

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

ГЕО-СИБИРЬ-2008

Т. 4

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ, ТЕПЛОФИЗИКА, МИКРОТЕХНИКА

Ч. 1

Сборник материалов
IV Международного научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2008

УДК 681.2:006:
С 26

Ответственные за выпуск:
координаторы направления
«Специализированное приборостроение, метрология,
теплофизика, микротехника»

Кандидат технических наук, профессор, директор
Института оптики и оптических технологий СГГА, г. Новосибирск
О.К. Ушаков

Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией лазерных
информационных систем Института лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск
Б.В. Поллер

Доктор технических наук, зав. кафедрой метрологии, стандартизации
и сертификации СГГА, г. Новосибирск
В.Я. Черепанов

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики СГГА, г.
Новосибирск
В.В. Чесноков

С 26 ГЕО-Сибирь-2008. Т. 4. Специализированное приборостроение,
метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 1 : сб. матер. IV Междунар. научн.
конгресса «ГЕО-Сибирь-2008», 22–24 апреля 2008 г., Новосибирск. –
Новосибирск : СГГА, 2008. – 187 с.

ISBN 978-5-87693-279-2 (т. 4, ч. 1)
ISBN 978-5-87693-271-6

В сборнике опубликованы материалы IV Международного научного
конгресса «ГЕО-Сибирь-2008» направления «Специализированное
приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА
Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 681.2:006:

ISBN 978-5-87693-279-2 (т. 4, ч. 1)
ISBN 978-5-87693-271-6

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Eugen Anurjew, Juergen J. Brandner, Edgar Hansjosten, Ulrich Schygulla, Thomas Stief, Klaus Schubert. Development of a sensor for gas flow residence time distribution measurement through microstructure devices...	7
Тиссен В.М. Неравномерности вращения Земли, проблемы и достижения в их прогнозировании	20
Толстиков А.С., Нетесаная О.В. Проблемы метрологического обеспечения беззапросных траекторных измерений по КА ГЛОНАСС.....	26
Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Рентгеновские объемные голограммные элементы.....	31
Шлишевский Б.Э., Соснов А.Н. Гибкая автоматизация – механической обработки в оптико-механическом приборостроении, цели и методы реализации. Терминология.....	43
Абель О.Я., Петров П.И. Отражательный интерферометр с инвертированным распределением интенсивностей.....	52
Абель О.Я., Петров П.И. Высокоточные интерференционные измерения формы поверхности оптических деталей	57
Куриленко Г.А., Устюгов М.Б. Прогнозирование циклического ресурса деталей приборов	59
Канушина Л.А., Соснов А.Н. Исследование механизма разрушения поверхностного слоя оптических деталей при шлифовании	64
Комбаров М.С., Кузнецов М.М., Маращ А.А. Программа utco209c для УЦО серии 209	68
Кузнецов М.М. Исследование фазовой неоднородности объектов на оптических интерферометрах	73
Кузнецов М.М., Маращ А.А. Система менеджмента качества на ФГУП «ПО «Новосибирский приборостроительный завод»	76
Ларина Т.В. Износостойкие деформируемые порошковые белые чугуны .	79
Хатюшин С.В. Разработка методики поверки установки, предназначенной для поверки и калибровки люксметров, яркометров и измерения относительной спектральной чувствительности приемников излучения	84
Неронов В.А., Ларина Т.В., Соснов А.Н. Снова о диаграмме состояния системы бор - алюминий	91
Родионов А.И., Юрьев Г.С. Прецизионные технологические виброзащитные платформы для оптического и оптико-электронного приборостроения.....	95
Соснов А.Н., Соснова Н.К., Критинина С.В. Оптические методы контроля ошибок изготовления точных цилиндрических линз.....	100
Шлишевский Б.Э., Кутенкова Е.Ю. Повышение эффективности многоцелевых станков с УЧПУ – системный подход. Подсистема ПТМ (прогрессивные технологические процессы и методы).....	106
Егоренко М.П. К вопросу компенсации хроматизма зеркал манжета в нескольких диапазонах спектра.....	112

Тымкул В.М., Фесько Ю.А. Методика расчета температурной чувствительности пирометра двойного отношения	117
Тымкул В.М., Шелковой Д.С. Теория и математическая модель трехспектрального оптического пирометра	120
Алдохин П.А., Журавлев П.В., Рафаилович А.С., Турбин А.В., Чурилов С.М., Шлишевский В.Б. Малогабаритный высокочувствительный телевизионный модуль для ультрафиолетовой области спектра	124
Ефремов В.С. Многоспектральный объектив	129
Коронин Ю.Н., Малинин В.В., Попов Г.Н. История создания и унификации стрелковых прицелов ночного видения на примере изделий ЦКБ «Точприбор»	134
Шлишевский В.Б., Соснов А.Н., Марах А.А. Комплексная автоматизация механического производства на базе многоцелевых станков с цифровым управлением. системный подход	141
Кошелев А.В., Дмитриев А.К., Миценко И.Д., Синякин А.К. Абсолютный интерферометр с использованием фемтосекундного дальномера-рефрактометра	149
Кошелев А.В., Миценко И.Д., Синякин А.К., Матуско В.Н. Трехволновый абсолютный интерферометр	153
Шойдин С.А., Кондаков В.Ю. Голографическое устройство для адресной рекламы	155
Синицын Ю.А., Малинин В.В., Попов Г.Н. История создания приборов ночного видения (наблюдения) на примере изделий ЦКБ «Точприбор»	158
Южик И.Б., Малинин В.В., Попов Г.Н. Приборы для обнаружения и подавления оптических и оптико-электронных средств	162
Рахимов Н.Р., Серьезнов А.Н., Рахимов Б.Н. Оптоэлектронная система для контроля состояния композитных конструкций летательных аппаратов	167
Рахимов Н.Р., Лохов А.А. Многофункциональные оптоэлектронные системы экспресс-анализа нефтесодержащих сред	172
Тымкул Л.В., Валиахметов И.Р. Компьютерное моделирование работы приборов ночного видения в поляризованном и неполяризованном свете	176
Ушаков О.К., Рахимов Н.Р., Петров П.В. Разработка оптоэлектронных контрольно-измерительных систем на основе эффекта нарушенного полного внутреннего отражения	180
Шлишевский В.Б. Работы кафедры оптических приборов СГГА в области растровой спектроскопии	185
Попов Г.Н. Систематизация оптико-электронных приборов прицеливания, наведения, разведки и наблюдения для сухопутных войск РФ (на примере изделий ЦКБ «Точприбор»)	192

CONTENTS

Eugen Anurjew, Juergen J. Brandner, Edgar Hansjosten, Ulrich Schygulla, Thomas Stief, Klaus Schubert. Development of a sensor for gas flow residence time distribution measurement through microstructure devices...	7
Tissen V.M. Non-uniformity of the Earth rotation problems and achievements in its prediction.....	20
Tolstikov A.S., Netesanaya O.V. The objectives of metrological supplies of requestless SC GLONASS trajectory measurements	26
Batomunkuev Yu.Ts., Mescheryakov N.A. The x-ray volume holographic elements.....	31
Shlishevsky B.E., Sosnov A.N. Flexible automation of machining in opto- mechanical instrument-making, goals and methods. Terminology	43
Abel O., Petrov P.I. A reflective interferometer having an inverted distribution of intensities.....	52
Abel O., Petrov P.I. High-precision interferential measurements of surface shape of optical parts.....	57
Kurilenko G.A., Ustyugov M.B. Prediction of devices-parts cyclic life	59
Kanushina L.A., Sosnov A.N. Investigation of fracture mechanism of optical details surface layer in grindin	64
Kombarov M.S., Kuznetsov M.M., Maratch A.A. Programme utco209c for UTCO (unified digital measuring indicator) serie 209	68
Kuznetsov M.M. Investigation of objects phase discontinuity in optical interferometers	73
Kuznetsov M.M., Maritch A.A. System of quality management at Novosibirsk instrument-making plant	76
Larina T.V. Wearproof wrought powder white cast-irons	79
Khatyushin S.V. Development of testing methods for the installation aimed at inspection and calibration of luxmeters, brightness meters and measurement of radiation detectors relative spectral sensitivity	84
Neronov V.A., Larina T.V., Sosnov A.V. Again on boron-aluminium system state diagram.....	91
Rodionov A.I., Yuriev G.S. The precition technological vibration protection platforms for optical and optic-electronic divice building.....	95
Sosnov A.N., Sosnova N.K., Kritinina S.V. Optical methods for control of errors of producing of precise cylindrical lenses	100
Shlishevsky B.E., Kutenkova Ye.Yu. Increase in efficiency of multi-purpose CNC machine-tools – systems approach. subsystem of progressive technological proccesses and methods.....	106
Egorenko M.P. To a question of compensation of chromatism of mirrors manzen in several bands of a spectrum	112
Tymkul L.V., Fesko Yu.A. Technique calculation temperature sensitivity of the pyrometer double spectral attitude	117
Tymkul V.M., Shelkovoy D.S. The theory and mathematical model of the three- spectral optical pyrometer	120

Aldokhin P.A., Zhuravlev P.V., Rafailovitch A.S., Turbin A.V., Churilov S.M., Shlishevsky V.B. Compact high-sensitivity ultraviolet television module	124
Efremov V.S. Multispectral objective	129
Koronin Yu.N., Malinin V.V., Popov G.N. History of creation and unification of the shooting night vision sights by the example of the central Design Department Bureau «Tochpribor» products.....	134
Shlishevsky B.E., Sosnov A.N., Maratch A.A. Complex automation of mechanical production on the basis of multipurpose CNC machine-tools. Systems approach.....	141
Koshelev A.V., Dmitriyev A.K., Mitsenko I.D., Sinyakin A.K. Use of absolute interferometer with phemtosecond range-finder refractometer	149
Koshelev A.V., Mitsenko I.D., Sinyakin A.K., Matusko V.N. Three-wave absolute interferometer.....	153
Sinitsyn Yu.A., Malinin V.V., Popov G.N. History of the night vision (supervision) devices creation by example of the Central Design Bureau «Tochpribor» products	158
Yuzhyk I.B., Malinin V.V., Popov G.N. Devices for detection and suppression of the optical and electro-optical means.....	162
Rakhimov N.R., Seryoznov A.N., Rakhimov B.N. Optoelectronic system for monitoring for composite construction the states of flying vehicles.....	167
Rakhimov N.R., Lokhov A.A. Multifunctional optoelektronic systems for express-analysis of oily contain medium.....	172
Tymkul L.V., Valiakhmetov I.R. Computer simulation of night-vision devices operation in polarized and non-polarized light	176
Ushakov O.K., Rakhimov N.R., Petrov P.V. Development of optoelectronic measure control system of outward total inside reflection effect on their basis	180
Shlishevsky V.B. Scanning spectroscopy developments of the instrument-making department (SSGA).....	185
Popov G.N. Ordering of the aiming, prompting, investigation and supervision electro-optical devices for the land forces of RF (by example of the Central Design Bureau «Tochpribor» products).....	192

УДК 681.7

EugenAnurjew¹, JuergenJ. Brandner¹, EdgarHansjosten¹, UlrichSchygulla¹, ThomasStief², KlausSchubert¹

¹Forschungszentrum Karlsruhe, Institute for Micro Process Engineering (IMVT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

²DECHEMA e.V., Karl-Winnacker-Institut, Theodor-Heuss-Allee 25, D-60486 Frankfurt am Main, Germany

DEVELOPMENT OF A SENSOR FOR GAS FLOW RESIDENCE TIME DISTRIBUTION MEASUREMENT THROUGH MICROSTRUCTURE DEVICES

Abstract

In the recent years a variety of microstructure devices has been developed for numerous tasks in process engineering. Micro reactors, micro mixers, micro heat exchangers and others are more or less common now in science and are gaining more and more importance in special parts of the industry. These components provide specific advantages for heat transfer and mass transfer, mainly due to the increase of the surface-to-volume ratio. The residence time reached with microstructure devices is normally in the range of milliseconds to seconds, depending on the mass flow applied and the design of the microstructures, respectively. For a complete characterization of the devices the residence time distribution is mandatory. Moreover, to allow a more precise pre-calculation, modelling or simulation of the thermal behaviour and the mass flow distribution it is necessary to know the residence time distribution as good as possible. Nevertheless, it is not easy to obtain sufficient residence time distribution information for gas flows through microstructures, which is an unsatisfactory situation.

Therefore, a sensor system was developed and tested. The design of the sensor system as well as the experimental setup and the measurement method will be described briefly in this publication. Results of first measurements will be shown. These experiments have been performed with microstructure devices made by micro-stereo lithography. A relatively large dispersion within the microstructures was found, which could be a result of a flow maldistribution through the microstructure channels.

Keywords: Microstructure device, micro machining, residence time, sensor, gas flow

Summary

New opportunities for process routes in chemical and pharmaceutical industry have been opened by the ongoing miniaturization. Microstructure devices and their great enhancement in heat and mass transfer allow a control of process parameters which was never before reached. On the other hand, the thermal and fluidic behaviour of those tiny devices has to be very well known, which leads to some basic device parameters to be well defined.

One of these parameters is the residence time distribution, especially for gas flows. Conventional measurement methods may be applied to a certain point only, since the residence time in microstructure devices is in the order of seconds or below. Thus, small integrated sensors seem to be necessary, providing measurement delay times in the range of milliseconds.

A new residence time distribution sensor based on the measurement of thermal conductivity changes was developed and tested with a special microstructure device. The device and the sensor were manufactured from a polymer by micro stereo lithography. The measurement was taken with a simple Wheatstone arrangement to monitor the change of electrical resistance of a Pt-Ir-wire placed on the sensor frame. With this system, it was possible for the first time to measure the residence time distribution of a microstructure reactor device online. A Bodenstein number was calculated from the results, showing that the dispersion of the system is high, and therefore the residence time distribution is rather broad. A high mixing and large dispersion is to be seen. This could be due to some flow maldistribution which leads to higher effective dispersion.

Introduction

Microstructure devices and technology have gained interest in many technological areas within the last 20 years. This is due to the specific properties of microstructure devices. Miniaturization leads to a reduction of the volume by a power of three, while the surface area is reduced by a power of two only. Thus, the surface-to-volume ratio is increased tremendously by reducing the size of devices, leading to values of $30.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ and more, as it is reported by Brandner et al. (2006). Aside of this, the small microstructure dimensions in the range of some ten to some hundred micrometers are in the same range than the diffusion length of gases under common process parameters. This means, diffusion, mixing and, therefore, chemical reaction takes place in extremely short times. On the other hand, due to the very short distances and the high surface-to-volume ratio, heat generated by reaction processes or needed to run those can be transferred in a very easy and efficient way. Micro heat exchangers, micro mixers and micro reactors well described by different authors in literature are good examples for this behaviour. Details can be found by, e.g., Hessel et al. (2005) or Kockmann et al (2006).

To run chemical or pharmaceutical processes in microstructure devices it is necessary to control the process parameters as good as possible. As mentioned before, heat transfer and diffusion respectively mixing is not a problem that much. But due to the parallelization of microstructures into multi-channel devices, it is not quite clear whether an equal flow distribution of the fluid, especially gases, is reached or not. To clear this, it is of advantage to measure the residence time distribution (RTD) of a microstructure device. Microstructure systems are assumed to have a well defined narrow residence time distribution as a result of the defined and small dimensions of the channels. Thus the progress of the individual steps in complex reactions with consecutive and parallel steps could possibly be efficiently controlled and the conversion and selectivity could be improved.

In addition, knowledge of the RTD is necessary for the simulation of the reactor behaviour by means of dispersion, cell or other substitute models. In these cases the fluid dynamics of the reactor is integrated into the model by model parameters (effective dispersion coefficient, cell number) derived from the RTD, as it is described by Baerns et al (1999). Knowledge of the RTD is therefore important for the mathematical modelling and for performance studies of the reactor.

However, to date no sensor system has been available to measure the RTD of the catalytically active parts of microstructured reactors for gas flow with sufficient accuracy. Such a sensor system has to fulfil two main requirements: firstly, the sensor system must be small enough to be integrated into the reactor system and secondly, it must be fast enough (time constants in the region of milliseconds).

