

ПЕРВИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

© 2003 А.И. Данилин¹, В.А. Медников¹, А.Ж. Чернявский², А.С. Капустин¹

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет

² ОАО “АВТОВАЗ”, г. Тольятти

В статье рассматривается датчик, предназначенный для реализации оптоэлектронного дискретно-фазового метода, в котором конструктивно объединены оптоэлектронный и вихретоковый первичные преобразователи. Рассмотрены составляющие инструментальной погрешности различных вариантов построения оптоэлектронных первичных преобразователей, определена динамическая погрешность предложенного оптоэлектронного первичного преобразователя, приведены экспериментальные выходные характеристики оптоэлектронного и вихретокового первичных преобразователей для конкретной конструктивной реализации.

Среди известных методов определения деформационного состояния лопаток в условиях реально работающих турбомашин важное место занимает оптоэлектронный дискретно-фазовый метод (ОЭДФМ) [1]. Главным достоинством ОЭДФМ является отсутствие корневых датчиков, что существенно снижает объем препарирования турбомашин и уменьшает трудоёмкость проводимых измерений. Установка первичных преобразователей в корпусе турбомашин заподлицо с внутренним защитным кольцом практически полностью исключает влияние измерительных средств на процессы, протекающие во внутреннем тракте двигателя. Кроме этого оптоэлектронные измерители деформаций лопаток наряду с традиционным использованием ДФМ, позволяют расширить его функциональные возможности в части измерения локальных деформаций, обусловленных кромоными или пластиночными высокочастотными колебаниями лопаток, устранить недостатки присущие таким реализациям ДФМ как ЭЛУРА, ЭЛИА [2].

Наиболее ответственным функционально-информационным узлом при реализации ОЭДФМ определения деформаций лопаток является первичный преобразователь. Среди известных вариантов построения подобных оптоэлектронных ДФМ измерителей выделяется способ [1], в котором используются со-

вместно первичные оптоэлектронный и вихретоковый преобразователи (ОЭП, ВТП). Совместное использование ВТП и ОЭП позволяет получать более стабильное положение опорного импульса, не зависящее от качества обработки поверхности торцов лопаток, и информацию о зазоре между торцами лопаток и корпусом двигателя.

ВТП для реализации ОЭДФМ, принципиальная схема которого приведена на рис. 1, представляет собой индуктивный параметрический мост. Мост запитывается от генератора синусоидальным напряжением частотой 15 МГц. В диагональ моста включены детектирующие диоды VD1, VD2. Балансировочный резистор $R_{\text{бал}}$ позволяет скомпенсировать технологический разброс величин индуктивностей, причём обмотки L1, L4 являются измерительными, а L2, L3 – компенсационными. Характеристики ВТП, их зависимость от

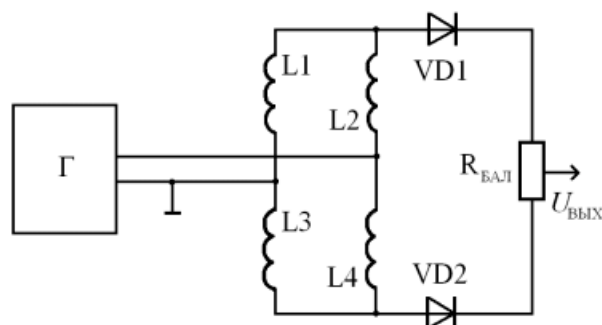


Рис.1. Принципиальная электрическая схема ВТП

внешних воздействий, от конструктивных параметров, дестабилизирующих факторов подробно исследованы в работах [3, 4]. Поэтому в статье ВТП рассматривается как известное исследованное устройство, являющееся составной частью комбинированного первичного преобразователя (КПП).

