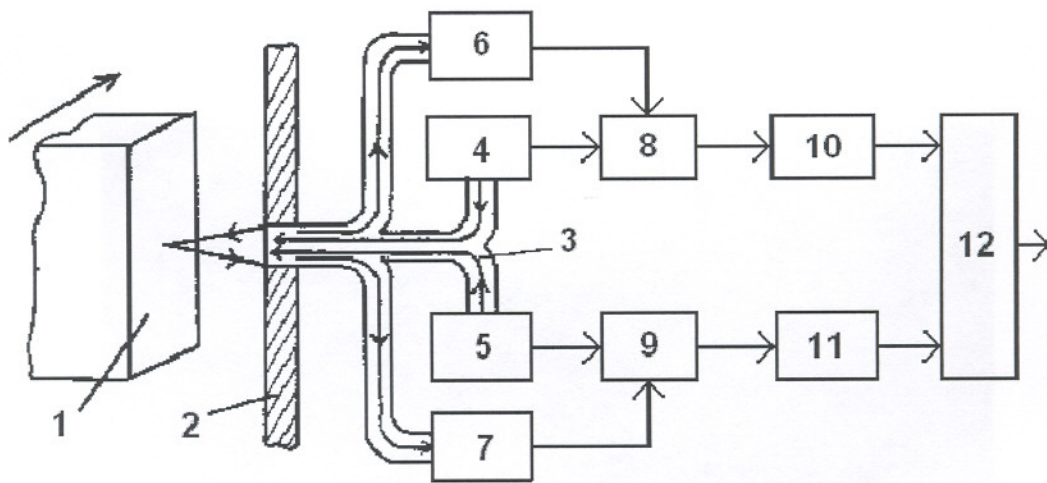


Рис. 3. Структурная схема устройства для определения деформаций лопаток с использованием разноволновых источников излучения

и по временным интервалам между серединами прямоугольных импульсов компараторов определяются деформации лопаток.

Ниже приводится оценка конкретного варианта реализации рассмотренного способа при средней высоте микронеровностей на торцах лопаток 3,0 мкм. Такая поверхность получается после чистового шлифования абразивными материалами с зернистостью 20...16 и соответствует 8 классу чистоты обработки поверхности.

Условием зеркального отражения в определенной степени удовлетворяет излучение полупроводникового лазера на основе PbSe с $\lambda_1 = 8,5$ мкм. Для выполнения условий диффузного отражения подходит лазер на основе JnP с $\lambda_2 = 0,91$ мкм [7]. Среди селективных фотоприемников диапазону диффузно отраженного излучения соответствуют, например, фотодиоды типа ФД-6, имеющие максимальную спектральную чувствительность при $\lambda = 0,5...1,2$ мкм, а для зеркально отраженного потока излучения - фотовольтаические приемники на основе PbSnTe с максимальной спектральной чувствительностью при $\lambda = 8...9$ мкм [8].

На рис. 4 приведены графики коэффициента неидеальности отражающих свойств рассматриваемой поверхности с использованием выбранных излучателей. Лазер на основе PbSe ($h/\lambda_1 = 0,352$; верхний график) обеспечивает зеркальное отражение потока от

торца лопатки с КНО: $K_3 = 1 - 0,945 = 0,055$, или 5,5 %. Лазер на основе JnP ($h/\lambda_2 = 3,3$; нижний график) позволяет получить диффузное отражение, отличающееся от абсолютно, описываемого законом Ламберта, на величину $K_d = f(h/\lambda) = 0,08$, или 8 %. Получение $K_d = 0$ затруднительно, поскольку при механической обработке поверхности образование микронеровностей носит всегда упорядоченный характер и определяет тем самым направленность диффузного отражения. Следует также учесть, что при механической обработке поверхностей по заданному классу точности высота микронеровностей может отличаться от средней величины на ± 10 %. На рис. 4 десятипроцентные изменения отношений $\Delta h/\lambda$ показаны заштрихованными зонами. Эти изменения вызывают дополнительные погрешности формирования потоков: $K_3(\Delta h) = \pm 1\%$ и $K_d(\Delta h) = \pm 0,5\%$, которые необходимо учитывать при нахождении суммарных коэффициентов неидеальности отражений.