The integration is necessary because the RTD effects of the microstructured system are small compared with the RTD effects of capillaries to external sensors. In the case of conducts to external sensors it is not possible to measure the RTD effects of the reactor sufficiently precisely (see Wolf, Richter).

The mean residence time of molecules in the microstructured reactor is in the range of seconds. The sensor has to be at least one order of magnitude faster, thus the time constant of the sensors has to be in the range of milliseconds.

Principle of RTD measurement

For the experimental determination of the RTD, a detectable property of the gas flow into the reactor is changed corresponding to a defined function of time; ideally this would be directly at the reactor entrance. The function of time of this property is detected at the outlet of the reactor. This function is the basis for the determination of the RTD or the residence time sum function: the fluid elements entering the reactor are marked and their fate in the fluid system is monitored (see Baerns et al (1999)).

Electrical conductivity, light absorption and radioactivity are generally used as detectable properties in liquid-phase systems but are not usable in gas-phase systems (except radioactivity). For gas-phase systems, preferably the thermal conductivity is used.

The fluid elements that enter the flow system are frequently marked by an impulse or a step function. As response to an ideal impulse the RTD can be measured at the reactor outlet; as a response to an ideal step function the residence time sum function can be measured at the outlet. However, in real experiments it has to be noted that real test functions can only have approximate step or impulse function shapes. In addition RTD effects already occur between the place where the functions are generated and the entrance to the fluid system. In this case the course of the real test function at the reactor entrance must be measured and taken into account when determining the RTD of the fluid system.

Nevertheless, a sensor measuring the change in thermal conductivity has to be thermally inert as well as electrically isolated. This is due to the fact that the sensor used is nothing else but a thermal conductivity detector (TCD). In general, this is a combination of electrically heated wires placed into the entrance and the outlet of the fluidic system. Thus, those wires must not come into contact with metal

microstructure devices to avoid an electrical breakdown. Devices made of insulating material like ceramic or polymers are needed.

Manufacturing of Microstructure Devices

Most multi-channel microstructure devices are made of metals like stainless steel, hastelloy or other alloys. We will not go into details about manufacturing processes, those can be found in, e.g., Kockmann et al (2006).

For a first microstructure to be characterized for the RTD, it is, aside of the needs for electrical insulation described before, advantageous to use a manufacturing method which allows fast changes of the shape and the design of the microstructure device as well as of the sensor system. Thus, a rapid prototyping manufacturing method was applied to generate not only the device but also the sensor system. Here, we use the process of micro stereo lithography in polymers.

Micro stereo lithography is an additive process to generate three dimensional polymer microstructures. In figure 1 (left), the process is schematically shown.

To generate a polymer microstructure device, a three dimensional CAD model is used. The data are transferred to a computer controlling the position of a laser focus spot right on or above a model building platform. The model is then built within a liquid monomer substrate on the building platform which can be moved vertically, following the lines of the three dimensional CAD model. The platform is lowered for the distance of a layer thickness. Liquid monomer is flooding the building platform, and the focused laser exposure for the next layer starts. With the exposure, the plastic is polymerized, and the next layer is generated. Details can be found in Kockmann et al (2006), Gebhardt (1996) or Ikuta et al (1994). With the stereo lithography process, a wall thickness of about 100 μm is feasible. Smaller designs are possible, the question here is the applicability of those to (industrial) processes. In figure 1 (right), a CAD model of a crossflow microstructure heat exchanger and the device realized with stereo lithography is shown.

Using this technology, manufacturing many different types of micro structure devices is possible. The devices can be used either as simple models to gain information about the geometrical and technological data of certain design rules, or to run in specific applications like heat transfer or mixing. In figure 2, a countercurrent flow microstructure heat exchanger made by micro stereo lithography is shown. Figure 3 shows an example for an electrically heated device used as demonstrator for a colour-change reaction driven by temperature.

RTD measurement of gas flow through microstructured systems

Sensor

As mentioned before, the requirements of the sensor system can be fulfilled with a TCD. A TCD is in principle an electrically heated wire. This wire is located directly into the test fluid - in this case directly in front of and behind the channels of the microstructure device.

The heat transfer between the wire and the surrounding medium depends on the thermal conductivity of the medium. When it is changed the transferred heat and consequently the temperature and the electrical resistance of the wire will change.

Therefore the measurement of the thermal conductivity can be attributed to the determination of the electrical resistance of the wire.

The idea now was to generate a multi-channel polymer microstructure device and a hot wire sensor frame placed as close as possible to the inlet and the outlet of the flow system to measure the change of the wire resistance. In figure 4 and 5, the specific design of the sensor frame is shown as 3D CAD drawing. Figure 6 shows a first sample of the hot wire residence time sensor frame.

The sensor consists of a meandric arrangement of the wire on a plastic frame. The frame dimensions are $14 \times 14 \times 2 \text{ mm}^3$. The wire is mounted onto the frame by hand. The combined sensor can be seen in figure 6. After attaching the wire, the frame is installed in the microstructure reactor with the wire aligned directly in front of and behind the micro channels.

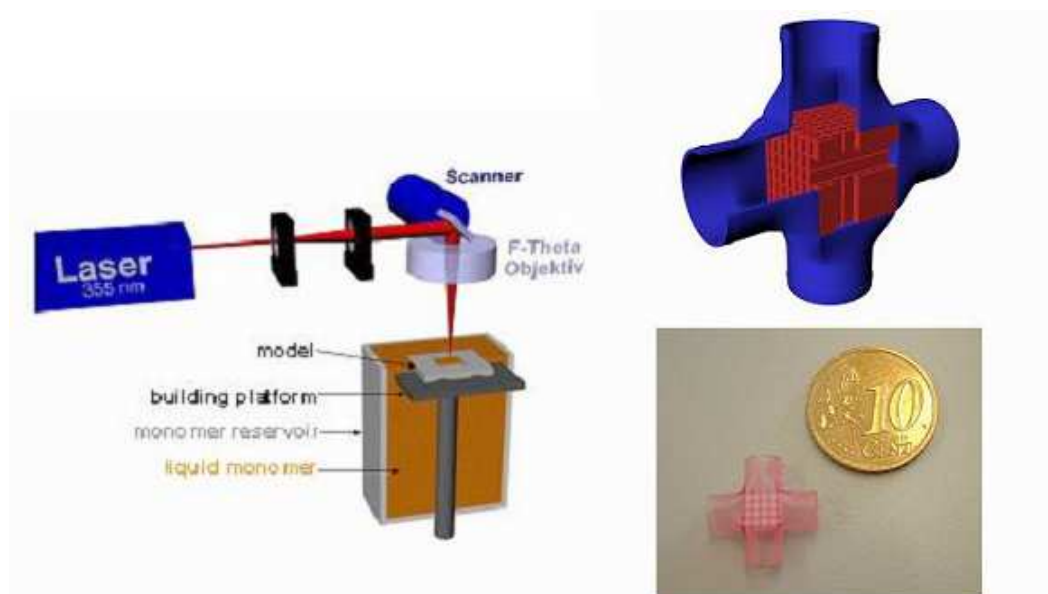


Fig.1. Micro stereo lithography process. The left scheme shows how a polymer device can be manufactured by using micro stereo lithography. On the right top, a three dimensional CAD model is shown, used as pre-process data for the generation of a polymer crossflow microstructure heat exchanger device shown (right bottom). The lines from the CAD model have been followed by the laser focus spot to polymerise the plastic monomer and therefore generate the walls of the device



Fig. 2: polymer counterflow microstructure heat exchanger made by micro stereo lithography Devices like this one are relatively easy to manufacture and useful either for fast experimental analysis of special design variations or for visualization of device design

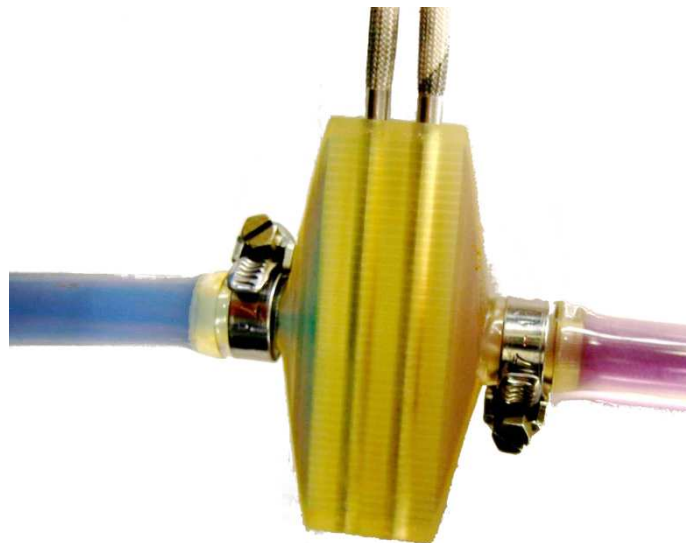


Fig. 3: Electrically heated polymer microstructure heat exchanger made by micro stereo lithography. Here, a cobaltchloride-isopropanol-water solution is ducted through the device and heated. By increasing the temperature above 48°C , the colour of the solution is reversibly changed

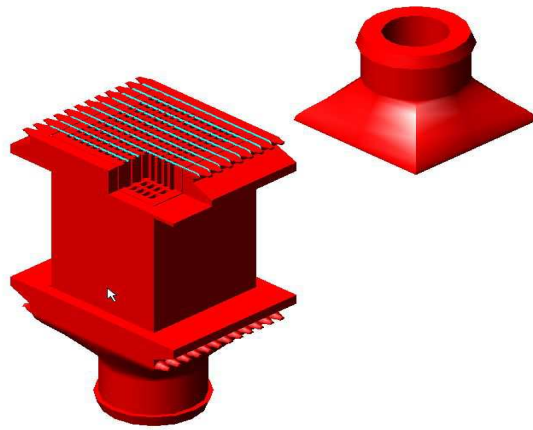


Fig. 4: 3D – sketch of the multi channel microstructure device and the hot wire sensor frame at the inlet (bottom) and the outlet

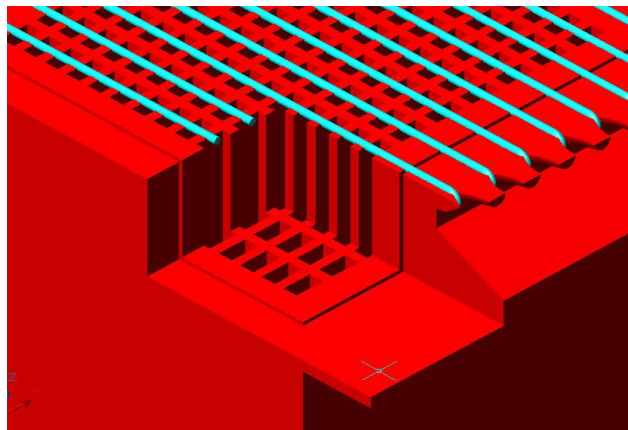


Fig. 5: Detail of the hot wire arrangement on the sensor frame

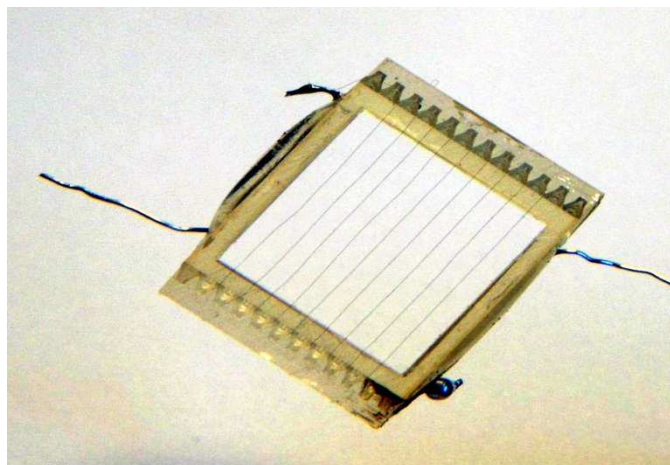


Fig. 6: Sample frame of the hot wire residence time sensor. The very thin wire stretched from one side to the other is well to see

The wire temperature chosen for the measurements was relatively low (approx. 40 K above the inlet temperature of the gases and also the temperature at which the sensor was assembled). Under these circumstances it can be assumed that the gas parameters only change to a small degree and these can be neglected. On the other hand, the wires themselves are also affected by the higher temperature - they will expand slightly. But with an thermal expansion coefficient of $8,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ the expansion is in the area of $3,5 \mu\text{m}$ and can be neglected.

Besides the material parameters of the wire, the time constant of the sensor depends on the diameter of the wire. Experiments showed that a platinum-iridium wire of $12 \mu\text{m}$ in diameter has a time constant in nitrogen of approximately 10 ms. In these preparing measurements, the electrical current through the wire was changed corresponding to a rectangular function; consequently the released heat and also the temperature changed and the change in the electrical resistance of the wire was measured using a Wheatstone bridge. The time constant can be taken from figure 7, which also shows the time constant in helium of approx. 4 ms. The determined time constant is short enough to measure the RTD.

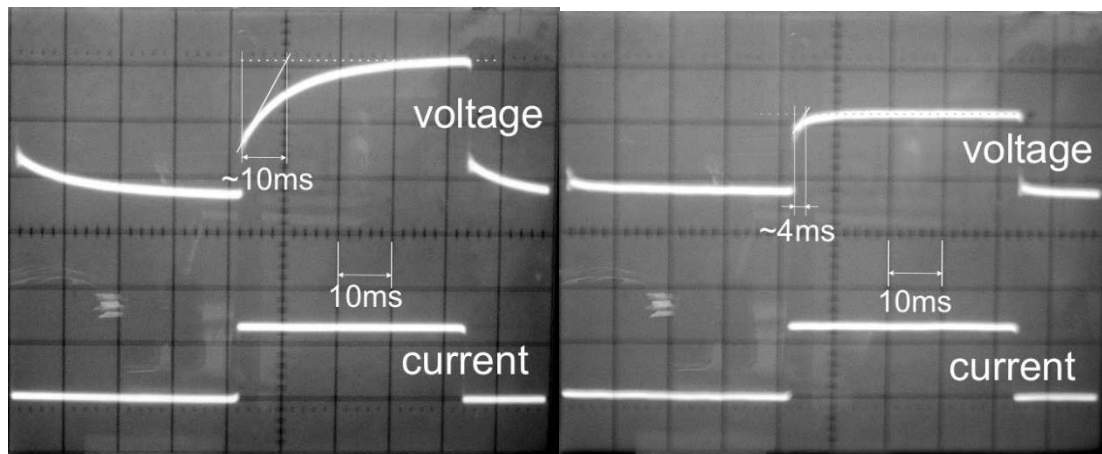


Fig. 7: Measurement of the time constant of the sensor system in nitrogen (left) and helium (right)

The micro channel reactor for the first, orienting experimental work provides 9 layers with 14 micro channels each. The dimensions of the micro channel cross-section are $400 \times 800 \mu\text{m}^2$ providing a length of 10mm. The connectors for the fluids are attached to the sensor frame. The gas is led to the reactor by a diffusor system providing an opening angle of 5° , resulting in a length of 39mm. The complete system shown in figure 8 is glued together.

