

УДК 531.7:681.5

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0022

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО
ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

© 2021

Данилин Сергей Александрович, старший преподаватель кафедры радиотехники
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34, e-mail: danilin.sa@ssau.ru)

Аннотация. В статье описываются полученные аналитические выражения для модели процесса взаимодействия зондирующего излучения оптического диапазона с криволинейной поверхностью лопатки газотурбинного двигателя и формирования информационного сигнала первичного преобразователя, позволяющие определить профиль и кривизну в произвольной точке поверхности пера лопатки. При разработке математической модели использованы: основные положения дискретно-фазового метода, теоретические положения фотометрии и геометрической оптики, методы интегрального и дифференциального исчисления, имитационное компьютерное моделирование, математический аппарат аналитической геометрии и линейной алгебры, численные методы решения дифференциальных уравнений. Разработанная модель позволяет получать количественную оценку информационной части сигнала фотоприемника – положения максимума импульса фотоприемника, а также определять факторы, влияющие на положение информационного параметра: изменение установочных зазоров, диаметра приемно-передающего коллектора оптической насадки, а также выявить особенности формирования фронтов импульсов фотоприемника и выработать рекомендации для конструкторской реализации оптоэлектронного дискретно-фазового преобразователя геометрии поверхности лопаток. В заключении сделаны выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатка, профиль лопатки, кривизна боковой поверхности лопатки, дискретно-фазовый метод, оптоэлектронный дискретно-фазовый преобразователь, приемно-передающий коллектор, оптическая насадка, индикатриса излучения, световой поток, фотоприемник.

**A MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATION OF AN OPTOELECTRONIC DISCRETE-PHASE
CONVERTER FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF THE GEOMETRY OF THE SURFACE OF
THE BLADES OF A GAS TURBINE ENGINE**

© 2021

Danilin Sergey Alexandrovich, senior lecturer of the department of radio engineering
Samara National Research University named after Academician S. P. Korolyev
(34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia, e-mail: danilin.sa@ssau.ru)

Abstract. The article describes the obtained analytical expressions for the model of the interaction of the probing radiation of the optical range with the curved surface of the turbine unit blade and the formation of the information signal of the primary converter, which allow determining the profile and curvature at an arbitrary point of the surface of the feather of the gas turbine engine blade. In the development of the mathematical model, the following were used: the main provisions of the discrete-phase method, theoretical provisions of photometry and geometric optics, methods of integral and differential calculus, mathematical modeling, simulation computer modeling, mathematical apparatus of analytical geometry and linear algebra, numerical methods for solving differential equations. The developed model makes it possible to obtain a quantitative assessment of the information part of the photodetector signal - the position of the maximum pulse of the photodetector, as well as to determine the factors affecting the position of the information parameter: changes in the installation gaps, the diameter of the PPC of the optical nozzle, as well as to identify the features of the formation of the photodetector pulse fronts and to develop recommendations for the design implementation of an optoelectronic discrete-phase converter of the geometry of the surface of the blades. In conclusion, conclusions are drawn on the work done.

Keywords: gas turbine engine, blade, blade profile, curvature of the side surface of the blade, discrete-phase method, optoelectronic discrete-phase converter, receiving-transmitting collector, optical nozzle, radiation indicatrix, luminous flux, photodetector.

Введение. Лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) представляют собой изделия со сложной пространственной конфигурацией, например, лопатки компрессора относительно тонкие со значительным перепадом по толщине от периферийного к корневому сечению, имеющие малую кривизну и при этом отличающиеся высокой геометрической точностью изготовления [1, 2]. Высокая точность изготовления пера

лопатки ГТД обусловлена сложным балансом между аэродинамическими, прочностными характеристиками и производственно-технологическими требованиями [3, 4]. В связи с этим задачи повышения точности определения геометрии при изготовлении лопаток ГТД являются востребованными и важными.