Для построения ОЭП часто применяется оптронный вариант с открытым каналом [5]. Использование оптронного ОЭП в рассматриваемой системе приводит к существенной зависимости его информационных параметров от пространственного положения диаграмм направленностей (ДН) излучателя и фотоприемника и их отклонения от осевого направления КПП. Разброс ориентаций ДН порождает суммарный композиционный эффект, приводящий к статическому смещению импульса фотоприемника. Причём погрешность, обусловленная таким статическим смещением, зависит от взаимной ориентации ДН излучателя, фотоприёмника и расположения объекта контроля.

По справочным данным [6] направления максимумов ДН светодиодов, например, могут отличаться друг от друга на 60° . Для определения величины погрешности от разброса положений ДН была проведена серия экспериментов с оптронным вариантом ОЭП, в которой менялись 40 различных пар светодиод-фотодиод. Излучение светодиода отражалось от торца лопатки, движущейся перед ОЭП, и регистрировалось фотодиодом. Целью эксперимента являлось определение вероятностно-количественной оценки этой погрешности. Для этого измерялось смещение (Δl) середины принятого фотоприемником импульса от оси КПП, диаметр которого d_3 . Обработка результатов эксперимента и построение гистограмм распределения относительной погрешности $\psi(\Delta l) = f(\Delta l / d_3)$ показали, что в первом приближении распределение этой зависимости описывается нормальным законом. Согласно [7] математическое ожидание по результатам эксперимента можно оценить по формуле:

$$m(\psi) = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i(\Delta l)}{N},$$

где N - число экспериментов; $\psi_i(\Delta l)$ - значение относительной погрешности в i -м эксперименте. При количестве экспериментов $N = 40$ математическое ожидание $m(\psi) = 3,87$.

Оценка дисперсии D определяется формулой Бесселя:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N [\psi_i(\Delta l) - m]^2}{N - 1}.$$

При $N = 40$ $D = 25,56$ тогда среднеквадратическое отклонение этой погрешности $\sigma = 5,2$. Предельная оценка погрешности находится по формуле: $\psi_{np}(\Delta l) = m \pm 3\sigma$.

Уменьшить величину погрешности от разброса ориентаций ДН излучателя и фотоприемника позволяет введение оптической насадки (ОН), выполненной в виде прутка-световода [8]. Уменьшение погрешности объясняется эффектом симметризации и смещения лучей в световодных структурах [9]. Для оценки погрешности $\psi(\Delta l)$ в случае использования ОН была проведена аналогичная серия экспериментов, в которой менялись те же 40 пар светодиод-фотодиод. В результате обработки результатов эксперимента получены следующие вероятностные оценки: $m = 0,9$, $\sigma = 1,1$.

Полученные данные показывают, что введение ОН позволяет практически в 5 раз уменьшить влияние разброса ДН излучателя и фотоприёмника. Остаточная погрешность объясняется тем, что оси источника излучения и фотоприемника располагаются, соответственно, не на осях входа и выхода ОН, а также скосом входных и выходных торцов оптической насадки. Потому что, если световод работает в воздухе, то скос его торца на угол η отклоняет ось входного или выход-

ного излучения на угол

$$\varphi = \arcsin(n_c \sin \eta) - \eta,$$

где n_c - показатель преломления материала сердцевины световода [9]. По данным калибровочных измерений изготовленных ОН ($n_c = 1,755$) величина η достигает двух градусов, поэтому отклонение ДН от оси КПП может составить:

$$\varphi = \arcsin(1,755 \sin 2^\circ) - 2^\circ = 1,5^\circ.$$

Погрешности, обусловленные шумами фотодиода и операционного усилителя, исследованы в работе [10]. Они характеризуются нормальным законом распределения с параметрами:

$$m_{\varphi\delta} = 0, \quad \sigma_{\varphi\delta} = 1,08 \cdot 10^{-3};$$

$$m_{\sigma y} = 0, \quad \sigma_{\sigma y} = 8 \cdot 10^{-4}.$$

В силу их сравнительной малости по отношению к рассмотренным выше погрешностям ими можно пренебречь.