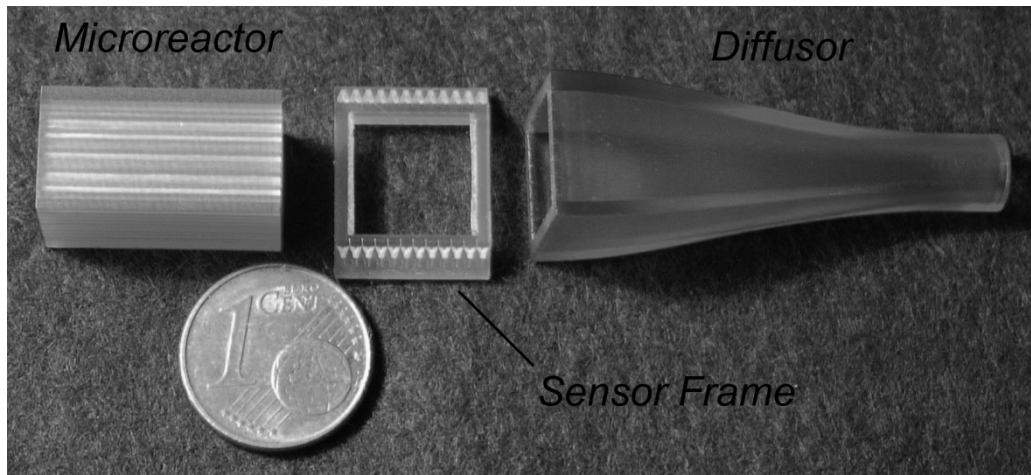


Fig. 8: Components of the RTD measurement system. From the right to the left: Diffusor system for the gas inlet, hot wire sensor frame (not wired yet), micro channel reactor

The electrical resistance of the sensor wire is measured by means of a Wheatstone bridge and amplified with an adjustable amplifier (offset and amplification). The sensor signals are recorded using a computer which also controls the experimental course and set-up (offset and amplification of the amplifier, setpoint of the MFCs and the magnetic valves (see next section)).

With this set-up the integral RTD of the whole reactor is measured, not merely the RTD for one channel. Under these circumstances inequalities between the channels will influence the measurements.

Experimental Set-up

The use of the TCD as sensor requires the change of the thermal conductivity of the flowing medium. Therefore a marker (tracer) was used which has a significantly different thermal conductivity than the carrier used - helium as the tracer and nitrogen as the carrier ($\lambda_{\text{He}}^{25^\circ\text{C}} = 0.154 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $\lambda_{\text{N}_2}^{25^\circ\text{C}} = 0.026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

The step function was used as the test function. The RTD can be calculated from the step response by differentiating. The step (concentration step of helium in nitrogen) was realized by a combination of mass flow controllers (MFC) and magnetic valves. The experimental set-up was realized at the Karl-Winnacker-Institute of the DECHEMA. A principle sketch of the experimental set-up is shown in Fig. 9.

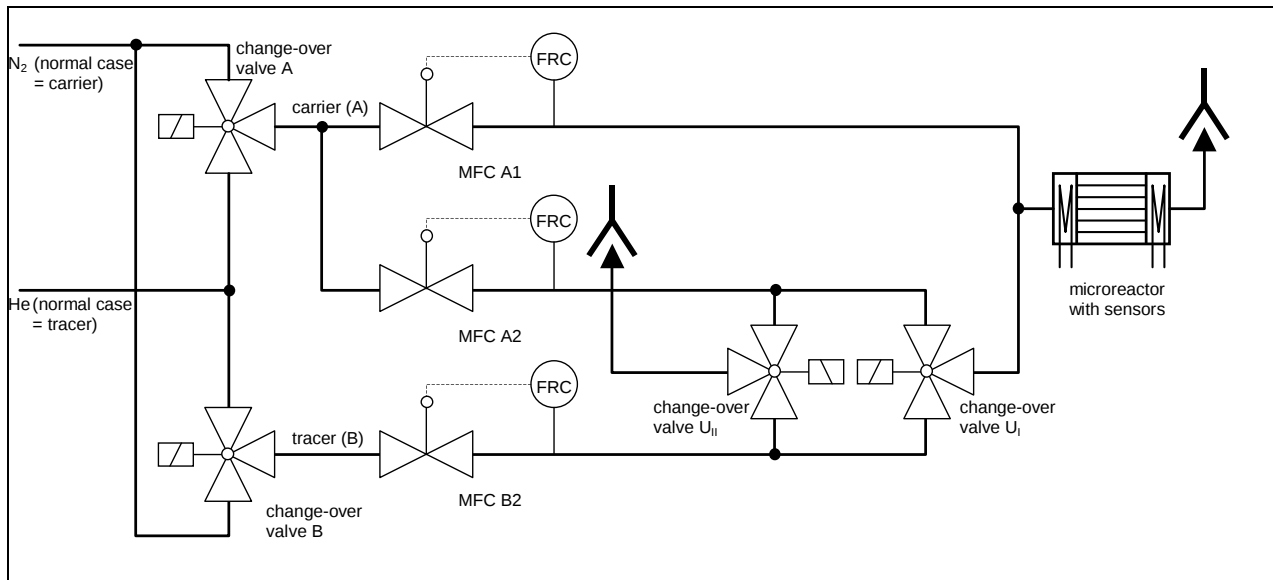


Fig. 9: Experimental set-up used for measurement of the residence time distribution of a polymer multi micro channel reactor

The mass flow controllers were used to create constant flows for the tracer (MFC B2) and the carrier (MFC A1 and A2). Like all controllers, mass flow controllers need some time to establish new constant flow values. As this time is far too long to carry out a step function successfully a magnetic valve was used additionally. When the valve was switched between the constant carrier flow through MFC A2 and the tracer flow through MFC B2 in a sufficiently short time (< 10 ms, see Bürkert), a step function is realized. With this construction only steps between 0 and 100% tracer concentration can be obtained. To obtain smaller steps a bypass for the carrier is achieved by MFC A1.

First Results

Figure 10 shows the course of the sensor signal as a function of time at the inlet and the outlet of the microstructure. The conditions were: throughput 0.5 L/min, mean residence time (τ) 99 ms, concentration step from 0 to 10 vol-% He.

If the measurements shown in figure 10 (smoothed by a moving average filter) are normalized (standard step von 0 to 1) and differentiated the residence time distributions at the inlet and the outlet, shown in figure 11, are obtained. It is evident that the RTD measured at the inlet (TCD I) is broadened by the microstructure (measured by TCD II). The squared standard deviation of these curves was calculated. The squared standard deviation of the RTDs of the microstructure can then be calculated by subtracting both values, like it is described by Aris (1959). Table 1 summarizes the values.

Using a dispersion model, the Bodenstein number Bo gives the ratio of convective transport to effective dispersion. In equation (1), the definition of the Bodenstein number is given. In principle, higher values of Bo mean smaller dispersion, lower values mean higher dispersion.

The Bodenstein number can also be calculated from the squared standard deviation of the RTD of the microstructure (see equation (2)).

$$Bo = \frac{\bar{v} \cdot L_R}{D} \quad (1)$$

Equation (2) can be used to calculate the Bodenstein number from the squared standard deviation of the RTD of the microstructure .

$$Bo = \frac{1}{\sigma^2} + \sqrt{\frac{1}{\sigma^4} + \frac{8}{\sigma^2}} \quad (2)$$

The Bodenstein number calculated for the above-mentioned conditions is 9.5.

In figure 10, in the time region of approx. 0.5 to 0.6 s a negative amplitude of the measurements on the inlet can be seen, which was also visible in following experiments under modified conditions. The reason for this phenomenon is unknown.

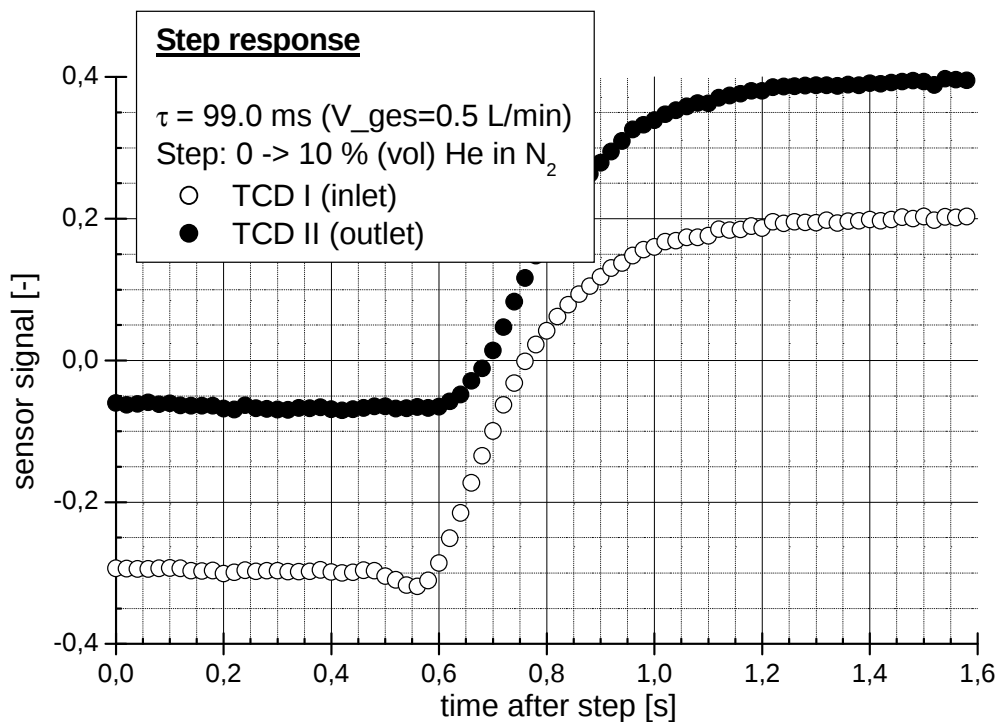


Fig. 10: Step response measured with the described microstructure sensor. Measurement parameters were: throughput: 0.5 L/min; τ : 99 ms; step: 0→10 Vol-% He in N₂

Table 1: Squared standard deviation and Bodenstein number

throughput	mean residence time	step	squared standard deviation			Bodenstein number
			inlet	outlet	reactor	
0,5 L/min	99,0 ms	0 → 10 Vol-%	0,931	1,232	0,301	9,5

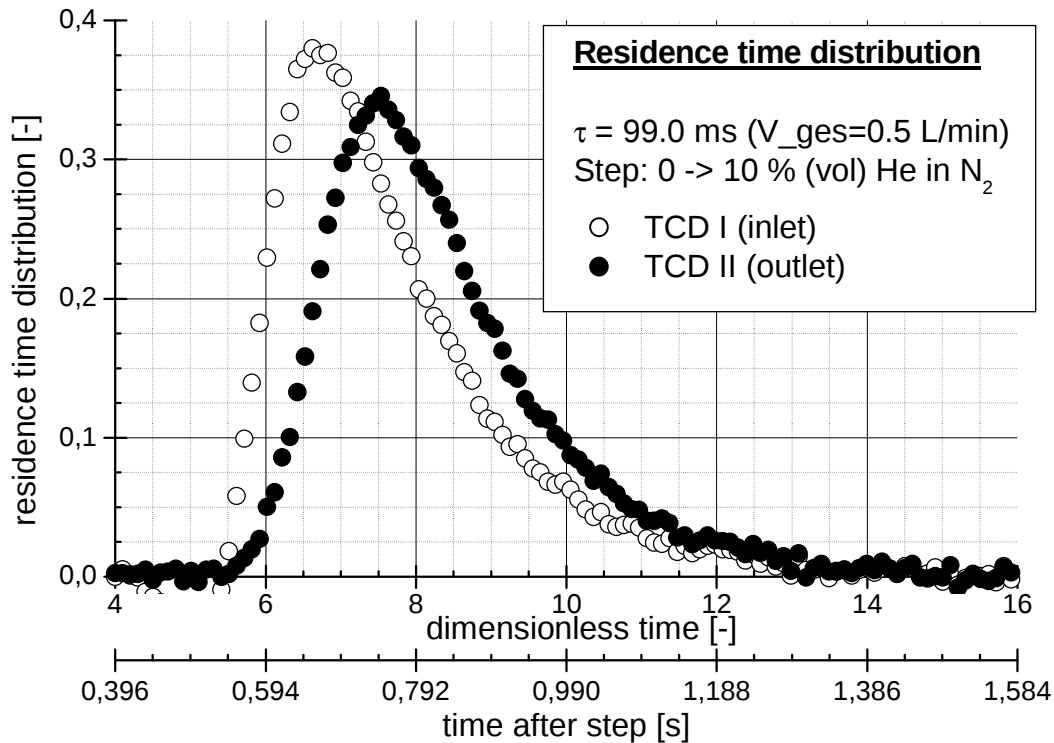


Fig. 11: Residence time distribution measured at the inlet and the outlet of the microstructure device arrangement. Measurement parameters were: throughput: 0.5 L/min; τ : 99 ms; step: 0→10 Vol-% He in N₂

Summary

A sensor system was developed for the measurement of the residence time distribution (RTD) for gas flow through microstructured devices. This sensor system is based on thermal conductivity detectors and was tested on micro reactors constructed by FZ Karlsruhe by micro stereo lithography. The method used provides an integral RTD in the reactor, this means the RTD is not measured for one special channel but that one for the whole reactor including inhomogeneous distribution of flow between different reactor channels. In the result it gives the value which is relevant for the chemical reaction, assuming that all channels are catalytically active.

The sensors were integrated into the microstructured device in front of and behind the channels. For the measurement of the RTDs helium concentration steps in nitrogen were used. A combination of MFCs and magnetic valves was used to create these steps.

It could be shown that the experimental set-up and the sensor system are suitable for determining the RTDs. Different throughputs and concentration step heights were applied and the behaviour of the microstructured device was measured. As a result of these experiments small Bodenstein numbers were obtained. This means a high dispersion in the fluid system. To obtain more precise data further detailed research is necessary. The new sensor system provides an opportunity for this.

One possible explanation for the Bodenstein numbers found could be the uneven flow distribution to the different channels of the microstructure. This leads to a higher effective dispersion in the microstructure as a whole and hence to lower Bodenstein numbers. Experimental determination of the flow distribution for single channels with hot wire anemometry, like it was performed by Pfeifer et al (2007), demonstrates that this uneven flow really exists.

References

1. Aris, R., Chem. Eng. Sci. 9 (1959), 266
2. Baerns, M., Hofmann, H., Renken, A., Chemische Reaktionstechnik. Verlag Georg Thieme, Stuttgart, New York 1999
3. Bier, W., Keller, W., Linder, G., Seidel, D., Schubert, K., Martin, H., Gas to gas heat transfer in micro heat exchangers. Chem. Eng. Proc. 32 (1993), 33
4. Brandner, J.J., Anurjew, A., Bohn, L., Hansjosten, E., Henning, T., Schygulla, U., Wenka, A., Schubert, K., Concepts and realization of microstructure heat exchangers for enhanced heat transfer, Experimental Thermal and Fluid Science 30 (2006), 801-809
5. Bürkert: Data Sheet: Magnetic Valve Type 6124. Ingelfingen
6. Gebhardt, A., *Rapid Prototyping*, Hansa, München, 1996
7. Hessel, V., Hardt, S., Löwe, H., Chemical Micro Process Engineering Vol. 1+2, Wiley-VCH, 2005
8. Ikuta, K., Hiwatari, K., Ogata, T., "Three dimensional integrated fluid systems (MIFS) fabricated by stereo lithography", *Proc. IEEE Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1-6, MEMS'94, Osio, Japan, 1994
9. Kockmann, N. (Ed.), J.J. Brandner, "Microfabrication in Metals and Polymers", *Advanced Micro- and Nanosystems* Vol.5, 267-320, Wiley-VCH, 2006
10. Pfeifer, P.; Schubert, K.: Hot Wire Anemometry for Experimental Determination of Flow Distribution in Multilayer Microreactors, Chem. Eng. J., (2007)
11. Stief, T., Geider, H., Langer, O.U., Brandner, J.J., Schygulla, U., Development of a fast sensor for the measurement of the residence time distribution of gas flow through microstructured reactors, Chem. Eng. Journal, (2007):
12. Wolf, D., Experimente und modellgestützte Simulationen zur reaktionstechnischen Charakterisierung von Mikroreaktoren für heterogen katalysierte Reaktionen in der Gasphase. in Richter, Th. (Ed.): Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung, Realisierbarkeit und Charakterisierung von Mikroreaktoren für industrierelevante Reaktionen in der Gasphase (MIKREAK). Abschlußbericht des BMBF-Forschungsprojektes, Förderkennzeichen 16SV671 bis 16SV677

© Eugen Anurjew, Juergen J. Brandner, Edgar Hansjosten,
Ulrich Schygulla, Thomas Stief, Klaus Schubert, 2008

УДК 681.783.25

В.М. Тиссен

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ, ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ В ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

V.M. Tissen

Siberian Scientific-Research Institute of Metrology (SSRIM)

4 Dimitrova Ul., Novosibirsk, 630004, Russian Federation

NON-UNIFORMITY OF THE EARTH ROTATION PROBLEMS AND ACHIEVEMENTS IN ITS PREDICTION

The article presents the data on the main components of the Earth rotation non-uniformity and the problems resulting from its predictive model development. The brief analysis of the predictive model developed by the research institute is given here. The achieved results are compared with those of IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service).