Рассмотренный пример показывает, что действительно существует принципиальная возможность использования разноволновых источников излучения и селективных фотоприемников для реализации ОЭДФМ определения деформаций лопаток.

Измерение средней высоты микронеровностей на торцах серийно изготавливаем-

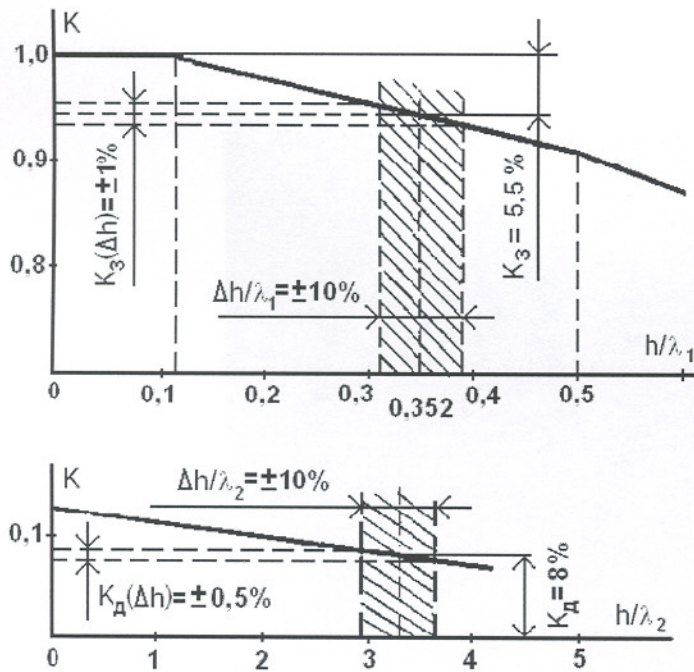


Рис. 4. Оценка отражающих свойств (КНО) торцов лопаток при $h = 3,0$ мкм;
 $\lambda_1 = 8,5$ мкм; $\lambda_2 = 0,91$ мкм

мых лопаток показало, что их величина лежит в пределах 20...50 мкм. Поэтому для формирования потока излучения, обладающего зеркальным отражением от таких поверхностей, требуются длинноволновые источники излучения со значениями $\lambda = 150...400$ мкм и соответствующие им приёмники для регистрации излучения. По данным [7], такие длины волн способны генерировать газовые лазеры. Например, лазер на основе CH_3CN имеет $\lambda = 417,8$ мкм. В качестве приемников излучения такого спектрального диапазона возможно использование, например, пироэлектрических детекторов [8], имеющих требуемый рабочий диапазон длин волн и необходимое быстродействие. Однако в настоящее время газовые лазеры длинноволнового диапазона изготавливаются практически только для экспериментальных лабораторных установок и не выпускаются серийно. Кроме того, газовые лазеры, как правило, имеют значительные габаритные размеры и сложную оптику, подверженную влиянию вибраций.

Необходимо также отметить общий недостаток, присущий всем рассмотренным способам осуществления ОЭДФМ. Он связан с тем, что с увеличением расстояния (зазора) между торцами лопаток и ППК СПС увеличивается прямо пропорционально и длина

дуги, которую прочерчивает отраженный луч по внутренней поверхности корпуса турбины, соответственно изменяются и временные интервалы между максимумами индикатрис зеркально и диффузно отраженных потоков.

Отмеченные недостатки оптоэлектронных разнородных способов сравнительно легко преодолеваются при выполнении исследовательских и экспериментальных работ, но затрудняют их использование на серийно выпускаемых и находящихся уже в эксплуатации турбомашин.