Таким образом, инструментальная погрешность ОЭП в системе ОЭДФМ определяется в основном конструктивно-технологическими соотношениями. Поэтому предъявление повышенных требований к изготовлению и сборке рассмотренных узлов ОЭП позволяет уменьшить инструментальную погрешность до (0,1...0,2)%.

Кроме уменьшения инструментальной погрешности введение ОН в виде цилиндра из прозрачного материала [8] позволяет упростить конструкцию ОЭП по сравнению со сложными линзовыми системами, добиться увеличения выходного сигнала ОЭП при малых установочных зазорах, обеспечить максимальную чувствительность к отраженному потоку, сформировать передаточную характеристику $U_{\text{ОЭП}} = f(\delta)$, обеспечивающую однозначность измерений во всем диапазоне установочных зазоров. Для оптимизации конструкции и оценки выходных электрических параметров ОЭП были проведены экспериментально-исследовательские работы на установке, показанной на рис.2.

Здесь, на неподвижной платформе нони-

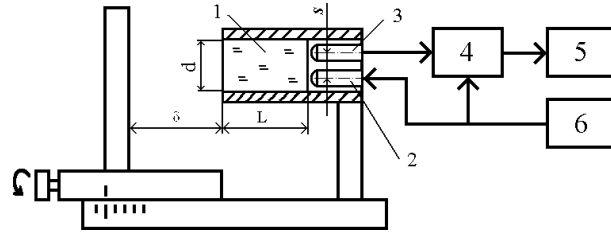


Рис.2. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик ОЭП

усного измерителя зазоров установлена оптическая насадка 1, к одному из торцов которой подведена оптоэлектронная пара: излучатель 2 - светодиод типа АЛ107Б и фотоприемник 3 - светодиод такого же типа, но используемый в режиме фотодиода. Сигнал с фотоприемника 3 усиливается в блоке 4, и регистрируется цифровым вольтметром 5. Питание излучателя 2 и усилителя 4 осуществляется стабилизированным напряжением от источника 6.

Вначале, для обоснования выбора взаимного расположения пары излучатель-фотоприемник и диаметра размера s между их осевыми линиями на неподвижной платформе нониусного измерителя закреплялась оптоэлектронная пара без ОН. При фиксированных расстояниях s снимались зависимости выходного напряжения фотоприемника от величины зазора до отражающей поверхности. Семейство полученных передаточных характеристик приведено на рис.3. Характерный одногорбый вид кривых под-

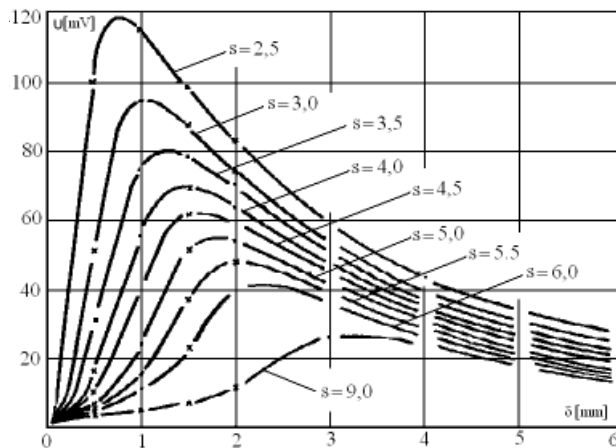


Рис.3. Графики выходных напряжений ОЭП без оптической насадки для различных межосевых расстояний s между излучателем и фотоприёмником

тверждается также работами [5, 6], в которых рассматриваются оптоэлектронные пары с открытым каналом. Из графиков следует, что минимальная чувствительность к отраженному потоку наблюдается при $s = 2,5$ мм. Характеристики для $s < 2,5$ мм отсутствуют, т.к. диаметры излучателя и фотоприемника равны этой величине. Следует также отметить, что в силу значительного разброса пространственного положения диаграмм направленностей излучателя и фотоприемника, положение максимумов кривых на рис.3 может отличаться от приведенного в 1,5-2 раза.