С появлением и развитием спутниковых навигационных систем КНС ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США) возникла острая необходимость в повышении точности определений и прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ): поправок к координированному атомному времени $dUT1 = UT1 - UTC$ и координат полюса x_p, y_p . Это связано с тем, что ПВЗ используются для связи земной системы координат, к которой привязаны наземные беззапросные измерительные станции (БИС) и принятой инерциальной системы координат, в которой производится интегрирование уравнений движения Космических аппаратов.

Из ПВЗ параметр $dUT1$, характеризующий неравномерности вращения Земли, является наиболее трудно прогнозируемым. На рис. 1 по данным [1] и [2] представлен график изменений этого параметра за последние 350 лет.

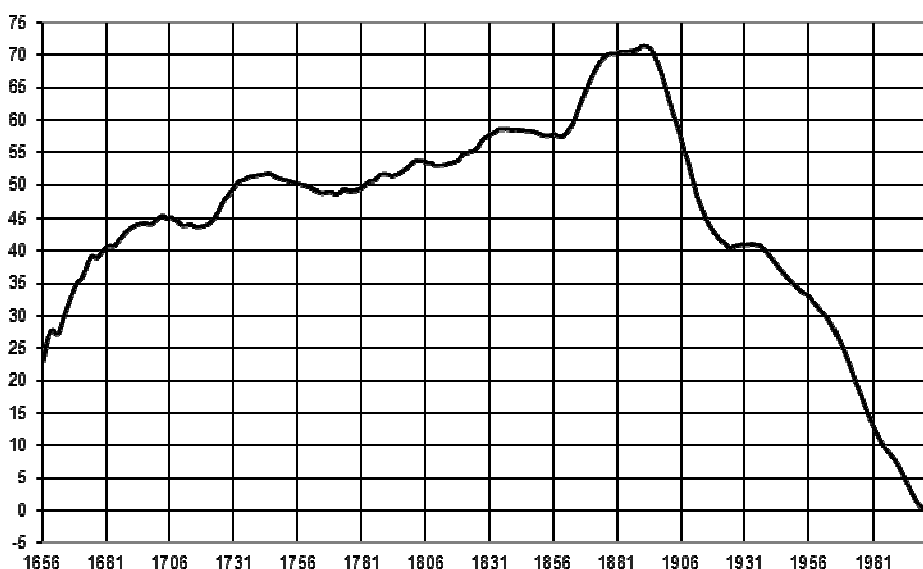


Рис. 1. Изменение параметра dUT1 за период 1656-2007 г.

Анализируя график на рис. 1 можно отметить, что скорость вращения Земли на некоторых участках рассматриваемого временного интервала претерпевала значительные непредсказуемые изменения. Особенно это относится к интервалу с 1860 по 1930 г., когда фазы ускорения и замедления скорости вращения Земли неожиданно менялись.

По формальным признакам существующие изменения dUT1 можно разделить на 3 группы:

1. Медленные или "вековые", одной из причин которых является приливное трение в мелкие моря, проливах и шельфах;
2. Периодические, происходящие вследствие изменения положения главного момента инерции земли под влиянием периодических лунно-солнечных приливных сил, а также вследствие целого ряда других геофизических и климатических явлений (сезонные переносы воздушных масс, изменение потоков солнечной радиации и т.д.);
3. Нерегулярные, которые вероятнее всего могут быть обусловлены разнообразными процессами, происходящими в недрах Земли, таких как механическими и электромагнитными взаимодействиями на границе мантии и ядра; вариациями геомагнитного поля, турбулентными движениями в ядре, конвективными течениями вещества в мантии, процессами перекристаллизации в подкорковом слое Земли и др.

Вековое замедление скорости вращения Земли увеличивает длительность суток по приближенным оценкам на величину порядка 0.002 с в столетие [3]. Такие малые изменения в построениях моделей неравномерностей вращения Земли для целей прогнозирования на интервалы до года не учитываются.

Периодические изменения, наиболее предсказуемы. Сезонные изменения обычно аппроксимируются годовой и полугодовой волнами с амплитудами около 25 и 10 мс значений dUT1. Среди приливных наиболее заметны вариации

с периодами: 18,6; 9,3; 1,0 и 0,5 года, а также так называемые лунные периоды: 27,35; 13,66 и 13,62 суток [3].

Нерегулярные изменения могут происходить быстро (в течение недель) или медленно (за десятилетия) и вызывать изменения длительности суток на несколько миллисекунд. Из-за своей непредсказуемости являются основным источником погрешностей в существующих методах прогнозирования ПВЗ. При этом их влияние на погрешность находится в прямой зависимости от дальности прогнозируемого параметра и начинает заметно проявляться уже на интервалах более 10 суток.

При построении моделей прогнозирования ПВЗ традиционно учитываются все периодические изменения, наложенные на среднее значение тренда за последние 3-5 лет. При этом, приливы рассчитываются на основе физико-математической теории движения луны и солнца, а сезонные колебания и тренд оцениваются по данным астрооптических, спутниковых, лазерно-дальномерных и других наблюдений. Остаточная функция обычно прогнозируется методом авторегрессии.

Расчеты показывают, что степень влияния перечисленных факторов в общую погрешность прогнозирования различна и зависит от дальности прогноза. Составляющие погрешностей прогнозирования на год от влияния перечисленных выше факторов приведены в таблице.

Таблица. Составляющие погрешностей прогнозирования dUT1 на 1 год

№ п/п	Источник погрешности	СКП экстраполяции m (мс)	m ² (мс ²)	Вклад в полную погрешность В %
1	Вариация параметров годичной волны	4,9	24,01	0,4
2	Вариация параметров полугодовой волны	2,6	6,76	0,1
3	Вариация линейного параметра	82,1	6740,41	99,3
4	Неучет 18-летней Волны	4,2	17,67	0,2
	Полная погрешность $m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2}$	8,2	6788,82	100,0

Как следует из данных, приведенных в таблице, основной вклад в погрешность экстраполяции на год вносит неустойчивость линейного параметра. При сокращении интервала экстраполяции доля этой составляющей будет быстро падать, а вариации сезонных изменений шкалы всемирного времени будут сказываться сильнее.

Официальным поставщиком прогнозов ПВЗ в России является Государственная служба времени и частоты (ГСВЧ) г. Москва. Свои прогнозы ГСВЧ публикует в еженедельных бюллетенях, которые по почте рассылаются во все отечественные службы времени и др. заинтересованные организации.

Официальным мировым поставщиком является международная служба вращения Земли (IERS) г. Париж. Их прогнозы, обновляемые ежедневно, можно

найти в Интернете на сайте USNO: <http://maia.usno.navy.mil/>. Погрешности прогнозирования $dUT1$ в IERS составляют 1,0 – 2,0 мс на интервалы 10 – 15 дней при осреднении за год. Отдельные расхождения зачастую в два-три раза больше. Такие точности оказываются неудовлетворительными для решения современных задач эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) ГЛОНАСС.

В Сибирском НИИ метрологии разработана и апробирована новая методика прогнозирования ПВЗ, состоящая из нескольких последовательных этапов уточнения значений рассчитываемых параметров.

На *первом этапе* производится предварительная подготовка исходных данных. Из временных рядов измерений ПВЗ исключаются приливные составляющие движения Земли, связанные с гравитационным воздействием Луны и Солнца. Эти составляющие принято считать детерминированными. Расчет поправок $dUT1$ и координат полюса X_p , Y_p за приливные гармоники производится по методике, принятой в IERS [3].

На *втором этапе* решаются задачи параметрической идентификации принятых математических моделей изменения ПВЗ. В качестве таких моделей принимаются линейные комбинации большого числа гармонических составляющих вращения Земли. Прежде всего, из выравниваемого временного ряда вычитаются гармоники с периодами 20 и более лет на интервалах обучающей выборки до 100 лет. При этом параметры вычитаемых гармоник находятся с помощью МНК. Затем, по разработанному в СНИИМ оригинальному алгоритму суммирования полупериодов искомых гармонических компонент, определяются параметры гармоник с периодами менее 20 лет [4].

На *третьем этапе* производится уточнение параметров отдельных гармоник с использованием результатов получаемых прогнозов. Для этого используются различные методы оптимизации математических моделей физических объектов. В частности, известные методы наискорейшего спуска, золотого сечения. Главной задачей на этом этапе вычислений является нахождение оптимальной длины интервалов оценивания уточняемых гармоник в зависимости от величины их периодов.

Окончательный прогноз выполняется с применением разработанной в СНИИМ модели авторегрессии [4] и проинтегрированного скользящего среднего.

В результате применения новой методики были получены следующие результаты и выводы:

- Достигнуты устойчивые результаты в прогнозировании поправки $dUT1$ на интервалы не менее 1 года, превосходящие по точности в несколько раз существующие мировые достижения;
- Обнаружена высокая степень корреляции между параметрами гармонических составляющих и интервалов, на которых производится их оценивание;
- Изменения тренда – основного источника погрешностей прогнозирования можно достаточно надежно аппроксимировать суперпозицией

ограниченного числа гармонических составляющих неравномерностей вращения Земли;

– Общепринятая в настоящее время точка зрения о преобладании стохастических неравномерностей вращения Земли над регулярными по расчетам, выполненных с использованием данных за последние 60-70 лет не подтверждается.

При прогнозировании $dUT1$ на интервалы для целей ЭВО ГЛОНАСС, также получены хорошие результаты. На рис. 2 приведены графики СКП (рассчитанные, по максимальным уклонениям $dUT1$ на интервале прогноза) по 10 прогнозам СНИИМ на интервалы от 1 до 50 суток переданных по электронной почте в ГСВЧ России за период с 1 января по 28 февраля текущего года в сравнении с аналогичными IERS.

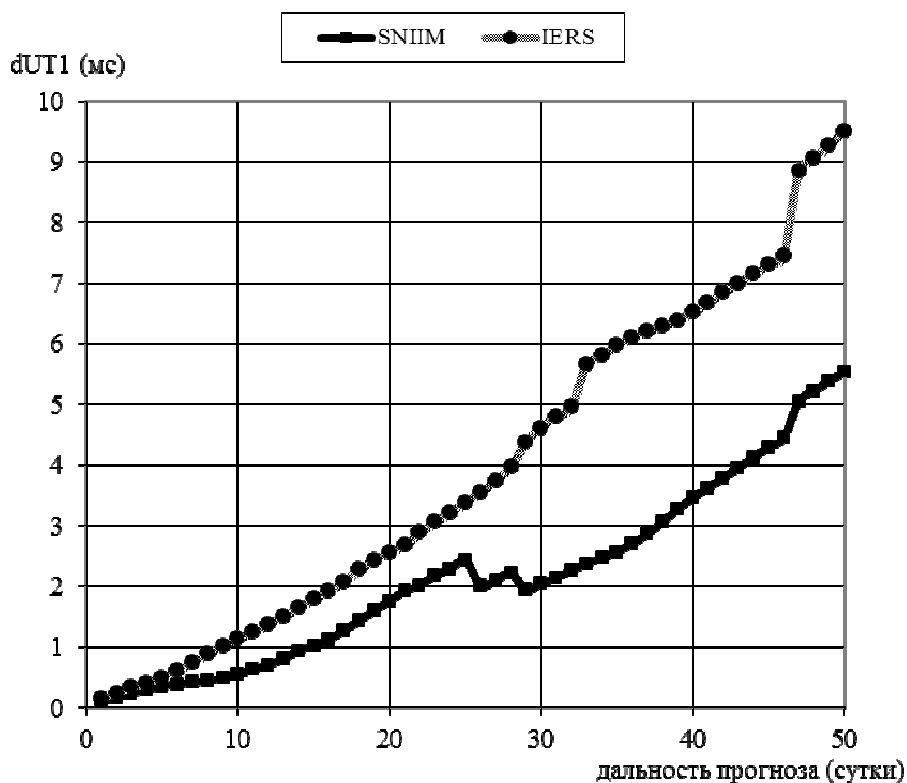


Рис. 2. СКП (max) прогнозов $dUT1$ СНИИМ и USNO с 01.01.2008

Анализируя данные, приведенные на рисунке 2 следует отметить, что на дальностях в 10-15 суток значения СКП (max) прогнозов СНИИМ почти в 2 раза меньше чем прогнозов USNO. Эти результаты в наибольшей степени отвечают современным требованиям оперативной поддержки ЭВО ГЛОНАСС и следовательно являются главным достижением новой методики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Константинов, А.И. Время/А.И. Константинов, А.Г. Флеер. – М.: Изд-во стандартов. – 1971. – 367 с.
2. IERS Annual Report 2001. Frankfurt am Main, 2002.
3. Бакулин, П.И. Служба точного времени/ П.И. Бакулин, Н.С. Блинов. – М.: Наука. – 1968. – 319 с.
4. Тиссен, В.М. Опыт кратко- и долгосрочного прогнозирования ПВЗ/В.М. Тиссен, А.С. Толстиков, З.М. Малкин //Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение. (КВНО-2007)вторая Всероссийская конференция СПб: ИПА РАН. – 2007. – С. 163–164.

© В.М. Тиссен, 2008

УДК 621.396.2

А.С. Толстиков

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

О.В. Нетесаная

СГГА, Новосибирск

ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗЗАПРОСНЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО КА ГЛОНАСС

A.S. Tolstikov, O.V. Netesanaya

Siberian Scientific-Research Institute of Metrology (SSRIM)

4 Dimitrova Ul., Novosibirsk, 630004, Russian Federation, SSGA, 10 Plahotnogo Ul, Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE OBJECTIVES OF METROLOGICAL SUPPLIES OF REQUESTLESS SC GLONASS TRAJECTORY MEASUREMENTS

This lecture lightens the objectives of high-precision positioning supplies as specifically as GLONASS technologies.

С открытием СНС ГЛОНАСС для гражданского применения возникли вопросы конкурентной способности системы по отношению к СНС GPS и СНС GALILEO. Эти вопросы сводятся в первую очередь к обеспечению требований точности и надежности позиционирования, целостности системы и ее доступности для широкого круга потребителей. Существенными в этом плане также являются:

- Наличие дифференциальных приложений системы,
- Интегрирование с другими техническими средствами координатно-временных и навигационных определений,
- Существование широкого парка многофункциональной аппаратуры пользователей СНС.

Высокие точностные характеристики координатно-временных и навигационных определений на основе СНС ГЛОНАСС требуют создания качественных эфемеридно-баллистического и эфемеридно-временного обеспечений и наличия метрологического обеспечения всех сегментов СНС ГЛОНАСС на этапах проектирования, производства, испытания и эксплуатации функциональных блоков системы.

В соответствии с концептуальными решениями развития ГЛОНАСС [1] основным источником данных для формирования эфемеридно-баллистического и эфемеридно-временного обеспечений являются беззапросные траекторные измерения по КА «ГЛОНАСС», КА «GPS» и КА «GALILEO». Для этих целей создается сеть беззапросных измерительных станций (БИС). По указанным

орбитальным группировкам выполняются измерения геометрических дальностей от навигационных КА до приемных антенн БИС

$$\rho(u_{\tilde{N}}, u_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}}) = \sqrt{(x_{\tilde{N}} - x_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}})^2 + (y_{\tilde{N}} - y_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}})^2 + (z_{\tilde{N}} - z_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}})^2}. \quad (1)$$

В (1) $-u_{\tilde{N}}^T = [x_{\tilde{N}}, y_{\tilde{N}}, z_{\tilde{N}}]$, $u_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}}^T = [x_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}}, y_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}}, z_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}}]$ – векторы текущих координат КА и БИС соответственно.