Бесконтактное определение геометрических параметров поверхностей сложно-профилированных

объектов базируются, в основном, на оптоэлектронных методах, которые в свою очередь реализуются с помощью сложных оптико-механических систем и многоэлементных фотоприемников. Необходимо отметить сложность их настройки и юстировки, а также в большинстве своем, требующих лабораторных, не цеховых условий эксплуатации. С другой стороны потенциальная точность и возможность практической автоматизации процессов измерения, заложенные в оптоэлектронных методах, являются основой разработки быстродействующего оптоэлектронного дискретно-фазового преобразователя для автоматизированного контроля геометрии пера лопаток ГТД. Кроме этого, в связи с возрастанием требований к надежности и точности контроля поверхности лопаток ГТД возникает необходимость в дополнительной информации о параметрах геометрии пера лопатки таких, как кривизна поверхности, что расширяет функциональные возможности преобразователя и повышает достоверность измерений. Обзор методов определения геометрии поверхностей лопаток ГТД показывает, что проводимые исследования направлены в основном на совершенствование теории и способов свето-теневых, интерферометрических, триангуляционных измерений в сочетании с многоэлементными развертывающими фотоприемниками; совершенствованием компьютерных систем технического зрения, компьютерно-программной обработкой информационных сигналов [5-12]. Следует также отметить общий недостаток этих систем, состоящий в том, что в их основе лежит амплитудный метод обработки параметров информационных сигналов фотоприемников.

Автором предложен новый метод [13-15] определения параметров сложно-профильных поверхностей, основанный на теории дискретно-фазовых преобразователей (ДФП) [16]. Разрабатываемый оптоэлектронный дискретно-фазовый преобразователь (ОЭДФП) позволяет:

- оперативно проводить качественное сравнение с эталоном;
- реализовать многопараметровость контроля, позволяя одновременно определять профиль поверхности в требуемых сечениях и кривизну поверхности пера лопатки;
- представлять результаты контроля геометрии поверхности лопаток в форме адекватной общепринятой для разработчиков лопаток турбоагрегатов;
- не требует сложных математических вычислений и наличия комплексной структурной подсветки, как стереометрический метод;
- не требует точного двумерного сканирования, как триангуляционный метод;
- проводить двусторонний контроль, т.е. не требует переворачивания лопатки;
- контролировать широкую номенклатуру лопаток различной формы и размеров.

Целью статьи является разработка и исследование математической модели процесса взаимодействия зондирующего излучения оптического диапазона с

криволинейной поверхностью лопатки ГТД и формирования информационного сигнала оптоэлектронного первичного преобразователя (ОЭП), позволяющая определить профиль поверхности лопатки и ее кривизну в произвольной точке пера лопатки.

Материалы и результаты исследования. Развитие предложенного и защищенного патентами способа [13, 14] заключается в том, что классический дискретно-фазовый метод [16] обладает признаком обратимости, т.е. можно зафиксировать контролируемую поверхность в статическом положении, а в движение приводить ОЭП. При своем вращении ОЭП сканирует световым потоком поверхность объекта и одновременно принимает отраженный от контролируемой поверхности световой поток. Максимум отраженного светового потока, преобразованного фотоприемником в электрический сигнал, соответствует моменту времени, когда ось индикатрисы излучения светового потока перпендикулярна исследуемой поверхности. Таким образом, измеряя временной интервал между максимумом информационного сигнала и максимумом опорного импульсного сигнала, соответствующего нулевому углу поворота ОЭП, можно определять угловое положение касательной в конкретной точке на криволинейной поверхности, т.е. оценивать кривизну поверхности.

Основным элементом базовой структурной схемы ОЭДФП является вращающаяся светопроводящая система с оптической насадкой (ОН). Светопроводящая система выполнена на основе разветвленных V -образных световодных структур [17]. ОН позволяет канализировать и направлять поток излучения от передающей части светопроводящей системы на исследуемую поверхность, принимать отраженный от поверхности лопатки поток и с помощью приемной части светопроводящей системы канализировать его к фотоприемнику. Элемент оптической насадки, выполняющий функции излучателя и приемника излучения – приемно-передающий коллектор (ППК). Отраженный от исследуемой поверхности поток излучения содержит в себе информационные компоненты о параметрах геометрии поверхности лопатки. Поэтому важно разработать математическую модель взаимодействия сформированного ОН потока излучения с криволинейной поверхностью лопатки, получить количественные оценки информационного сигнала и после его анализа разработать алгоритм функционирования преобразователя геометрии поверхности лопаток ГТД.