Для определения оптимальной длины L оптической насадки на экспериментальной установке (рис.3) снимались зависимости выходного напряжения преобразователя от величины зазора для оптических насадок различной длины, изготовленных из единичного прутка-световода диаметром 3 мм. Результаты экспериментов приведены в виде графиков на рис.4, из которых следует, что с уменьшением длины оптической насадки увеличивается выходное напряжение фотоприемника. Объясняется это уменьшением потерь на поглощение и рассеяние потока излучения в материале световода. Увеличение выходного сигнала фотоприемника наблюдается до $L = (10-7)$ мм. При дальнейшем уменьшении длины оптической насадки нарушается процесс смещения и симметризации лучей в световодной структуре, что приводит к появлению экстремума, характерного для ОЭП с открытым каналом, а также к сужению однозначного динамического ди-

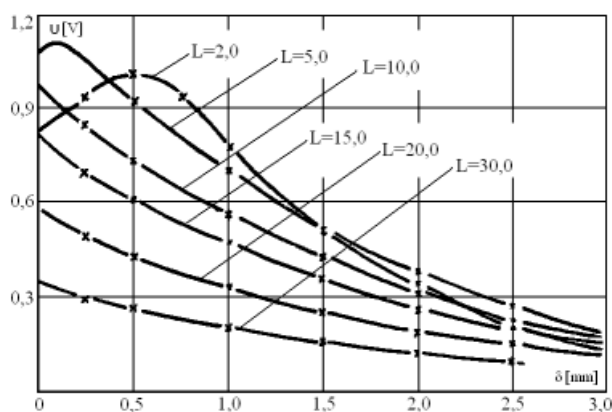


Рис.4. Выходные напряжения ОЭП для различной длины оптических насадок

апазона при выборе установочных зазоров. Поэтому в контексте рассмотрения конструктивных размеров элементов ОЭП следует учитывать особенности выбора длины оптической насадки.

Для определения влияния отражающих свойств боковой поверхности оптической насадки на характеристики ОЭП был проведен сравнительный эксперимент с тремя ОН, имеющими одинаковые геометрические размеры: $d = 3,0$ мм, $L = 15,0$ мм. Первая оптическая насадка представляла собой однородный цилиндрический стержень из кварцевого стекла. Вторая – стержень из кварцевого стекла, на боковую поверхность которого методом вакуумного напыления было нанесено алюминиевое зеркально отражающее покрытие. Третья оптическая насадка была изготовлена из световодного прутка, материал сердцевины которого СТФ 5, а материал оболочки ЛК 6, с показателями преломления, соответственно: $n_c = 1,755$ и $n_o = 1,47$. На рис.5 показаны результаты сравнительного эксперимента. Из анализа графических зависимостей следует, что предпочтительным выбором для изготовления оптических насадок для ОЭП, являются единичные прутки-световоды, т.к. они позволяют получить вдвое большую чувствительность к отраженному потоку. Анализ причин, вызывающих

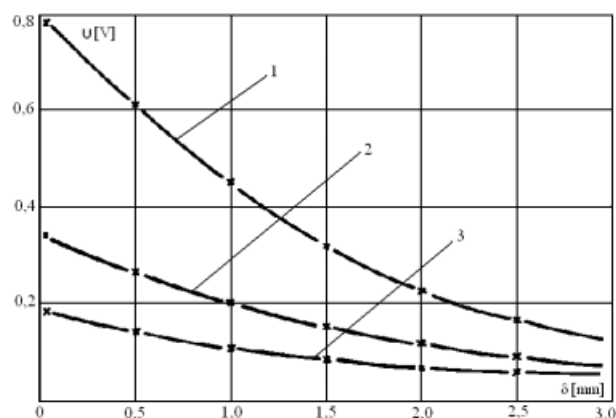


Рис.5. Выходные напряжения ОЭП для различных оптических насадок:

1 – прутки-световоды; 2 – кварцевый стержень с алюминированной боковой поверхностью; 3 – кварцевый стержень

уменьшение чувствительности ОЭП с алюминированной оптической насадкой, показал, что при вакуумном напылении, микротрещины, имеющиеся на боковой поверхности стержня из кварцевого стекла, заполняются алюминием и становятся очагами дополнительного рассеяния и ослабления канализируемого потока.