Измерение указанных дальностей радиотехническими методами сводится к определению длительности интервала времени, необходимого для прохождения навигационного сигнала от КА до БИС. Этот измеренный временной интервал $D(t)$, выраженный в единицах длины и именуемый в дальнейшем «псевдодальность», связан с геометрической наклонной дальностью $\rho(u_{\tilde{N}}, u_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}})$ уравнением измерений

$$D(t) = \rho(u_C, u_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}}) + c \cdot \Delta T_C(t) + \sum_{k=1}^{11} p_k(t), \quad (2)$$

где $\Delta T_C(t)$ – уход бортовых часов относительно шкалы центрального синхронизатора системы;

$p_k(t), k=1, \dots, 11$ – факторы, влияющие на точность измерений $\rho(u_C, u_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}})$ на каждой радиотрассе. В частности:

$\delta_1(t) = c \cdot \Delta T_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}}(t)$ – уход часов приемной аппаратуры БИС относительно шкалы центрального синхронизатора системы;

$\delta_2(t) = \Delta D_{\tilde{E}}(t)$ – задержка навигационного сигнала в ионосферном слое;

$\delta_3(t) = \Delta D_{\tilde{O}}(t)$ – задержка навигационного сигнала в тропосферном слое;

$\delta_4(t)$ – смещение фазового центра передающей антенны относительно центра масс навигационного спутника;

$\delta_5(t)$ – смещение фазового центра приемной антенны БИС относительно ее геометрического центра;

$\delta_6(t)$ – погрешности от релятивистских эффектов;

$\delta_7 = N \cdot \lambda$ – неоднозначность фазовых измерений;

$\delta_8(t)$ – погрешности приведения координат БИС в инерциальную систему координат и погрешности задания эфемерид спутника;

$\delta_9(t)$ – погрешности приведения измеренных дальностей к моменту прихода навигационного сигнала на приемную антенну;

$\delta_{10}(t)$ – погрешности от многопутности и разрывы в данных кодовых измерений;

$\delta_{11}(t) = v_i(t)$ – погрешности случайной природы, включающие шумы измерений, неучтенные задержки в измерительных каналах; для ГЛОНАСС – некомпенсированные межлитерные задержки.

На основе кодовых и фазовых псевдодальномерных измерений $D(t)$ по оценкам геометрических дальностей $\rho(u_C, u_{\tilde{A}\tilde{E}\tilde{N}})$ строятся математические модели движения навигационных КА и рассчитывается необходимая эфемеридно-временная информация. По оценкам уходов бортовых шкал

$\Delta T_c(t)$ строятся математические модели нестабильности бортовых часов. С применением этих моделей рассчитываются частотно-временные поправки к бортовым часам, составляющие эфемеридно-временное обеспечение системы.

Требуемая точность оценивания $\rho(u_c, u_{\hat{A}\hat{E}\hat{N}})$ и $\Delta T_c(t)$ по результатам траекторных измерений обеспечивается за счет применения оптимальных алгоритмов оценивания и путем снижения уровней влияющих факторов $p_k(t)$ в уравнении (2).

В частности, для достижения малого уровня $\delta_1(t) = c \cdot \Delta T_{\hat{A}\hat{E}\hat{N}}(t)$ решается задача синхронизации часов БИС по навигационным сигналам КА ГЛОНАСС [2]. Ионосферные $\delta_2(t)$ и тропосферные $\delta_3(t)$ факторы уменьшаются путем применения рассчитанных компенсирующих поправок. Поправки для компенсации факторов $\delta_4(t)$, $\delta_5(t)$ определяются на этапе калибровки антенно-фидерных устройств передающей и приемной аппаратуры. Имеются различные методики для учета влияния факторов $p_k(t)$, $k = 5, \dots, 10$. В группе факторов $\delta_{11}(t)$ проблемными остаются погрешности, связанные с неопределенными задержками навигационного сигнала в измерительных трактах приемной аппаратуры БИС.

Эти проблемы связаны с использованием в СНС ГЛОНАСС частотного разделения каналов приема навигационных сигналов. В силу частотной зависимости аналоговых трактов аппаратуры ГЛОНАСС, на разных литерных частотах возникают отличные друг от друга межлитерные задержки прохождения навигационных сигналов. Вследствие этого, одно и тоже измеряемое расстояние от навигационного КА до приемной антенны БИС может воспроизводиться по разным каналам в виде разных по длительности интервалов времени. Возникающая при этом неопределенность в оценивании геометрической дальности $\rho(\mathbf{u}_c, \mathbf{u}_{\hat{A}\hat{E}\hat{N}})$ может составлять несколько метров, что в конечном счете ограничивает точность координатно-временных определений на основе применения ГЛОНАСС технологий.

Основной путь к достижению высоких точностных характеристик беззапросных траекторных измерений, выполняемых для целей эфемеридно-баллистического и эфемеридно-временного обеспечений, заключается в создании качественного метрологического обеспечения этих измерений. Это метрологическое обеспечение включает в себя:

- Создание эталонных и образцовых средств траекторных измерений,
- Нормирование и оценивание метрологических характеристик каналов формирования результатов координатно-временных и навигационных определений;
- Создание физических имитаторов навигационно-временных полей эталонного уровня;
- Создание программных имитаторов формирования измерительной информации сети БИС и сети лазерных дальномеров, имитаторов движения орбитальной группировки навигационных спутников, имитаторов наземного комплекса управления (НКУ) ГЛОНАСС;

- Создание программных комплексов для оценки метрологических характеристик бортовой аппаратуры; аппаратура из состава НКУ и аппаратуры потребителей СНС, а также для исследования точностных характеристик применяемых алгоритмов оценивания состояний орбитальной группировки, алгоритмов идентификации параметров и алгоритмов прогнозирования;

- Создание средств поверки и разработка методик выполнения измерений, поверки и калибровки средств измерений, применяемых в составе СНС.

Традиционно для поверки и калибровки аппаратуры пользователей СНС применяются методики, предполагающие использование геодезических полигонов с реперными пунктами, определенными в тех или иных системах координат (ПЗ 90, WGS 84, ITRF-2000). По ряду причин такой подход не может быть использован для поверки или калибровки аппаратуры, которая предназначена для измерения длин.

- Указанные реперные пункты воспроизводят не длину радиотрассы, по которой распространяются навигационные радиосигналы, а свои координаты.

- Результаты такой калибровки отражают состояние всей навигационной системы, а не калибруемой аппаратуры. В условиях смены поколений навигационных спутников и недостаточной по составу орбитальной группировке, СНС ГЛОНАСС в настоящее время не может быть использована для поверки и калибровки навигационной аппаратуры.

- При известных в ПЗ-90 координатах реперных пунктов и принятых бортовых эфемеридах геометрические дальности от НС до потребителя могут быть рассчитаны. Однако, эти рассчитанные дальности не могут быть использованы в качестве образцовых или эталонных длин, поскольку общая погрешность воспроизведения таких дальностей будет достаточно большая из-за неточности бортовых эфемерид и большого количества факторов, влияющих на точность измерения псевдодальностей.

Обсуждая проблемы обеспечения точности координатно-временных определений на основе ГЛОНАСС технологий, необходимо отметить следующее.

1. Точность координатно-временных определений на основе ГЛОНАСС технологий существенным образом зависит от качества эфемеридно-баллистическогои эфемеридно-временного обеспечений системы.

2. Для создания качественного эфемеридно-баллистическогои эфемеридно-временного обеспечений системы требуется решать задачи идентификации математических моделей движения навигационных КА иматематических моделей нестабильностей бортовых часов.

3. Поскольку для формирования эфемеридно-баллистическогои эфемеридно-временного обеспечений системы используются данные беззапросных траекторных измерений, выполняемых с сети БИС, к точности таких измерений предъявляются высокие требования.

4. При выполнении беззапросных траекторных измерений существуют неопределенности, связанные с неучтенными межлитерными задержками навигационных сигналов в частотнозависимых аналоговых трактах приемной аппаратуры. Для калибровки приемной аппаратуры БИС с целью определения указанных межлитерных задержек требуется разработка специализированных компарирующих устройств.

5. Важными факторами, влияющими на качество эфемеридно-баллистического и эфемеридно-временного обеспечений системы, является конфигурация сети беззапросных измерительных станций, выполняющих траекторные измерения по навигационным КА. Желательные условия для таких измерений – полное покрытие контролируемых орбит навигационных КА. К сожалению распределение сети БИС ограничивается главным образом территорией Российской Федерации, что не обеспечивает требуемого покрытия орбит КА ГЛОНАСС.

6. Высокие требования к точности эфемеридно-баллистического и эфемеридно-временного обеспечений системы предъявляются для «особого периода» длительностью до 15 суток, когда требуется автономное функционирование спутникового сегмента СНС ГЛОНАСС. Для этого случая требуются качественные прогнозы движения орбитальной группировки КА ГЛОНАСС и высокоточные прогнозы изменения параметров вращения Земли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бартенев, В.А. Состояние и перспективы развития космического комплекса системы ГЛОНАСС/В.А. Бартенев//Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение. (КВНО-2007) Вторая Всероссийская конференция. – СПб.: ИПА РАН. – 2007. – С. 63, 66.

2. Tolstikov, A.S. Comparative Analysis of Synchronization Techniques of Spatial Diversity Clocks Navigation Signals / A.S. Tolstikov, A.K. Grechkoseev, V.I. Kokorin, V.M. Vladimirov // Telsiks2007. Proceedings of Papers. Volume 2 of 2 volumes. //8th International Conference of Telecommunications in Modern Satellite, and Broadcasting Services. Serbia, Nis. 26-28 September, 2007. – P.356–368.

© А.С. Толстиков, О.В. Нетесаная, 2008

УДК 535.417

Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков

СГГА, Новосибирск

РЕНТГЕНОВСКИЕ ОБЪЕМНЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Yu.Ts. Batomunkuev, N.A. Mescheryakov

SSGA, Novosibirsk

10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE X-RAY VOLUME HOLOGRAPHIC ELEMENTS

This report is devoted to aberrational calculation of the reconstruction scheme and of the recording scheme of the x-ray volume holographic optical elements (HOE). It is shown that all monochromatic aberrations (defocusing, spherical aberration, coma, astigmatism, curvature to surfaces and distortion) have components, which are linear and nonlinear proportionate to thickness of HOE. The calculations of axial volume HOE for x-ray area of spectrum are executed. It is shown that defocusing, third and fifth orders of the spherical aberration can be corrected by choice of the coordinates of sources writing referent and object spherical waves, of the recording wavelength and of the shrinkages factor on thickness. The optimum choice of the light diameter allows to reduce of the seventh order of the spherical aberration before diffraction limit.

X-ray optics, holographic optical element, aberration of the hologram

Введение. Известно, что объемные голограммные оптические элементы (ГОЭ) могут выполнять функции линз, зеркал и использоваться в качестве оптических элементов в устройствах микроскопии [1, 2]. Известно также, что объемные ГОЭ обладают высокой дифракционной эффективностью, наличием одного рабочего порядка дифракции, спектральной, угловой и пространственной селективностями [3, 4]. Несмотря на ряд успешных практических применений объемных ГОЭ в видимой области спектра, например в качестве узкополосных спектральных фильтров [5, 6], селективных зеркал, вводящих в поле зрения наблюдателя информацию [7], все же к настоящему времени объемные ГОЭ не нашли ожидаемого широкого применения в качестве оптических элементов. Причины этого кроются в некоторых недостатках объемных ГОЭ: в необходимости использования с когерентным или практически когерентным источником излучения, в возникновении в сформированном изображении монохроматических и хроматических aberrаций, а также трудно исправимых светлых и темных пятен – спеклов. Кроме этого известные объемные голографические материалы уступают стандартным стеклам по своим оптическим, эксплуатационным и

технико-экономическим параметрам. Непрерывающаяся работа по совершенствованию ранее созданных объемных голографических материалов [8-11], а также разработка новых недорогих голографических материалов [12, 13] позволяют надеяться, что их оптические и эксплуатационные характеристики будут в ближайшее время значительно улучшены.

Однако существуют области спектра, например, область мягкого рентгеновского излучения, где значительно затруднено использование оптических стеклянных линз, из-за сильного поглощения в них и очень слабого преломления. Известно, что именно использование дифракционных и голограммных элементов в качестве линз обеспечило возможность создания устройств получения и передачи рентгеновских изображений [14-16]. Но дифракционная эффективность разработанных рентгеновских ГОЭ очень низка, порядка нескольких процентов. Относительное отверстие их также невелико, что связано с большой разницей (в 50-100 раз) между длиной волны записи, лежащей, как правило, в ультрафиолетовой области спектра, и рабочей длиной волны [14]. Ожидалось, что такая значительная разница между длиной волны лазера, записывающего ГОЭ, и рабочей длиной волны позволит практически в такой же мере увеличить разрешение ГОЭ. Но технические сложности не позволили достичь этого. Сейчас разрешение рентгеновского ГОЭ не превышает 17-20 нанометров, в то время как в качестве рабочих длин волн, как правило, используются длины волн 2-5 нанометров. В настоящее время разработан компактный рентгеновский лазер [17]. Небольшие габариты позволяют разместить его на стандартных голографических столах. Это открывает возможность более широкому кругу исследователей работать над созданием рентгеновских ГОЭ голографическим методом, так как существуют недорогие материалы, чувствительные к рентгеновскому диапазону, например, слои полиметилметакрилата [14]. До появления рентгеновского лазера в опытах по голографической записи в качестве когерентного источника предлагалось использовать ондулятор синхротронных центров [18]. Дифракционная эффективность рентгеновского ГОЭ может быть повышена увеличением его толщины, особенно это касается пропускающих объемных ГОЭ. Но с увеличением толщины возрастают объемные aberrации. Коэффициент увеличения и оптимальная схема восстановления также зависят от толщины ГОЭ. Изучению aberrационных характеристик объемных ГОЭ видимого диапазона спектра посвящено множество работ, например [19-25], в то время как aberrации рентгеновского ГОЭ рассматривались в ограниченном количестве работ, например [14, 15].

Целью работы является aberrационный расчет схем восстановления и записи рентгеновских объемных ГОЭ с учетом их толщины.

Аберрации рентгеновского объемного ГОЭ. Для рентгеновских ГОЭ длины волн записи λ_c и восстановления λ_o и средние показатели преломления n_c , n_o голографической среды на стадии восстановления и записи различаются.

На рис. 1а и 2а представлены схемы восстановления (рабочие схемы) рентгеновского пропускающего и отражающего объемного ГОЭ, где $P_c(x_c, y_c, z_c)$ – точка предмета и соответствующая ей $P_i(x_i, y_i, z_i)$ – точка изображения, $M(x, y, z)$

– произвольная точка объемного ГОЭ. На рис. 1 и 2 ось Oz декартовой системы координат является оптической осью и направлена перпендикулярно поверхностям ГОЭ. Плоскость координат xOy проходит через центр ГОЭ. На рис. 1б и 2б представлены схемы записи объемного ГОЭ опорной и объектной сферическими волнами, где $P_r(x_r, y_r, z_r)$ – точечный источник опорной (референтной) волны, $P_o(x_o, y_o, z_o)$ – точечный источник объектной волны, $M'(x', y', z')$ – точка объема ГОЭ при записи, соответствующая точке $M(x, y, z)$ при восстановлении, причем $x' = x/m_x$, $y' = y/m_y$, $z' = z/m_z$, а m_x , m_y , m_z – коэффициенты усадки (набухания) объемного ГОЭ вдоль соответствующих осей координат. Расстояния, указанные в рабочей схеме, равны: $P_c M = l_c$, $M P_i = l_i$, $P_c O = d_c$, $O P_i = d_i$. Расстояния в схеме записи равны: $P_r M' = l_r$, $M' P_o = l_o$, $P_r O = d_r$, $O P_o = d_o$.