На рисунке 1 в формализованном виде представлен процесс взаимодействия излученного приемно-передающим коллектором ОЭДФП потока с боковой поверхностью P (спинкой) лопатки в терминологических категориях фотометрии и геометрической оптики. Представленная схема позволяет перейти к математическому описанию процесса определения величины информационного потока Φ_{np} , попадающего в фотоприемник после отражения от контролируемой поверхности лопатки, при линейном перемещении оси оптической насадки по линии EL и вращении

OH в плоскости заданного сечения, расположенного параллельно базовой плоскости. Таким образом, в прямоугольной системе координат XYZ в некоторый момент времени ось вращения OH находится в точке L с известными координатами (X_L, Y_L) . ППК OH представлен на рисунке 1 круговой поверхностью F . При работе устройства продольная ось OH образует с горизонталью параллельной оси OX текущий угол γ .

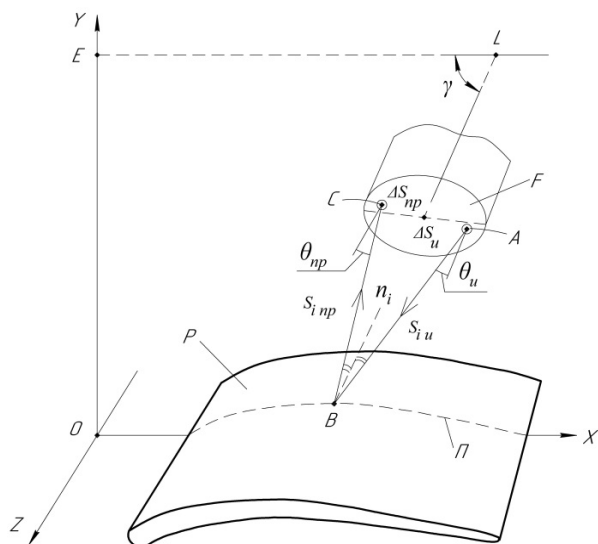


Рисунок 1 – Формализованная схема взаимодействия ППК оптической насадки ОЭДФП с боковой поверхностью пера лопатки

Обозначения, принятые в рассматриваемой системе:

P – профиль лопатки, функциональное задание линии которого известно и определяется как $y_{\Pi} = f(x)$;

n_i – нормаль к поверхности лопатки в точке контроля B ;

S_{iu} – длина пути i -го луча от центра элементарной излучающей площадки ППК F до отражающей точки конкретного профиля Π боковой поверхности P лопатки;

S_{inp} – длина пути i -го луча от отражающей точки конкретного профиля Π боковой поверхности P лопатки до центра элементарной приемной площадки ППК F ;

A и C – центры, соответственно, элементарных излучающих и приемных площадок ППК ΔS_u и ΔS_{np} ;

B – точка отражения излученного луча, принадлежащая линии профиля Π ;

θ_u – угол излучения i -х лучей индикатрисы излучения $J(\theta_u)$;

θ_{np} – угол приёма приёмно-передающим коллектором, отраженных от боковой поверхности лопатки i -х лучей;

r – радиус ППК оптической насадки;

R – радиус вращающейся оптической насадки.

На основании законов фотометрии и геометрической оптики [18, 19] элементарный поток Φ_{inp} , создающий освещенность $E(\theta_{np})$ элементарной площадки ΔS_{np} , определяется выражением: $\Delta \Phi_{inp} = E(\theta_{np}) \Delta S_{np}$. Освещенность $E(\theta_{np})$ площадки, наклоненной под

углом θ_{np} , от отдельного i -го луча индикатрисы излучения: $E(\theta_{np}) = \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos \theta_{np}$, где $s = s_{iu} + s_{inp}$.