Динамические погрешности ОЭП обусловлены инерционностями фотодиода (ФД) и операционного усилителя (ОУ), т.е. суммарными емкостями ФД и ОУ, и в значительной степени определяются схемой включения ФД. Для реализации ОЭДФМ особый интерес представляет фотогальванический режим ФД в паре с ОУ. Согласно [10] в таком режиме ФД нагружен практически короткозамкнутой цепью, поэтому существенно уменьшается влияние суммарной емкости ФД на частотные свойства преобразователя. Кроме этого, в таком режиме преобразователь характеризуется линейными вольт-амперной и люкс-амперной характеристиками, обеспечивается наибольшая временная и температурная стабильность преобразования, а также возможность измерения слабых потоков излучения.

Принципиальная электрическая схема ОЭП, используемая в системе ОЭДФМ, представлена на рис.6. Для уменьшения динамических искажений рекомендуется [10] использовать быстродействующие ОУ. Цепь R1R2C1 служит для компенсации постоянной паразитной засветки, возникающей в результате отражений потока излучения от торцов оптической насадки. Основным фактором, определяющим инерционные свойства фото-

гальванического преобразователя при приеме сравнительно низкочастотных видеосигналов [10], является величина сопротивления в цепи обратной связи ОУ R4. Увеличение R4 с одной стороны приводит к улучшению соотношения сигнал-шум, с другой - к уменьшению полосы пропускания приемно-усилительного тракта, которая может оказаться уже ширины спектра информационного сигнала. Для определения ширины спектра можно представить выходной сигнал ОЭП гауссовым импульсом. При этом спектральная полоса, определяемая на уровне $e^{-0,5}$ от максимального значения спектральной плотности, равна:

$$\Delta f = \frac{4}{\tau_u},$$

где $\Phi = f(\varphi)$ - длительность импульса на уровне $e^{-0,5}$ от его амплитудного значения. Например, на рабочем режиме для первой ступени компрессора НК-12СТ: $U_{вых} = f(\delta)$, поэтому $\Delta f = 400$ кГц. На режиме малого газа $\tau_u \approx 20$ мкс и $\Delta f = 200$ кГц. Поэтому, для устранения частотных искажений при обработке сигнала ФД верхняя граничная частота усилителя-преобразователя должна быть не менее 400 кГц.

Количественную величину динамической погрешности можно определить, приняв во внимание то обстоятельство, что ОЭП в первом приближении можно рассматривать как инерционное звено первого порядка [10] с коэффициентом передачи

$$K = -R_{oc} \frac{K_{oy}\beta}{K_{oy}\beta + 1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{p\tau_{oэп}}{K_{oy}\beta + 1}},$$

где K_{oy} - статический коэффициент усиления ОУ; $\beta = \frac{R_{oc}}{R_{oc} + R_i}$ - коэффициент обратной связи; R_{oc} - сопротивление цепи обратной связи; R_i - внутреннее сопротивление

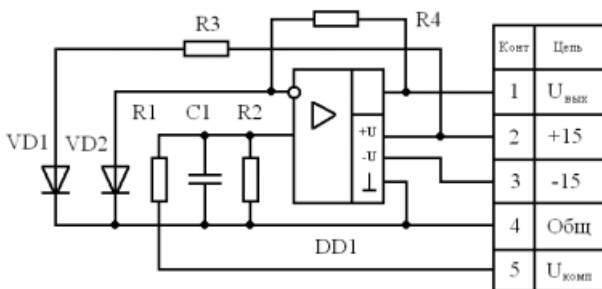


Рис.6. Электрическая принципиальная схема оптоэлектронной части КПП

фотодиода; $\tau_{OЭП}$ - постоянная времени ОЭП.