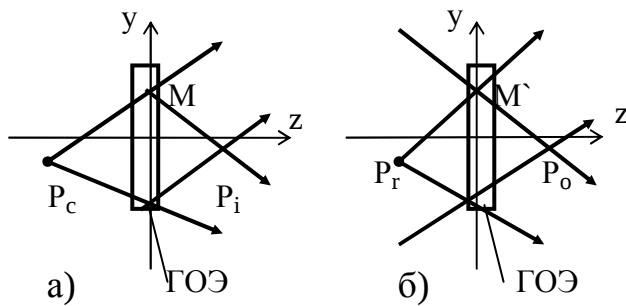


Рис. 1. Схема восстановления (а) и записи (б) пропускающего объемного ГОЭ

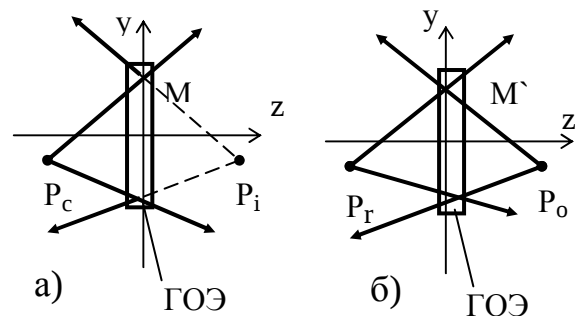


Рис. 2. Схема восстановления (а) и записи (б) отражающего объемного ГОЭ

Расчет aberrаций рентгеновского ГОЭ отличается от расчета объемного ГОЭ для видимого диапазона спектра тем, что в первом порядке можно не учитывать преломление волн на поверхности объемного ГОЭ, поэтому можно пренебречь их слабой кривизной и считать поверхности плоскими. Отсутствие преломления означает также отсутствие рефракционных aberrаций. В изображении, построенном рентгеновским объемным ГОЭ, присутствуют только голографические (дифракционные) aberrации. Второй отличительной особенностью расчета рентгеновского ГОЭ является то, что в первом приближении на стадии записи показатель преломления его можно принять равным единице.

Для расчетов изображающих и aberrационных свойств рентгеновского объемного ГОЭ применяется характеристическая функция $V(x, y, z)$, равная разности эйконолов и записываемая в виде [21,23,26]

$$V(x, y, z) = l_c - d_c \pm (l_i - d_i) - km(x, y, z)\lambda_c/n_c,$$

где $m(x, y, z) = n_o(l_r - d_r \pm (l_o - d_o))/\lambda_o$ – величина, характеризующая пространственное распределение модуляции показателя преломления, модуляции коэффициента поглощения или модуляции толщины, n_o и n_c – начальное и конечное значения показателя преломления, λ_o – длина волны лазера, используемого при записи, λ_c – рабочая длина волны, k – порядок дифракции. Верхний знак “плюс” в выражениях для $V(x, y, z)$, $m(x, y, z)$ и в

последующих выражениях соответствует отражающим объемным ГОЭ, а нижний знак “минус” – пропускающим объемным ГОЭ. Особые случаи использования знака “плюс-минус” оговариваются отдельно.

Рассмотрим случай, когда поперечные размеры (диаметр) рентгеновского ГОЭ больше или сопоставимы с размерами предмета и изображения, но намного меньше расстояний z_c , z_i до плоскостей предмета и изображения. Кроме этого считаем, что при записи отклонение от оптической оси источников опорной и объектной волн меньше или сопоставимо с поперечными размерами рентгеновского ГОЭ, а размеры ГОЭ много меньше расстояний z_r , z_o от нее до источников опорной и объектной волн. Также считаем, что толщина ГОЭ много меньше координат z_c , z_i , z_r , z_o точек P_c , P_i , P_r , P_o .

В этом случае расстояния d_j и l_j (где индекс $j = c, i, r, o$) могут быть разложены в ряды по величинам малости x_j/z_j , y_j/z_j , x/z_j , y/z_j , z/z_j . Так для расстояний d_c и l_c при разложении до пятого члена получаем

$$d_c = [(z_c - z)^2 + x_c^2 + y_c^2]^{1/2} = z_c [1 + (z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)/z_c^2]^{1/2} \approx \\ \approx z_c + (z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)/2z_c - (z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)^2/8z_c^3 + \\ + (z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)^3/16z_c^5 - 5(z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)^4/128z_c^7 + \dots,$$

$$l_c = [(z_c - z)^2 + (x_c - x)^2 + (y_c - y)^2]^{1/2} = z_c [1 + (x^2 + y^2 + z^2 - 2(xx_c + yy_c + zz_c) + x_c^2 + y_c^2)/z_c^2]^{1/2} \approx \\ \approx z_c + (x^2 + y^2 - 2(xx_c + yy_c))/2z_c + (z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)/2z_c - (x^2 + y^2 - 2(xx_c + yy_c) + z^2 - \\ - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)^2/8z_c^3 + (x^2 + y^2 - 2(xx_c + yy_c) + z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)^3/16z_c^5 - 5(x^2 + y^2 - \\ - 2(xx_c + yy_c) + z^2 - 2zz_c + x_c^2 + y_c^2)^4/128z_c^7 + \dots.$$

Разлагая аналогичным образом расстояния d_i , d_r , d_o , l_i , l_r , l_o и подставляя полученные выражения в характеристическую функцию $V(x, y, z)$ объемного ГОЭ получаем

$$V(x, y, z) = V_o^t(x, y, z) + V_o^v(x, y, z) + V_1^t(x, y, z) + V_1^v(x, y, z) + V_3^t(x, y, z) + V_3^v(x, y, z) + \dots,$$

где $V_o^t(x, y, z) = -xB_1^x - yB_1^y$ - характеристическая функция для вычисления aberrации увеличения тонкого ГОЭ;

$V_o^v(x, y, z) = -xzB_2^{xz} - xz^2B_3^{xz} - yzB_2^{yz} - yz^2B_3^{yz}$ - характеристическая функция для вычисления объемной aberrации увеличения;

$V_1^t(x, y, z) = x^2F_2^x/2 + y^2F_2^y/2$ - характеристическая функция для вычисления дефокусировки тонкого ГОЭ;

$V_1^v(x, y, z) = (x^2/2)(zF_3^{xz} + z^2F_4^{xz}) + (y^2/2)(zF_3^{yz} + z^2F_4^{yz})$ - характеристическая функция для вычисления объемной дефокусировки;

$$V_3^t(x, y, z) = - (x^4/8)S_4^x - (x^2y^2/4)S_4^{xy} - (y^2/8)S_4^y + (x^3/2)C_3^x + (x^2y/2)C_3^{yx} + \\ + (y^2x/2)C_3^{xy} + (y^3/2)C_3^y - (x^2/2)A_2^x - xyA_2^{xy} - (y^2/2)A_2^y - (x^2/4)(E_2^x - (y^2/4)E_2^y \\ - (x/2)D_1^x - (y/2)D_1^y$$

– Характеристическая функция для вычисления aberrаций третьего порядка тонкого ГОЭ;

$$V_3^v(x, y, z) = - (x^4/8)(3zS_5^{xz} + 6z^2S_6^{xz}) - (x^2y^2/4)(3zS_5^{xyz} + 6z^2S_6^{xyz}) - (y^2/8)(3zS_5^{yz} +$$

$$\begin{aligned}
& + 6z^2S_6^{yz}) + (x^3/2)(3zC_4^{xz} + 6z^2C_5^{xz}) + (x^2y/2)(3zC_4^{yxz} + 6z^2C_5^{yxz}) + \\
& + (y^2x/2)(3zC_4^{xyz} + 6z^2C_5^{xyz}) + (y^3/2)(3zC_4^{yz} + 6z^2C_5^{yz}) - \\
& - (x^2/2)(3zA_3^{xz} + 6z^2A_4^{xz}) - xy(3zA_3^{xyz} + 6zA_4^{xyz}) - (y^2/2)(3zA_3^{yz} + 6z^2A_4^{yz}) - \\
& - (x^2/4)(3zE_3^{xz} + 6z^2E_4^{xz}) - (y^2/4)(3zE_3^{yz} + 6z^2E_4^{yz}) + \\
& + (x/2)(3zD_2^{xz} + 6z^2D_3^{xz}) + (y/2)(3zD_2^{yz} + 6z^2D_3^{yz}) -
\end{aligned}$$

– Характеристическая функция для вычисления объемных aberrаций третьего порядка.

В отличие от известных работ, в характеристической функции $V(x,y,z)$ учтена неизотропная усадка и толщина ГОЭ. По аналогии с aberrациями тонкого ГОЭ члены разложения в характеристических функциях $V_0^t(x,y,z)$, $V_0^v(x,y,z)$, $V_1^t(x,y,z)$, $V_1^v(x,y,z)$, $V_3^t(x,y,z)$, $V_3^v(x,y,z)$ соответствуют известным элементарным типам aberrаций первого и третьего порядков [15]: B_1^x , B_1^y , B_2^{xz} , B_2^{yz} , B_3^{xz} , B_3^{yz} – aberrации увеличения, F_2^x , F_2^y , F_3^{xz} , F_3^{yz} , F_4^{xz} , F_4^{yz} – дефокусировке, S_4^x , S_5^{xz} , S_6^{xz} , S_4^{xy} , S_5^{xyz} , S_6^{xyz} , S_4^y , S_5^{yz} , S_6^{yz} , S_4^{xy} , S_5^{xyz} , S_6^{xyz} – сферической aberrации, C_3^x , C_4^{xz} , C_5^{xz} , C_3^{yx} , C_4^{yxz} , C_5^{yxz} , C_3^{xy} , C_4^{xyz} , C_5^{xyz} , C_3^{yx} , C_4^{yxz} , C_5^{yxz} , C_3^{xy} , C_4^{xyz} , C_5^{xyz} – кома, A_2^x , A_3^{xz} , A_4^{xz} , A_2^{xy} , A_3^{xyz} , A_4^{xyz} , A_2^{xy} , A_3^{xyz} , A_4^{xyz} , A_2^y , A_3^{yz} , A_4^{yz} – астигматизму, E_2^x , E_3^{xz} , E_4^{xz} , E_2^y , E_3^{yz} , E_4^{yz} – кривизне поверхности, D_1^x , D_2^{xz} , D_3^{xz} , D_1^y , D_2^{yz} , D_3^{yz} – дисторсии. Явный вид этих aberrационных коэффициентов приведен в Приложении.

Геометрические aberrации объемного ГОЭ. Из характеристической функции $V(x,y,z)$ могут быть определены геометрические aberrации точек изображения. Отклонения Δx , Δy координат пересечения лучей, образующих изображение выбранной точки предмета, от параксиального точечного изображения определяются из формул

$$\begin{aligned}
\Delta x & \approx z_i(\partial V(x,y,z)/\partial x), \\
\Delta y & \approx z_i(\partial V(x,y,z)/\partial y),
\end{aligned} \tag{1}$$

и равны в плоскости изображения [19-25]:

– $\Delta x = B_1^x z_i + (z B_2^{xz} + z^2 B_3^{xz}) z_i$, $\Delta y = B_1^y z_i + (z B_2^{yz} + z^2 B_3^{yz}) z_i$ – при aberrации увеличения предмета (размера изображения);

– $\Delta x = F_2^x z_i x + (z F_3^{xz} + z^2 F_4^{xz}) z_i x$, $\Delta y = F_2^y z_i y + (z F_3^{yz} + z^2 F_4^{yz}) z_i y$ – при осевом астигматизме первого порядка;

– $\Delta x = (S_4^x + 3z S_5^{xz} + 6z^2 S_6^{xz}) z_i x^2/2 + (S_4^{xy} + 3z S_5^{xyz} + 6z^2 S_6^{xyz}) z_i x y^2/2$, $\Delta y = (S_4^y + 3z S_5^{yz} + 6z^2 S_6^{yz}) z_i y^2/2 + (S_4^{xy} + 3z S_5^{xyz} + 6z^2 S_6^{xyz}) z_i x^2 y/2$ – при осевой астигматической aberrаций третьего порядка (эллипсная aberrация);

– $\Delta x = 3(C_3^x + 3z C_4^{xz} + 6z^2 C_5^{xz}) z_i x^2/2 + (C_3^{yx} + 3z C_4^{yxz} + 6z^2 C_5^{yxz}) z_i x y + (C_3^{xy} + 3z C_4^{xyz} + 6z^2 C_5^{xyz}) z_i y^2/2$, $\Delta y = (C_3^{yx} + 3z C_4^{yxz} + 6z^2 C_5^{yxz}) z_i x^2/2 + (C_3^{xy} + 3z C_4^{xyz} + 6z^2 C_5^{xyz}) z_i x y + 3(C_3^y + 3z C_4^{yz} + 6z^2 C_5^{yz}) z_i y^2/2$ – при астигматической aberrации третьего порядка (астигматическая кома);

– $\Delta x = (A_2^x + 3z A_3^{xz} + 6z^2 A_4^{xz}) z_i x + (A_2^{xy} + 3z A_3^{xyz} + 6z A_4^{xyz}) z_i y$, $\Delta y = (A_2^{xy} + 3z A_3^{xyz} + 6z A_4^{xyz}) z_i x + (A_2^y + 3z A_3^{yz} + 6z^2 A_4^{yz}) z_i y$ – при астигматизме третьего порядка;

– $\Delta x = (E_2^x + 3z E_3^{xz} + 6z^2 E_4^{xz}) z_i x/2$, $\Delta y = (E_2^y + 3z E_3^{yz} + 6z^2 E_4^{yz}) z_i y/2$ – при астигматической кривизне поверхности третьего порядка изображения;

– $\Delta x = (D_1^x + 3zD_2^{xz} + 6z^2D_3^{xz})z_i/2$, $\Delta y = (D_1^y + 3zD_2^{yz} + 6z^2D_3^{yz})z_i/2$ – при дисторсии третьего порядка.

Аберрационные коэффициенты для осевого объемного ГОЭ значительно упрощаются. Выражения для коэффициентов $B_1^x, B_1^y, F_2^x, F_2^y, S_4^x, S_4^y, C_3^x, C_3^y, A_2^x, A_2^{xy}, A_2^y, E_2^x, E_2^y, D_1^x, D_1^y$ совпадают с известными коэффициентами тонкого ГОЭ [21,24,25]. Полученные формулы расчета аберраций подтверждают известный факт о линейной зависимости в первом приближении аберраций объемного ГОЭ от толщины [23]. Во втором приближении аберрации ГОЭ зависят от толщины нелинейно. При вычислении коэффициентов объемных аберраций третьего порядка учтены члены разложения пятого порядка, что привело к их уточнению.

Таким образом, учет толщины и неизотропности коэффициентов усадки объемного ГОЭ приводит:

- К различным коэффициентам увеличения в изображении в меридиональной и сагиттальной плоскостях;
- К превращению дефокусировки в осевой астигматизм первого порядка;
- К превращению сферической аберрации в осевой астигматизм третьего порядка, а комы и кривизны поверхности в полевой астигматизм третьего порядка;
- К линейной и нелинейной зависимости от толщины аберраций первого и третьего порядков.

Рассмотрим условия отсутствия аберраций увеличения и дефокусировки. Из условия отсутствия дефокусировки $F_2^x = 0, F_3^{xz} = 0$ получаем в сагиттальной плоскости xOz для осевых координат восстанавливающей и восстановленной волн при заданных координатах опорной и объектной волн [26]

$$\begin{aligned} 1/z_c &= (P_o + 1)/2F, \\ 1/z_i &= (P_o - 1)/2F. \end{aligned} \quad (2)$$

где $F = m_x^2/k\mu(1/z_r - 1/z_o)$ – фокусное расстояние пропускающего объемного ГОЭ, $P_o = \pm m_x^2(z_o/z_r + 1)/k\mu m_z(z_o/z_r - 1)$.

Для отражающего объемного ГОЭ имеем [27]

$$\begin{aligned} 1/z_c &= (Q_o + 1)/2F, \\ 1/z_i &= -(Q_o - 1)/2F, \end{aligned} \quad (3)$$

где $F = m_x^2/k\mu(1/z_r + 1/z_o)$ – фокусное расстояние отражающего объемного ГОЭ, $Q_o = \pm[2(z_o^2/z_r^2 + 1)m_x^2/(z_o/z_r + 1)^2m_z^2 - 1]^{1/2}$. Знаки “плюс-минус” перед параметрами P_o и Q_o указывают на возможность двух схем восстановления, отличающихся заменой местами восстановленной и восстанавливающей волн. Аналогичным образом из условий $F_2^y = 0, F_3^{yz} = 0$ можно получить выражения для расчета осевых координат точечных источников опорной и объектной волн в меридиональной плоскости, отличающиеся от (2) и (3) лишь тем, что вместо коэффициента усадки m_x в них присутствует m_y – коэффициент усадки вдоль оси Oy .