Для определения светового потока от каждого луча индикатрисы излучения $J(\theta_u)$, попадающего после отражения на ППК, предлагается воспользоваться моделью, представленной на рисунке 2. В этой модели изображен i -ый излученный S_{iu} и отраженный и, соответственно, принятый S_{inp} лучи, а слева их проекции на плоскость ППК. Такой подход позволяет упростить нахождение требуемых фотометрических характеристик путём последующего перехода к полярным координатам. На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

K_i – след плоскости касательной к боковой поверхности лопатки в точке B для i -го излученного луча;

σ – расстояние от ППК до точки отражения B ;

l_u и l_{np} – длины проекций лучей S_{iu} и S_{inp} на торец ППК;

α и ρ – полярные координаты точки A – центра элементарной излучающей площадки;

φ и l – полярные координаты точки C – центра элементарной приёмной площадки.

β – текущий угол наклона следа плоскости касательной к боковой поверхности лопатки относительно ППК в точке отражения зондирующего луча.

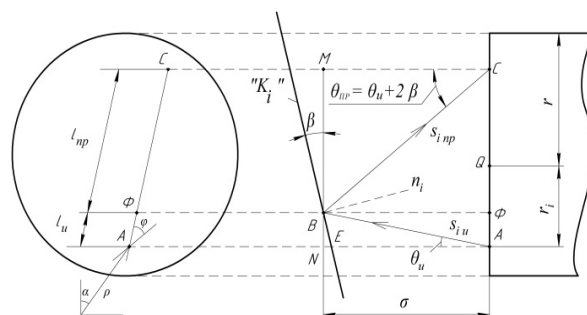


Рисунок 2 – Модель формирования информационного светового потока

При нахождении информационных параметров отраженного от поверхности лопатки и принятого ППК OH светового потока, в соответствии с рисунком 2, можно записать следующие необходимые для расчетов выражения:

$$s_{iu} = \frac{\sigma}{\cos \theta_u}; \quad \theta_{np} = \theta_u + 2\beta; \quad s_{inp} = \frac{\sigma}{\cos \theta_{np}} = \frac{\sigma}{\cos(\theta_u + 2\beta)}$$

и соответственно:

$$s = s_{iu} + s_{inp} = \sigma \left[\frac{1}{\cos \theta_u} + \frac{1}{\cos(\theta_u + 2\beta)} \right];$$

$$l_u + l_{np} = l = \sigma [\operatorname{tg} \theta_u + \operatorname{tg}(\theta_u + 2\beta)].$$

Для полной фотометрической характеристики боковой поверхности пера лопатки необходимо использовать индикатрису рассеяния $T(\theta_{np})$ оптического излучения, отраженного этой поверхностью. В разрабатываемой модели ОЭДФП рассматривается индикатриса рассеяния в плоскости сечения (или профиля) лопатки, при этом предполагается, что кривизна пера лопатки оказывает влияние на макрогеометрию лопат-

ки, а не на геометрию микроповерхности [7]. Поэтому в точке C – центре элементарной приёмной площадки будет зарегистрирован элементарный световой поток от i -го луча индикатрисы $J(\theta_u)$, отраженного в точке B с учетом индикатрисы рассеяния $T(\theta_{np})$:

$$\Delta\Phi_{inp} = \Delta S_{np} T(\theta_{np}) \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos \theta_{np}.$$

Потери при вводе оптического излучения из воздуха на границу стекла $ОН$, классифицируемые как френелевские, составляют примерно (0,15-0,17) дБ, что в процентном выражении составляет (3-4)%, поэтому

Далее, выражая в общем случае $l dl$ с учетом обозначений, приведенных на рисунке 2, можно записать:

$$l dl = \sigma \left[\operatorname{tg} \theta_u + \operatorname{tg}(\theta_u + 2\beta) \right] \left\{ \frac{d\sigma}{d\theta_u} \left[\operatorname{tg} \theta_u + \operatorname{tg}(\theta_u + 2\beta) \right] + \sigma \left[\frac{1}{\cos^2 \theta_u} + \frac{1 + 2 \left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta_u} \right)}{\cos^2(\theta_u + 2\beta)} \right] \right\} d\theta_u = \eta(\sigma, \theta_u) d\theta_u.$$