Далее, переходная характеристика аperiodического звена описывается выражением:

$$a(t) = -K(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{OЭП}}})$$

тогда, используя свойства интеграла Дюамеля, можно определить выходной сигнал ОЭП:

$$U_{вых}(t) = U_{вх}(0)a(t) + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dU_{вх}}{d\Theta} a(t - \Theta) d\Theta$$

Определение выходного импульса ОЭП по этой формуле для входного гауссова импульса связано с вычислением нетабличного интеграла. Поэтому интегрирование выполнялось численными методами по формуле Симпсона. Анализ результатов вычислений показал, что относительная динамическая погрешность смещения середины выходного импульса при вариациях частоты вращения ротора ГТД от малого газа до рабочего режима не превышает 0,068%. Вычисления производились при следующих значениях исходных параметров: $R_{oc} = 50 \text{ кОм}$, $R_i = 20 \text{ Ом}$, $K_{OУ} = 5 \cdot 10^4$, $\tau_{OЭП} = 0,1 \text{ мс}$.

Исследование выходных характеристик ОЭП-ВТП проводилось для комбинированного первичного преобразователя, сборочный чертёж и габаритные размеры которого приведены на рис.7, а внешний вид показан на фотографии рис.8. Конструктивно ОЭП-ВТП представляет собой металлический цилиндр,

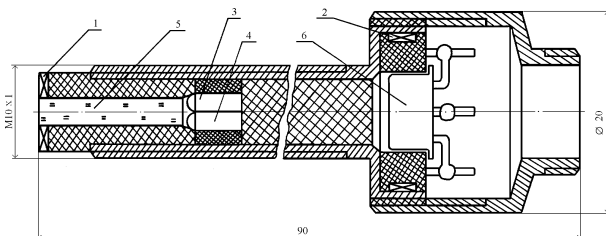


Рис.7. Сборочный чертёж первичного комбинированного первичного преобразователя:

1, 2 – измерительная и компенсационная обмотки ВТП; 3 – светодиод; 4 – фотодиод; 5 – оптическая насадка; 6 – операционный усилитель.

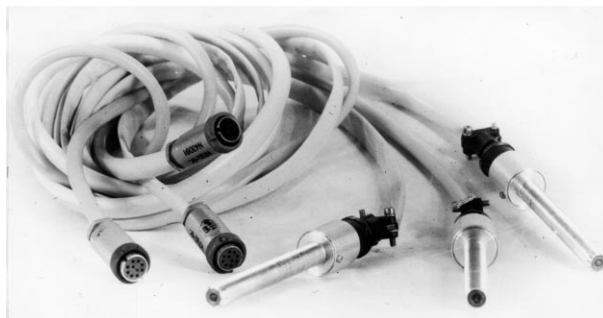


Рис.8. Внешний вид первичных комбинированных преобразователей ОЭП-ВТП

на внешней поверхности которого нарезана резьба $M10 \times 1$, необходимая для его крепления в корпусе турбомшины.

Исследование зависимости выходного напряжения ОЭП-ВТП от величины установочного зазора $U_{вых} = f(\delta)$ проводилось на установке, функциональная схема которой приведена на рис.9. На подвижной части нониусного измерителя перемещений 1 установлен КПП 2. На неподвижной его части установлена лопатка 3 первой ступени компрессора НК-12СТ таким образом, что осевая линия лопатки совпадала с осью первичного преобразователя. Выходы ОЭП-ВТП подключены к прецизионному усилителю 4 информационных напряжений, которые фиксируются цифровым вольтметром 5, при этом блок 6 обеспечивает требуемые для работы установки стабилизированные напряжения. Экспериментально полученные выходные характеристики разработанных ОЭП-ВТП показаны на рис.10.