Полученные выражения (2) и (3) могут быть представлены в виде формул:

$1/z_c - 1/z_i = (1/z_c + 1/z_i)/P_o = 1/F$ - для пропускающего объемного ГОЭ,

$1/z_c + 1/z_i = (1/z_c - 1/z_i)/Q_o = 1/F$ - для отражающего объемного ГОЭ.

В отличие от формулы тонкой голограммы из этих формул следует зеркально-линзовая модель объемного ГОЭ [26].

Из условия отсутствия aberrаций увеличения $B_1^x = 0$, $B_2^{xz} = 0$ и $B_1^y = 0$, $B_2^{yz} = 0$ в сагиттальной плоскости получаем значения полевых координат x_c , x_i восстанавливающей и восстановленной волн равные

$$\begin{aligned} x_c &= z_c(k\mu/m_x)[(x_r/z_r^2 \pm x_o/z_o^2)/m_z - (x_r/z_r \pm x_o/z_o)/z_i]/(1/z_c - 1/z_i). \\ \pm x_i &= z_i(k\mu/m_x)[(x_r/z_r^2 \pm x_o/z_o^2)/m_z - (x_r/z_r \pm x_o/z_o)/z_c]/(1/z_i - 1/z_c). \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогичным образом можно получить выражения для расчета координат y_c , y_i точечных источников опорной и объектной волн в меридиональной плоскости, отличающиеся от (4) лишь тем, что вместо координат x_r , x_o и коэффициента усадки m_x в них присутствуют координаты y_r , y_o и коэффициент усадки m_y .

Отношение разницы полевых координат соответствующих точек восстановленной и восстанавливающей волн является коэффициентом увеличения объемного ГОЭ. В общем случае коэффициенты увеличения различны для меридиональной и сагиттальной плоскостей. Объемными aberrациями являются aberrации, получаемые при подстановке рассчитанных по формулам (2), (3), (4) координат в характеристические функции $V_o^v(x,y,z)$, $V_1^v(x,y,z)$, $V_3^v(x,y,z)$ и в формулы (1) расчета геометрических aberrаций.

Таким образом, выражения (2), (3), (4) позволяют в расчетах aberrаций снизить влияние толщины ГОЭ. Это особенно важно для рентгеновских ГОЭ, измерение толщины которых является достаточно трудной задачей, так как может составлять десятки и единицы нанометров.

Расчет осевого объемного ГОЭ. Метод характеристической функции позволяет рассчитать требуемые aberrации в опорной и объектной волнах [21]. Рассмотрим более простую задачу – расчет осевого пропускающего объемного ГОЭ, который применяется для фокусировки рентгеновского излучения и для получения рентгеновских изображений [14,15]. Из условий отсутствия aberrаций увеличения и дефокусировки могут быть рассчитаны положения источников опорной и объектной волн схемы записи.

При расчете осевого пропускающего ГОЭ обычно задаются следующие величины: рабочая длина волны λ_c , положение предметной плоскости z_c (или же плоскости изображения z_i) и требуемый коэффициент линейного увеличения β . Если же заданы фокусное расстояние F и коэффициент линейного увеличения β , то из формулы тонкого ГОЭ можно определить координаты z_c , z_i плоскостей предмета и изображения.

Оптимальная длина волны записи λ_o может быть определена из условия отсутствия сферической aberrации третьего порядка на рабочей длине волны λ_c

$$\lambda_o = \lambda_c(n_o/n_c m_r)[1 + 3(1 - (m_z/m_r)^2)(\beta + 1)^2/(\beta - 1)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

где m_z , m_r – коэффициенты усадок по толщине и вдоль диаметра объемного ГОЭ [26]. При записи осевого объемного ГОЭ двумя сферическими волнами требуется определение оптимальных координат z_r , z_o опорной и объектной волн.

Координаты z_r , z_o источников опорной и объектной волн, записывающих осевой объемный ГОЭ, могут быть найдены из формул, приведенных в [26]

$$\begin{aligned} z_r &= 2\mu F/m_r^2(P_c + 1), \\ z_o &= 2\mu F/m_r^2(P_c - 1). \end{aligned} \quad (6)$$

где $P_c = \pm \lambda_c m_z n_o (\beta + 1) / \lambda_o n_c m_r^2 (\beta - 1)$, $\mu = \lambda_c n_o / \lambda_o n_c$ – отношение длин волн в среде, F – фокусное расстояние ГОЭ, m_r – коэффициент усадки вдоль диаметра.

В том случае, когда в процессе изготовления имеется возможность изменения толщины и диаметра ГОЭ, то оптимальное отношение коэффициентов усадок m_z , m_r должно быть [27]

$$m_z/m_r = [(\beta^2 + \beta + 1 + (\beta^4 + 6\beta^3 + 11\beta^2 + 6\beta + 1)^{1/2}) / 2(\beta + 1)^2]^{1/2}.$$

Выбор значений коэффициентов усадок m_z и m_r , удовлетворяющих этой формуле, позволяет исправить сферическую абберацию пятого порядка. Коэффициенты сферической абберации пятого и седьмого порядков ГОЭ приводятся во многих работах, например [21,26,28].

Световой диаметр D_c объемного ГОЭ может быть определен из условия равенства радиуса сферической абберации седьмого порядка и радиуса центрального максимума дифракции Фраунгофера

$$5S_7 z_i (D_c/2)^7 / 16 = 1,22 \lambda_c z_i / D_c.$$

В этом случае световой диаметр D_c объемного ГОЭ

$$D_c = 2(1,925 \lambda_c / S_7)^{1/8}, \quad (7)$$

где S_7 - коэффициент сферической абберации седьмого порядка.

При диаметре меньше D_c величина аббераций будет определяться дифракцией на краю линзы, при диаметре линзы большем D_c – геометрическими абберациями.

Результаты расчетов трех осевых рентгеновских ГОЭ с одинаковыми фокусными расстояниями $F = 10,0$ мм и коэффициентами линейного увеличения $\beta = -10$ крат представлены в таблице 1. Изменение среднего показателя преломления принято равным $\Delta n = 10^{-3}$, рабочие длины волн λ_c рассчитанных ГОЭ равны соответственно 2,4 нм, 4,5 нм, 13,5 нм. Толщина L_c ГОЭ представлена в таблице 1. Коэффициент усадки по толщине $m_z = 0,83$, а коэффициент усадка m_r вдоль диаметра принят равным единице. Длина волны записи λ_o , значения координат z_r , z_o источников опорной, объектной волн и световой диаметр D_c , вычисленные по формулам (5), (6) и (7), представлены в табл. 1.

Таблица 1

N	λ_c , нм	λ_o , нм	m_z	L_c , мкм	z_o , мм	z_r , мм	D_c , м
1	2,4	3,05	0,83	1,20	33,8	-10,2	4,1
2	4,5	5,73	0,83	2,25	33,8	-10,2	4,4
3	13,5	17,2	0,83	6,75	33,8	-10,2	5,0

Заключение. В настоящей работе на основе метода характеристической функции получены выражения, позволяющие рассчитать объемные aberrации рабочей схемы рентгеновского ГОЭ с учетом aberrаций высших порядков. Показано, что все объемные монохроматические aberrации: дефокусировка, сферическая aberrация, кома, астигматизм, кривизна поверхности и дисторсия имеют компоненты линейно и нелинейно пропорциональные толщине ГОЭ. Выполнены расчеты осевого объемного ГОЭ для рентгеновской области спектра. Показано, что выбором координат источников записывающих опорной и объектной сферических волн, длины волны записи и коэффициента усадки по толщине могут быть исправлены дефокусировка, сферические aberrации третьего и пятого порядков. Оптимальный выбор светового диаметра объемного ГОЭ позволяет уменьшить сферическую aberrацию седьмого порядка до дифракционного предела. Полученные результаты могут быть использованы при разработке осевых объемных ГОЭ с неплоскими поверхностями для рентгеновских проекторов и микроскопов. Авторы благодарят Сандакову Б.Г. за помощь в проверке результатов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кольер, Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; пер с англ.; под ред. Ю.И. Островского. – М.: Мир, 1973. – 688 с.
2. Оптическая голография. Т. 1, 2 / под ред. Г. Колфилда; пер. с англ.; под ред С.Б. Гуревича. – М.: Мир, 1982. – 736 с.
3. Денисюк, Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю.Н. Денисюк // Оптика и спектроскопия – 1963. –Т. 15, № 4.– С. 522–532.
4. Kogelnik, H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // The Bell Syst. Techn. J. – 1969. – V. 48, № 9. – P. 2909–2947.
5. Трехмерная голограмма на реоксанах как узкополосный спектральный селектор / В.И. Суханов, Г.И. Лашков, А.Е. Петников, Ю.В. Ащеулов // Письма в ЖТФ. – 1984. – Т. 10, № 15. – С. 925–928.
6. Высокоэффективные узкополосные спектральные селекторы / А.П. Попов, В.Ф. Гончаров, А.В. Вениаминов, В.А. Любимцев // Оптика и спектроскопия. – 1989. – Т. 66, № 1. – С. 3–4.
7. Голографическая система отображения информации для автомобиля / М.А. Ган, М.В. Тютчев, Ю.Е. Кузилин, В.В. Новосельский, А.П. Павлов // Опт.журн. – 1995. – № 7. – С. 57–60.
8. Carre, G., Loughnot, D. J. Photopolymers for holographic recoding: from standart to self-processing materials // Journ. phys. sec. – 1993. – V. 3, № 7. – P. 1445–1460.
9. Суханов, В.И. Трехмерные глубокие голограммы и материалы для их записи / В.И. Суханов // Опт.журн. – 1994. – № 1. – С. 61–70.
10. Тихонов, Е. А. Новые фотополимерные композиции для записи фазовых голограмм: механизм формирования, голографические и оптические

характеристики/ Е.А. Тихонов, Т.М. Смирнова и др. // Высокоэффективные среды для записи информации. – Л., 1988. – С. 137–144.

11. Объемные фазовые голограммы в светочувствительных системах с капиллярной структурой / В.И. Суханов, М.В. Хазова, Н.С. Шелехов, О.В. Андреева, А.М. Курсакова, Т.С. Цехомская, Г.П. Раскова, Ю.В. Соломатин // Оптическая голография с записью в трехмерных средах. – Л., 1989. – С. 86–104.

12. Sazonov, Yu.A., Shelkovnikov V.V., Pen E.F., Gerasimova T.N. Photopolymer material for recording reflection holograms by He-Ne and Kr lasers // Proc. SPIE. – 2000. – V. 4149. – P. 100–106.

13. Наливайко, В.И. Рентгеноструктурные и оптические исследования изменений в халькогенидных пленках в процессе записи оптической информации / В.И. Наливайко, А.Н. Покровский // Сб. матер. III Междунар. науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2007» – Новосибирск, 2007. – Т. 4, ч. 1. – С. 184–189.

14. Рентгеновская оптика и микроскопия/ под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа; пер. с англ. Н.Н. Зорева и И.В. Кожевникова; под ред. А.В. Виноградова. – М.: Мир, 1987. – 464 с.

15. Мишетт, А. Оптика мягкого рентгеновского излучения/ А. Мишетт; пер. с англ. Н.Н. Зорева и И.В. Кожевникова; под ред. А.В. Виноградова. – М.: Мир, 1989. – 352 с.

16. Передача голографического изображения с помощью фазовой зонной пластинки для рентгеновского излучения/ В.В. Аристов, А.В. Куюмчян, А.Ю. Суворов, Т. Ишикава, А.А. Исоян, К. Труни, Е. Саркисян // Изв. РАН, сер. физ. – 2005. – Т. 69, № 2. – С. 220–222.

17. Виноградов, А.В. Импульсно-периодический лазер на переходе $3p-3s$ Ne-подобного аргона в капиллярном разряде / А.В. Виноградов, Дж.Дж. Рокка // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33, № 1. – С. 7–17.

18. Исследование излучения из спирального ондулятора, установленного на накопителе ВЭПП-2М, как источника для рентгеновской микроскопии и голографии/ Е.С. Глушкин, Г.Н. Кулипанов, Г.Я. Кезерашвили, В.Ф. Пиндюрин, Л.Н. Скринский, А.С. Соколов, П.П. Ильинский // Рентгеновская оптика и микроскопия; пер. с англ.; под ред. Г. Шмаль, Д. Рудольф. – М.: Мир, 1987. – С. 452–461.

19. Forshaw, M.R.B. The imaging properties and aberrations of thick transmission holograms // Opt. Acta. – 1973. – V. 20, № 9. – P. 669–686.

20. Михайлов, И.А. Геометрический анализ толстых голограмм / И.В. Михайлов // Оптика и спектроскопия. – 1985. – № 3. – С. 612.

21. Ган, М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 144 с.

22. Бобров, С.Т. Оптика дифракционных элементов и систем/ С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.

23. Батомункуев, Ю.Ц. Аберрации пропускающих объемных голограмм / Ю.Ц. Батомункуев, Е.А. Сандер, С.А. Шойдин // Материалы Всесоюзного семинара «Автоматизация проектирования оптических систем». – М., 1989. – С. 101–112.

24. Мустафин, К.С. Аберрации тонких голограмм, изготовленных на сферической подложке / К.С. Мустафин // Оптика и спектроскопия. – 1974. – Т. 37. – С. 1158–1162.

25. Meier, R.W. Magnification and third-order aberration in holography / JOSA. – 1965. – V. 55. – P. 987.

26. Батомункуев, Ю.Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой / Ю.Ц. Батомункуев // Автометрия. – 2002. – № 2. – С. 108–114.

27. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет рентгеновской голограммной линзы со сферическими поверхностями: сб. тез. докл. VI Национал. конф. по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов «РСНЭ-2007» / Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков. – М.: ИК РАН, 2007. – 498 с.