Способ определения деформаций лопаток при совместном использовании оптоэлектронных и вихретоковых первичных преобразователей

Структурная схема устройства [5] приведена на рис. 5. Она включает в себя установленные соосно в корпусе 2 турбомшины ППК СПС 3 и обмотку 4 вихретокового преобразователя (ВТП) 5; источник 6 излучения с длиной волны λ , обеспечивающей зеркальное отражение от торца 1 лопатки; фотоприемник 7; компараторы 8 и 9; дифференцирующую цепь 10; пиковый детектор 11; блоки выделения средин электрических импульсов 12 и 13; блок 14 измерения временных интервалов и перемножитель 15 электрических сигналов.

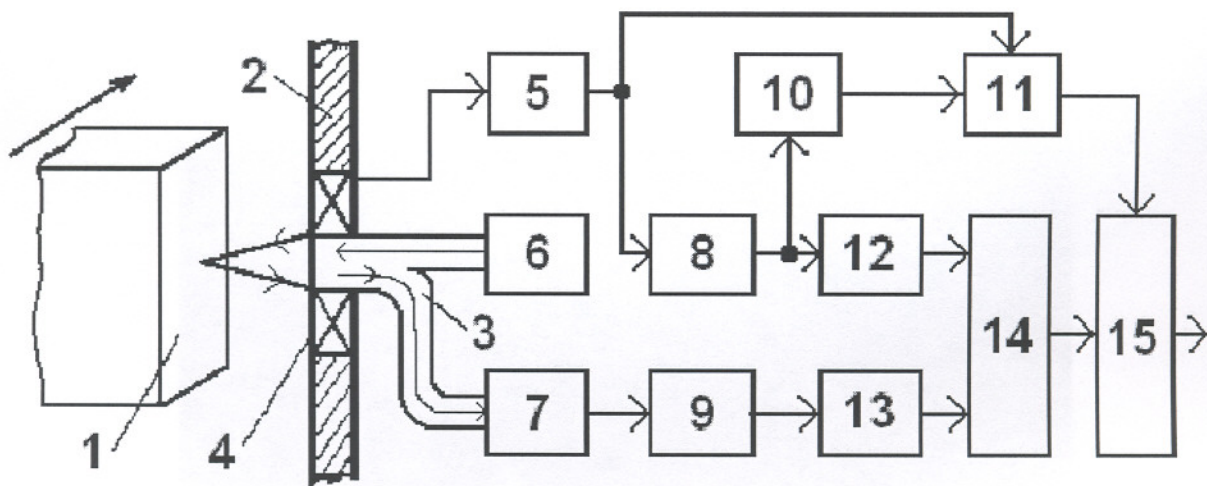


Рис. 5. Структурная схема устройства для определения деформаций лопаток с использованием ОЭП-ВТП

Определение деформаций лопаток при совместном использовании ОЭП-ВТП отличается от ранее рассмотренных способов тем, что вместо опорных импульсов, получаемых при диффузном отражении потока от торцов лопаток, используется электрический сигнал взаимодействия торца лопатки с ВТП. В силу малой чувствительности ВТП к изменению пространственного углового положения торца лопатки временное положение его оказывается более стабильным, что позволяет в несколько раз увеличить точность измерений. Информационный параметр - временной интервал между серединами импульсов фотоприемника и ВТП - связан прямо пропорционально с величиной зазора между торцами лопаток и корпусом турбомашин:

$$S_{\Delta} \sim K(\alpha)\delta, \quad K(\alpha) - \text{нормированная передаточная функция устройства; } \delta - \text{зазор.}$$

Известно [9], что амплитуда электрического сигнала ВТП в первом приближении зависит от зазора обратно пропорционально:

$$S_{ВТП} \sim K_1/\delta, \quad K_1 - \text{нормированный коэффициент преобразования, определяемый особенностями аппаратной реализации ВТП.}$$

Поэтому выполнение в блоке 15 операции перемножения электрических сигналов позволяет получить выходной результат, не зависящий в определенных пределах от зазора:

$$S_{ВЫХ} = S_{\Delta} S_{ВТП} \sim K_1 K(\alpha).$$

Схематично работу устройства, реализующего данный способ, можно представить следующим образом. Поток излучения от