В результате полный световой поток, принятый ППК оптической насадки от одной элементарной излучающей площадки dS_u с учетом всех лучей индикатрисы излучения $J(\theta_u)$ и с учетом индикатрисы $T(\theta_{np})$ рассеяния, определится выражением:

$$\Delta\Phi_{np} = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\varphi \int_{\theta_{u \min}(\varphi)}^{\theta_{u \max}(\varphi)} T(\theta_u + 2\beta) \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos(\theta_u + 2\beta) \eta(\sigma, \theta_u) d\theta_u.$$

Дальнейшее суммирование по всем элементарным излучающим площадкам ППК даст искомый световой поток, попадающий в конечном итоге, на фотоприемник:

$\Phi_{np} = \eta \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} d\alpha \int_{\rho_{\min}(\alpha)}^{\rho_{\max}(\alpha)} \Delta\Phi_{np} \rho d\rho$, где $\eta = \frac{\Delta S_u}{\pi r^2}$ учитывает количество элементарных излучающих площадок, соотнесенных с общей площадью ППК, при равномерном его разбиении на элементарные площадки.

Если в качестве фотоприемника используются полупроводниковые структуры, обладающие внутренним фотоэффектом, то генерируемый фототок прямо пропорционален интенсивности освещения. В частности для современных фотодиодных структур [21] фототок в мкА: $I_{\phi} \approx 10^6 \Phi_{np}$.

Разработанная математическая модель формирования информационного светового потока оптоэлектронного дискретно-фазового преобразователя геометрии поверхности лопаток газотурбинного двигателя, реализована далее в алгоритме численного интегрирования для вычисления потока, попадающего на фотоприемник.

Алгоритм реализован в виде программы математического моделирования в пакете *MATLAB*. В программе учтены исходные данные и граничные условия, используемые в рассматриваемой модели. В итоге, после каждого полного цикла расчетов для текущего значения координаты оси вращающейся $ОН$ (X_L , Y_L) и на каждом угле поворота γ $ОН$ на печать выводятся следующие данные: координаты отражающей точки (X_B , Y_B), т.е. значение профиля Y_B боковой поверхности лопатки в точке X_B , текущий угол γ и сформированный световой поток $\Phi_{np}(\gamma)$. Графический вид формы нормированных сигналов фотоприемника приведен

этими потерями в первом приближении можно пренебречь [20]. Учитывая, что площадь элементарной (бесконечно малой) приемной площадки в полярных координатах: $\Delta S_{np} \approx dS_{np} = l dl d\varphi$, то суммарный световой поток всех лучей, излученных одной элементарной излучающей площадкой, и принятый всеми элементарными приемными площадками ППК в общем случае можно записать в виде:

$$\Delta\Phi_{np} = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\varphi \int_{l_u(\varphi)}^{l_{np}(\varphi)} T(\theta_{np}) \frac{J(\theta_u)}{s^2} \cos \theta_{np} l dl.$$

на рисунке 3, где показано угловое положение максимума импульса в трех точках профиля поверхности лопатки с различной кривизной: левый график – с отрицательной, средний – с нулевой и правый график – с положительной.

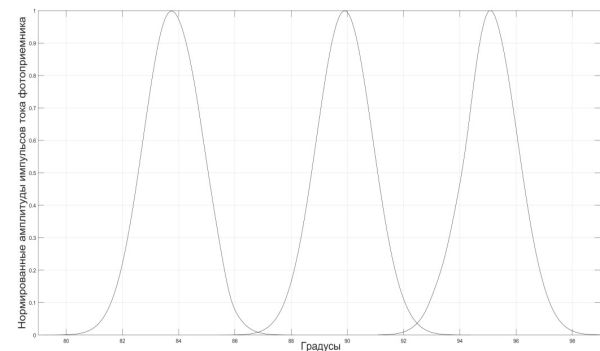


Рисунок 3 – Расчетная форма сигнала фотоприемника, полученная при отражении зондирующего светового потока в трех точках профиля лопатки с различной кривизной боковой поверхности

Закключение. Анализируя результаты расчетов, выполненных на основании полученных аналитических выражений, можно сделать следующие выводы:

1. Математическая модель адекватно, не нарушая положений геометрической оптики и фотометрии, описывает формирование выходного сигнала ОЭДФП геометрии поверхности лопаток ГТД и позволяет количественно оценить влияние сопутствующих факторов на формирование информационного сигнала.