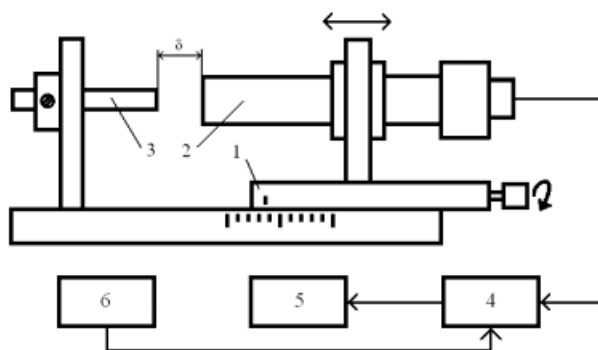


Рис.9. Схема экспериментальной установки для исследования зависимости выходного напряжения ОЭП-ВТП от зазора

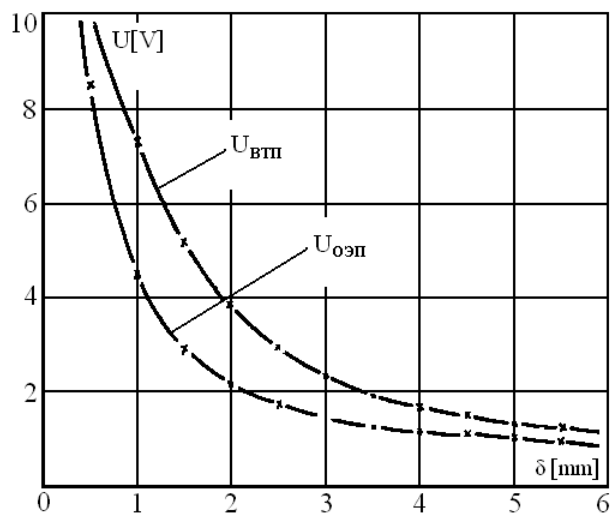


Рис. 10. Зависимости выходного напряжения КПП от установочного зазора

Исследование индикатрисы излучения-приема ОЭП $\Phi = f(\varphi)$ проводилось на установке, схема которой приведена на рис.11. Угловые положения φ лопатки 3 задавались с помощью нониусного гониометра 1, при этом выходное напряжение ОЭП 2, усиленное в блоке 4, регистрировалось цифровым вольтметром 5. На рис. 12 приведена экспериментально полученная зависимость $U/U_{max} = f(\varphi)$.

Расхождение характеристик в нижней части графиков объясняется тем, что торец реальной лопатки и ее боковые грани не образуют между собой прямых углов, а изготавливаются с некоторым технологическим закруглением. Поэтому торец реальной лопатки дает более широкую диаграмму отра-

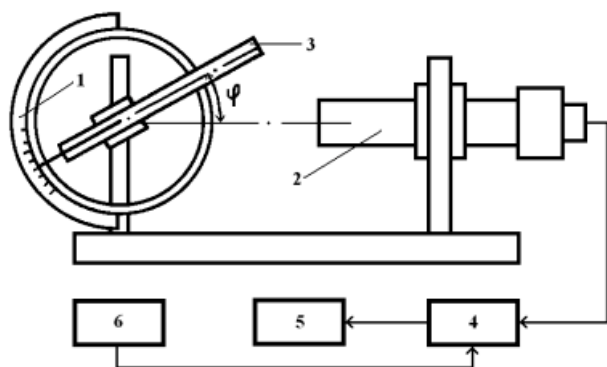


Рис. 11. Схема экспериментальной установки для исследования индикатрисы излучения-приёма ОЭП