источника 6 канализируется по одному из световодов СПС 3 к ППК и излучается с него в направлении траектории движения торцов лопаток. Излученный поток, попадая на торцы лопаток, отражается от них и частично попадает на ППК СПС 3, а затем по второму световоду канализируется к фотоприемнику 7. ВТП 5, обмотка 4 которого расположена соосно с ППК СПС 3 в корпусе 2 турбоагрегата, генерирует электрические импульсы во время прохождения возле обмотки торцов лопаток. Затем электрические импульсы с ВТП и фотоприемника формируются по определенному уровню компараторами 8 и 9, после чего поступают в блоки 12, 13 выделения середин импульсов. Временной интервал между ними измеряется и нормируется к максимальной величине в блоке 14. Для фиксации пикового уровня импульсы ВТП поступают на информационный вход пикового детектора 11, выходное напряжение которого после нормировки подается на один из входов перемножителя 15. На его второй вход поступает напряжение, соответствующее измеренному временному интервалу. После выполнения операции перемножения результат подается на выход устройства. Для обеспечения возврата пикового детектора в исходное состояние используется дифференцирующая цепь 10.

При выборе необходимого источника излучения критерием служил коэффициент неидеальности зеркального отражения K_3 , мощность, габариты и стоимость излучате-

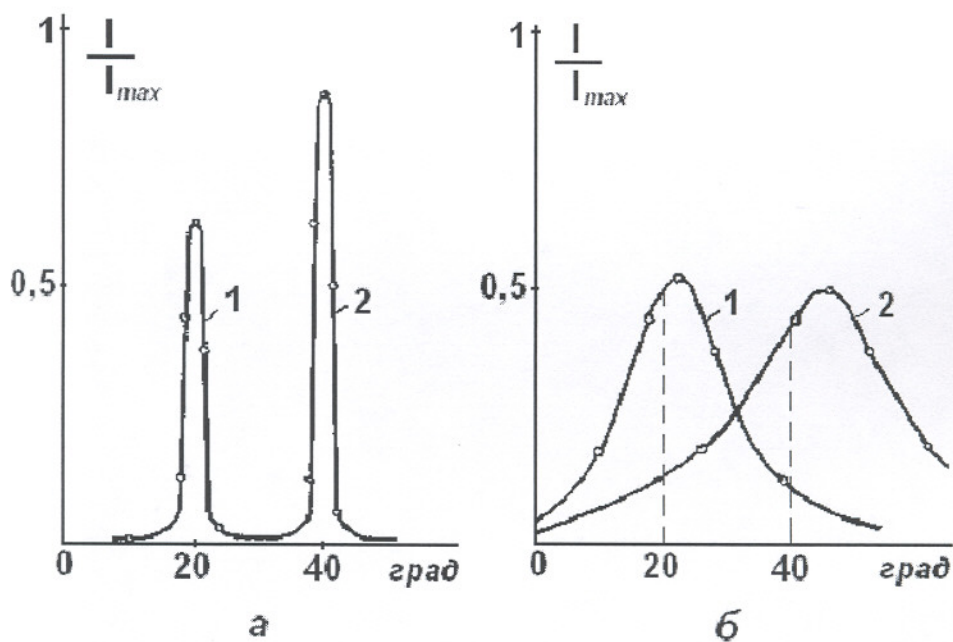


Рис. 6. Индикатрисы отражения от торца реальной лопатки при облучении под углами: 1 - 20°; 2 - 40°; а - в плоскости, параллельной штрихам; б - в плоскости, перпендикулярной штрихам

ля. При использовании одного и того же полупроводникового светодиода типа АЛ107 в режиме излучения и приема, имеющего максимум спектральной характеристики на $\lambda = 1,1$ мкм, КНО не превышал 3...5%. Миниатюрное исполнение корпуса светодиода, достаточная мощность генерируемого в непрерывном режиме излучения (порядка 10 мВт), небольшая стоимость – все это позволяет использовать данный радиоэлемент при построении оптоэлектронных преобразователей.