2. Выходной сигнал фотоприемника имеет колоколообразную форму.

3. Положение максимума выходного импульса фотоприемника определяется кривизной отражающей боковой поверхности лопатки и соответствует углово-

му положению ОН, когда ее ось перпендикулярна плоскости касательной к точке отражения зондирующего луча на поверхности лопатки.

4. Амплитуда выходного сигнала уменьшается при увеличении установочных расстояний между осью оптической насадки и базовой опорной плоскостью.

5. Амплитуда выходного сигнала фотоприемника увеличивается при увеличении диаметра ППК ОН.

6. В зависимости от кривизны отражающей поверхности наблюдается искажение симметрии импульса фотоприемника, выражающееся в различной крутизне и длительности фронтов выходного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 36 с.
2. ГОСТ 23557-79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 30 с.
3. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник для студентов специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки». Серия «Газотурбинные двигатели» [Текст] / М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. М.: Машиностроение, 2007. 396 с.
4. Крымов В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К. И. Зудин. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.
5. Ионов А.В. Создание на основе CALS-технологий универсальной автоматизированной системы управления технологической подготовкой производства лопаток компрессора ГТД: дис. ... канд. техн. наук. М: МАИ, 2014. 126 с.
6. Кеткович А.А., Яковлева Н.И. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 // Контроль. Диагностика № 3, 2007. М., Машиностроение. с. 32–34.
7. Чичигин Б.А. Разработка методов и средств лазерного контроля геометрии лопаток газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: М:МЭИ, 2007. – 147 с.
8. Яковлев М.Г. Современные проблемы автоматизации обработки пера лопаток авиационных двигателей / М.Г. Яковлев, М.В. Жуплов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – №1. – с. 132–138.
9. Дёмкин В.Н. Лазерные методы и средства измерения геометрии поверхностей сложной формы : диссертация ... доктора технических наук : 05.11.07. – Москва, 2004. – 247 с. : ил.
10. Вайнберг Э.И. Компьютерные томографы для неразрушающего контроля и количественной диагностики изделий аэрокосмической промышленности / Э.И. Вайнберг и др. – М.: Двигатель, 2008. №2 (56), С. 19–23.
11. Гузевич С. Н. О стереоскопическом методе измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 543–549.
12. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2003. -784с.
13. Патент на изобретение 2548939 Российская Федерация, МПК G01B 21/22. Способ определения угловых положений поверхности объекта и устройство для его осуществления. Данилин А.И., Данилин С.А., заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Заявл. 1.07.2013, опубл. 20.04.2015, бюл. №11.
14. Патент на изобретение 2555505 Российская Федерация, МПК G01B 11/26. Устройство определения угловых положений поверхности объекта. Данилин А.И., Данилин С.А., заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Заявл. 04.07.2012, опубл. 10.07.2015, бюл. №19.
15. Данилин С.А. Чернявский А.Ж. Волоконно-оптический преобразователь с увеличенным динамическим диапазоном измерения для мониторинга изменений профиля поверхности изделий машиностроения // Известия Самар. науч. центра РАН, 2016. том 18. – № 4–1. – С. 166–169.
16. Данилин А.И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2008. 218 с.
17. Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
18. Гуревич М.М. Фотометрия: теория, методы и приборы/М.М.Гуревич – Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
19. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для студентов вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 1999. – 480 с.: ил.
20. Воронин В.Г. Интегральные потери в элементах волочно-оптических линий связи./ В.Г. Воронин, О.Е.Наний, А.Н. Туркин, В.И. – М.: 2012. – 51 с.: ил.
21. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – Томск: НТЛ, 2000. – 426 с

Статья поступила в редакцию 13.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021