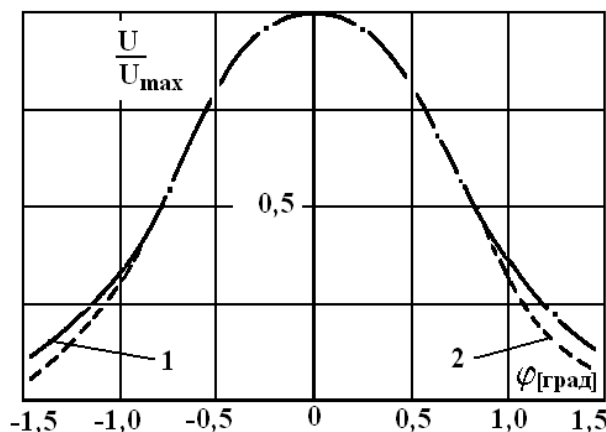


Рис.12. Экспериментальная 1 и расчётная 2 индикатрисы ОЭП

жения на уровнях U/U_{max} меньших 0,5.

Разработанный КПП применялся в экспериментальных работах по апробированию и отладке аппаратных средств ОЭДФМ определения деформаций лопаток в части установления степени коррелируемости с результатами их параллельного тензометрирования. Проведённый после этого сравнительный анализ конечных результатов показал их удовлетворительное совпадение и подтвердил требуемое соответствие технических характеристик ОЭП и ВТП. Кроме этого, на базе КПП была построена система измерения виброперемещений изделий из композитных материалов, которая позволила обеспечить необходимую длительность непрерывных испытаний вне зависимости от электропроводности материала и уменьшить трудоёмкость работ по сравнению с тензометрированием.

Полученные результаты позволяют предполагать, что разработанный комбинированный первичный преобразователь и оптоэлектронный способ определения деформационных параметров лопаток найдут своё место в арсенале аппаратно-методических средств исследования, диагностики и контроля лопаточных венцов турбоагрегатов, измерения зазоров и виброперемещений различных подвижных узлов и механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1450531 СССР. Способ определения деформаций лопаток вращающегося ко

- леса турбомашин и устройство для его осуществления / В.А. Медников, А.И. Данилин (СССР). Оpubл. Бюл. № 33, 1998 г.
2. *Заблоцкий И.Е., Коростелев И.А., Шилов Р.А.* Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М.:Машиностроение, 1977.
 3. *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.
 4. *Соболев В.С., Шкарлет Ю.М.* Накладные и экранные датчики. М.:Наука, 1967.
 5. *Гейч С., Эванс Д., Ходанн М., Соренсен Х.* Применение оптоэлектронных приборов. М.: Радио и связь, 1984.
 6. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник/ В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин. М.:Энергоатомиздат, 1989.
 7. *Соренков Э.И., Делига А.И., Шаталов А.С.* Точность вычислительных устройств и алгоритмов. М. Машиностроение, 1976.
 8. А.с. 1223030 СССР. Оптический датчик перемещений/В.А. Медников, В.А. Олейников, А.И. Данилин (СССР). Оpubл. Бюл. № 13, 1986 г.
 9. *Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К.* Оптика световодов. М. Машиностроение, 1977.
 10. *Воропай Е.С., Карась В.И., Торпачев П.А.* Оптимизация пары фотодиод-операционный усилитель для измерения слабых световых потоков // Измерительная техника. 1985. № 3.

**PRIMARY TRANSDUCER FOR REALIZING OPTOELECTRONIC
DISCRETE-PHASE METHOD FOR TURBOMACHINE BLADES
DEFORMATION MEASUREMENT**

© 2003 A.I. Danilin¹, V.A. Mednikov¹, A.G. Tcherniavski², A.S. Kapustin¹

¹Samara State Aerospace University

²Joint-Stock Company AVTOVAZ, Togliatti

The article is considering the sensor constructively combining the optoelectronic and eddy-current primary transducers and intended to realize optoelectronic discrete-phase method. Instrumental error components are examined for different variants of optoelectronic primary transducers, dynamic error for offered optoelectronic primary transducer is determined and the experimental output characteristics of the optoelectronic and eddy-current primary transducers of given embodiment are shown in the article.