Кажущееся расхождение теоретических соотношений между характером отраженного потока и отношением h/λ объясняется тем, что поверхность торца реальной лопатки, например газотурбинного двигателя НК-12СТ, имеет штрихообразный контур поверхности после выполнения обязательной стандартной технологической операции проточки лопаточного венца в составе ротора турбомшины. Это является причиной своеобразного отражения излучения, падающего на такую поверхность. На рис.6а приведены для примера экспериментальные нормированные индикатрисы отражения от торца реальной лопатки в плоскости, параллельной штрихам, т. е. в плоскости вращения лопаточного колеса. Наблюдения проводились под углами

20° и 40°, в обоих случаях имело место правильное зеркальное отражение. На рис. 6б приведены экспериментальные нормированные индикатрисы отражения от торца той же лопатки, но в плоскости, перпендикулярной к штрихам. Максимумы отраженного потока наблюдаются вблизи направления зеркального отражения с тенденцией смещения в сторону, противоположную облучателю, и область рассеяния занимает значительно более широкий телесный угол. Полученные результаты подтверждаются результатами работы [10].

Таким образом, совместное комбинированное использование ОЭП и ВТП позволяет реализовать все достоинства ОЭДФМ определения деформаций динамически нагруженных лопаток турбомашин, устранить недостатки, присущие вышеописанным разнотолновым способам и устройствам, выполнить требования ограниченного препарирования корпуса турбоагрегата и исключить дополнительные технологические операции по формированию на торцах лопаток отражающих участков.

Список литературы

1. Заблочный И. Е., Коростелев Ю. А., Шипов Р. А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1977. 160 с.

2. А. с. 1256506 СССР, МКИ³ G01B 11/16. Способ определения деформаций лопаток вращающегося колеса турбомашин и устройство для его осуществления/ В. А. Медников, А. И. Данилин (СССР). Оpubл. Бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 20, 2001 г.

3. А. с. 1293483 СССР, МКИ³ G01B 11/16. Способ определения деформаций лопаток вращающегося колеса турбомашин/ В. А. Медников, А. И. Данилин (СССР). Оpubл. Бюл. «Изобретения» № 8, 1987 г.

4. А. с. 1383970 СССР, МКИ³ G01B 11/16. Способ определения деформаций лопаток вращающегося колеса турбомашин/ В. А. Медников, А. И. Данилин, Ю. И. Макарычев (СССР). Оpubл. Бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 20, 2001 г.

5. А. с. 1450531 СССР, МКИ³ G01B 11/16. Способ определения деформаций лопаток вращающегося колеса турбомашин и устройство для его осуществления/ В. А. Мед-

ников, А. И. Данилин (СССР). Оpubл. Бюл. «Изобретения» № 33, 1998 г.

6. Винокуров В. М. Исследование процесса полировки стекла. М.: Машиностроение, 1967. 168 с.

7. Справочник по лазерной технике /Под ред. Ю. В. Байбородина. Киев: Техника, 1978. 256 с.

8. Полупроводниковые фотоприемники. Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон спектра /Под ред. В.И.-Стафеева. М., Радио и связь, 1984. 216 с.

9. Данилин А. И., Макарычев Ю. И., Медников В. А. Выбор и оценка влияния факторов, определяющих передаточную характеристику электромагнитных первичных преобразователей: Тез. докл. VII областной НТК. Куйбышев, 1985. С. 109.

10. Топорец А. С. Гониоспектрофотометрическая установка //Оптика и спектроскопия, 1959. № 7. С. 20-24

OPTOELECTRONIC DISCRETE PHASE METHOD FOR THE DETERMINATION OF TURBINE BLADE DEFORMATION PARAMETERS

© 2003 A. I. Danilin

Samara State Aerospace University

The paper describes the optoelectronic discrete phase method for measuring deformation of blades of rotating bladed-disc assemblies of turbomachines. Advantages and disadvantages of different versions of optoelectronic discrete phase method realization are dealt with. A criterion relating parameters of the reflecting surface to the radiator wavelength and making it possible to formulate the conditions necessary for the implementation of the method is introduced. Several circuit diagrams of devices for the realization of the method are presented.