28. Грейсух, Г.И. Голографическое формирование зонной структуры дифракционных линз с заданными оптическими характеристиками / Г.И. Грейсух, С.А. Степанов // Голографические оптические элементы и системы. – СПб., 1994. – С. 98–103.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Аберрационные коэффициенты объемного ГОЭ

$$\begin{aligned} -B_1^x &= x_c/z_c - x_i/z_i \pm (k\mu/m_x)(x_r/z_r - x_o/z_o), \quad B_1^y = y_c/z_c - y_i/z_i \pm (k\mu/m_y)(y_r/z_r - y_o/z_o), \\ -B_2^{xz} &= x_c/z_c^2 - x_i/z_i^2 \pm (k\mu/m_x m_z)(x_r/z_r^2 - x_o/z_o^2), \quad B_2^{yz} = y_c/z_c^2 - y_i/z_i^2 \pm (k\mu/m_y m_z)(y_r/z_r^2 - y_o/z_o^2), \\ -B_3^{xz} &= x_c/z_c^3 - x_i/z_i^3 \pm (k\mu/m_x m_z^2)(x_r/z_r^3 - x_o/z_o^3), \quad B_3^{yz} = y_c/z_c^3 - y_i/z_i^3 \pm (k\mu/m_z^2 m_y)(y_r/z_r^3 - y_o/z_o^3), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -F_2^x &= 1/z_c - 1/z_i \pm (k\mu/m_x^2)(1/z_r - 1/z_o), \quad F_2^y = 1/z_c - 1/z_i \pm (k\mu/m_y^2)(1/z_r - 1/z_o), \\ -F_3^{xz} &= 1/z_c^2 - 1/z_i^2 \pm (k\mu/m_x^2 m_z)(1/z_r^2 - 1/z_o^2), \quad F_3^{yz} = 1/z_c^2 - 1/z_i^2 \pm (k\mu/m_y^2 m_z)(1/z_r^2 - 1/z_o^2), \\ -F_4^{xz} &= 1/z_c^3 - 1/z_i^3 \pm (k\mu/m_x^2 m_z^2)(1/z_r^3 - 1/z_o^3), \quad F_4^{yz} = 1/z_c^3 - 1/z_i^3 \pm (k\mu/m_y^2 m_z^2)(1/z_r^3 - 1/z_o^3), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -S_4^x &= 1/z_c^3 - 1/z_i^3 \pm (k\mu/m_x^4)(1/z_r^3 - 1/z_o^3), \quad S_4^y = 1/z_c^3 - 1/z_i^3 \pm (k\mu/m_y^4)(1/z_r^3 - 1/z_o^3), \\ -S_4^{xy} &= 1/z_c^3 - 1/z_i^3 \pm (k\mu/m_x^2 m_y^2)(1/z_r^3 - 1/z_o^3), \quad S_5^{xz} = 1/z_c^4 - 1/z_i^4 \pm (k\mu/m_x^4 m_z)(1/z_r^4 - 1/z_o^4), \\ -S_5^{yz} &= 1/z_c^4 - 1/z_i^4 \pm (k\mu/m_y^4 m_z)(1/z_r^4 - 1/z_o^4), \quad S_5^{xyz} = 1/z_c^4 - 1/z_i^4 \pm (k\mu/m_x^2 m_y^2 m_z)(1/z_r^4 - 1/z_o^4), \\ -S_6^{xz} &= 1/z_c^5 - 1/z_i^5 \pm (k\mu/m_x^4 m_z^2)(1/z_r^5 - 1/z_o^5), \quad S_6^{yz} = 1/z_c^5 - 1/z_i^5 \pm (k\mu/m_y^4 m_z^2)(1/z_r^5 - 1/z_o^5), \\ -S_6^{xyz} &= 1/z_c^5 - 1/z_i^5 \pm (k\mu m_x^2 m_y^2 m_z^2)(1/z_r^5 - 1/z_o^5), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -C_3^x &= x_c/z_i^3 - x_i/z_c^3 \pm (k\mu/m_x^3)(x_r/z_r^3 - x_o/z_o^3), \quad C_3^y = y_c/z_c^3 - y_i/z_i^3 \pm (k\mu/m_y^3)(x_r/z_r^3 - x_o/z_o^3), \\ -C_3^{xy} &= x_c/z_c^3 - x_i/z_i^3 \pm (k\mu/m_y^2 m_x)(x_r/z_r^3 - x_o/z_o^3), \quad C_3^{yx} = y_c/z_c^3 - y_i/z_i^3 \pm (k\mu/m_x^2 m_y)(y_r/z_r^3 - y_o/z_o^3), \\ -C_4^{xz} &= x_c/z_c^4 - x_i/z_i^4 \pm (k\mu/m_x^3 m_z)(x_r/z_r^4 - x_o/z_o^4), \quad C_4^{yz} = y_c/z_c^4 - y_i/z_i^4 \pm (k\mu/m_y^3 m_z)(y_r/z_r^4 - y_o/z_o^4), \\ -C_4^{xyz} &= x_c/z_c^4 - x_i/z_i^4 \pm (k\mu/m_y^2 m_x m_z)(x_r/z_r^4 - x_o/z_o^4), \quad C_4^{yxz} = y_c/z_c^4 - y_i/z_i^4 \pm (k\mu/m_x^2 m_y m_z)(y_r/z_r^4 - y_o/z_o^4), \\ -C_5^{xz} &= x_c/z_c^5 - x_i/z_i^5 \pm (k\mu/m_x^3 m_z^2)(x_r/z_r^5 - x_o/z_o^5), \quad C_5^{yz} = y_c/z_c^5 - y_i/z_i^5 \pm (k\mu/m_y^3 m_z^2)(x_r/z_r^5 - x_o/z_o^5), \\ -C_5^{xyz} &= x_c/z_c^5 - x_i/z_i^5 \pm (k\mu/m_y^2 m_x m_z^2)(x_r/z_r^5 - x_o/z_o^5), \quad C_5^{yxz} = y_c/z_c^5 - y_i/z_i^5 \pm (k\mu/m_x^2 m_y m_z^2)(y_r/z_r^5 - y_o/z_o^5), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -A_2^x &= x_c^2/z_c^3 - x_i^2/z_i^3 \pm (k\mu/m_x^2)(x_r^2/z_r^3 - x_o^2/z_o^3), \quad A_2^y = y_c^2/z_c^3 - y_i^2/z_i^3 \pm (k\mu/m_y^2)(y_r^2/z_r^3 - y_o^2/z_o^3), \\ -A_2^{xy} &= x_c y_c/z_c^3 - x_i y_i/z_i^3 \pm (k\mu/m_x m_y)(x_r y_r/z_r^3 - x_o y_o/z_o^3), \quad A_3^{xz} = x_c^2/z_c^4 - x_i^2/z_i^4 \pm (k\mu/m_x^2 m_z)(x_r^2/z_r^4 - x_o^2/z_o^4), \\ -A_3^{yz} &= y_c^2/z_c^4 - y_i^2/z_i^4 \pm (k\mu/m_y^2 m_z)(x_r^2/z_r^4 - x_o^2/z_o^4), \quad A_3^{xyz} = x_c y_c/z_c^4 - x_i y_i/z_i^4 \pm (k\mu/m_x m_y m_z)(x_r y_r/z_r^4 - x_o y_o/z_o^4), \\ -A_4^{xz} &= x_c^2/z_c^5 - x_i^2/z_i^5 \pm (k\mu/m_x^2 m_z^2)(x_r^2/z_r^5 - x_o^2/z_o^5), \quad A_4^{yz} = y_c^2/z_c^5 - y_i^2/z_i^5 \pm (k\mu/m_y^2 m_z^2)(x_r^2/z_r^5 - x_o^2/z_o^5), \\ -A_4^{xyz} &= x_c y_c/z_c^5 - x_i y_i/z_i^5 \pm (k\mu/m_x m_y m_z^2)(x_r y_r/z_r^5 - x_o y_o/z_o^5), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
- E_2^x &= x_c^2/z_c^3 - x_i^2/z_i^3 \pm (k\mu/m_x^2)(x_r^2/z_r^3 - x_o^2/z_o^3), E_2^y = y_c^2/z_c^3 - y_i^2/z_i^3 \pm (k\mu/m_y^2)(y_r^2/z_r^3 - y_o^2/z_o^3), \\
- E_3^{xz} &= x_c^2/z_c^4 - x_i^2/z_i^4 \pm (k\mu/m_x^2 m_z)(x_r^2/z_r^4 - x_o^2/z_o^4), E_3^{yz} = y_c^2/z_c^4 - y_i^2/z_i^4 \pm (k\mu/m_y^2 m_z)(y_r^2/z_r^4 - y_o^2/z_o^4), \\
- E_4^{xz} &= x_c^2/z_c^5 - x_i^2/z_i^5 \pm (k\mu/m_x^2 m_z^2)(x_r^2/z_r^5 - x_o^2/z_o^5), E_4^{yz} = y_c^2/z_c^5 - y_i^2/z_i^5 \pm (k\mu/m_y^2 m_z^2)(y_r^2/z_r^5 - y_o^2/z_o^5),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
- D_1^x &= x_c^3/z_c^3 - x_i^3/z_i^3 \pm (k\mu/m_x)(x_r^3/z_r^3 - x_o^3/z_o^3), D_1^y = y_c^3/z_c^3 - y_i^3/z_i^3 \pm (k\mu/m_y)(y_r^3/z_r^3 - y_o^3/z_o^3), \\
- D_2^{xz} &= x_c^3/z_c^4 - x_i^3/z_i^4 \pm (k\mu/m_x m_z)(x_r^3/z_r^4 - x_o^3/z_o^4), D_2^{yz} = y_c^3/z_c^4 - y_i^3/z_i^4 \pm (k\mu/m_y m_z)(y_r^3/z_r^4 - y_o^3/z_o^4), \\
- D_3^{xz} &= x_c^3/z_c^5 - x_i^3/z_i^5 \pm (k\mu/m_x m_z^2)(x_r^3/z_r^5 - x_o^3/z_o^5), D_3^{yz} = y_c^3/z_c^5 - y_i^3/z_i^5 \pm (k\mu/m_y m_z^2)(y_r^3/z_r^5 - y_o^3/z_o^5).
\end{aligned}$$

© Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков, 2008

УДК 681.7:681.2

Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

ГИБКАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ – МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ, ЦЕЛИ И МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ. ТЕРМИНОЛОГИЯ

B.E. Shlishevsky, A.N. Sosnov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

FLEXIBLE AUTOMATION OF MACHINING IN OPTO-MECHANICAL INSTRUMENT-MAKING, GOALS AND METHODS. TERMINOLOGY

The main points are stated as concerns flexible automation of machining for serial production in optical instrument-making under the market economy conditions. It has been found out that as things now stand, automation may be introduced on the basis of now available multipurpose production equipment with CNC control using its technological and time potential. The article presents the main types and development stages of CNC and automated equipment based on it.

Комплексная автоматизация производства это основное направление технического прогресса в промышленности. [1]

Основной целью автоматизации при обработке конструкционных материалов в оптическом приборостроении в условиях серийного производства является мобильность и экономически рентабельная адаптация к рыночному спросу, т.е. к изменению номенклатуры и величины партии обрабатываемых деталей.

Немаловажным является социальный аспект проблемы: облегчение условий труда, его облагораживание и интеллектуализация, а так же повышение и стабилизация качества изделия, т.е. управление качеством продукции в процессе обработки.

Эти компоненты при автоматизации достигаются надежнее и эффективнее, чем при использовании универсальных станков с ручным управлением.

Выпускающиеся, до последнего времени технологические машины – станки и станочные системы для серийного производства располагают практически неограниченной гибкостью, т.к. представляют собой в большинстве случаев универсальное оборудование ограниченной функциональности – токарные, фрезерные и другие станки с ручным управлением. В этих станках и системах основной является проблема автоматизации всех функций, при сохранении существующей гибкости. Автоматические станки существуют уже давно. Их создают для выпуска

деталей без участия человека. Управление отдельными механизмами станка осуществлялось, в основном, с помощью жестких программносителей - комплектов специальной оснастки: эксцентриков – кулачков, копиров, упоров, путевой электроавтоматики. Оснастка изготавливалась для каждой конкретной детали отдельно. Перенастройка автоматов вызывала значительные затраты средств и времени. К такому оборудованию относятся широко используемые в промышленности автоматы: токарные, токарно-револьверные, продольно-фасонного точения, холодно – высадочные и многие другие типы оборудования.

В условиях массового производства на протяжении многих десятилетий наиболее эффективными технологическими системами являются специализированные станки – автоматы и автоматические линии с «жесткими» системами управления, построенные по агрегатному принципу из унифицированных узлов и предназначенные для обработки определённых деталей. Целесообразность «жесткой» автоматизации для стабильного производства больших партий деталей в обозримом будущем для многих производств не вызывает сомнений, однако их адаптация даже к незначительным изменениям конструкции изделий является чрезвычайно трудным (и практически невозможным) делом.

Во многих случаях промышленность всё больше нуждается в новых системах автоматизации, в которых во внимание принимались бы как выше указанные обстоятельства, так и следующие факторы:

В связи с тем, что 75 – 80 % всей продукции машиностроения и приборостроения выпускается и большими финансовыми затратами малыми и средними сериями, автоматизация такого производства связана с большими затруднениями. В то же время с каждым годом сроки коммерческой эксплуатации любого вида продукции сокращается, номенклатура растёт, а изделия систематически подвергаются конструктивному совершенствованию и модернизации. Значительная часть специальных средств производства, площадей и сложной технологической оснастки используется не полностью.

Высокая стоимость кредитов и незавершённого производства исключает хранение избыточных запасов заготовок и готовых деталей.

Следовательно, создание гибких технологий и автоматического оборудования для серийного изготовления продукции с эффективностью и преимуществами близкой к массовому производству является весьма актуальной и важной задачей. Путь к ее решению занял почти сорок лет и был многотрудным. Исследования в достижении поставленной цели были постоянно и неразрывно связаны с важнейшими достижениями научно – технической революции XX века. Ими занимались специалисты всех развитых стран. Требовались новые подходы и решения. И они были найдены на стыке механики, электроники, электротехники, гидравлики, вычислительной техники, технологии машиностроения, автоматики, автоматизации и других наук. За указанный период было создано, апробировано и освоено производством несколько поколений и разновидностей принципиально новых систем автоматического управления на основе цифровой техники (без жестких программносителей), которые отличались элементной базой,

функциональностью, способами программирования, программоносителями и имели узко специализированную аппаратную структуру для управления технологическими функциями конкретных типов или моделей металлообрабатывающих станков. Эти системы управления получили обобщенное наименование «Устройство числового программного управления» (УЧПУ). Сочетание системы станок – УЧПУ, обусловило необходимость в разработке многих сотен и тысяч оригинальных, ранее не известных, технических решений по коренной реконструкции и усовершенствованию всех типов технологического оборудования и аппаратуры для его состыковки с УЧПУ, по проектированию прогрессивных технологий, включая работу по созданию и внедрению принципиально новых, на порядок более производительных, режущих инструментов и другого технологического оснащения (например, приборов для предварительной настройки инструментов вне станка). Разработаны принципиально новые типы станков – автоматов и полуавтоматов – многоцелевые станки сверлильно – фрезерно – расточной группы и на два десятилетия позже – токарной группы для обработки деталей из стали, чугуна, цветных металлов и их сплавов, пластмасс, металлов армированных стекловолокном и иных конструкционных материалов. В международной практике их именуют соответственно обрабатывающий центр (ОЦ) и токарный обрабатывающий центр (ТОЦ).

Наиболее широкое применение на практике получили станки, оснащенные УЧПУ типа NC (NumericalControl), которые в результате их эволюционного развития позволили достичь сравнительно широких технологических возможностей: линейной (в трех осях) и линейно-круговой интерполяции, коррекции положения инструментов, выдача на станок большого числа необходимых команд и ряд других. Станки с NC УЧПУ имели большую мощность, жесткость и число оборотов шпинделя, чем универсальное оборудование с ручным управлением; работали в полуавтоматическом или автоматическом (при наличии соответствующих загрузочных устройств) цикле, что позволяло обеспечить многостаночное обслуживание, стабильно повторяемую точность обработки, повышение производительности и комфортности труда оператора.

Первые поколения упомянутого оборудования сыграли положительную роль в прогрессе механической обработки и в обеспечении, но в ограниченных пределах, гибкости производства. Однако NC УЧПУ и станки на их основе имели существенные недостатки: не позволяли непосредственно на рабочем месте у станка редактировать и совершенствовать управляющие программы (УП), адаптироваться к изменениям условий производства; отсутствовали оперативно-запоминающие устройства (ОЗУ) для хранения УП, а так же дисплей или развитый пульт управления с элементами цветовой индикации и другие средства визуализации. Проектирование УП, ее кодирование и отладка были сложным, трудоемким и, в то же время, рутинным процессом; недостаточно надежно функционировала релейная автоматика связи УЧПУ - приводы станка. УЧПУ и релейная автоматика выполнялись в виде отдельно

стоящего шкафа, что создавало неудобство в эксплуатации, увеличивалась занимаемая производственная площадь. Цена станков резко возросла, что не всегда обеспечивало нормативный срок их окупаемости.

Но главным недостатком системы НС была невозможность изменить и расширить первоначально заложенные в них функциональные возможности, так как это требовало изменения электрической схемы самого устройства. Этим обуславливалась ограниченная мобильность и гибкость первых поколений УЧПУ. В то же время, можно отметить, что в станки с НС УЧПУ на многих предприятиях эксплуатируются до настоящего времени, по-видимому, в связи с отсутствием финансовых средств для их замены.

Предпосылки оптимального решения проблем гибкой автоматизации технологического оборудования появились в середине 80-х годов прошлого столетия в результате создания микро и мульти микропроцессорных УЧПУ, построенных по структуре универсальных мини ЭВМ, но во много раз меньшие по габаритам и по стоимости, обладавшие на порядок, и более, мощными вычислительными возможностями. Их именуют CNC (Computer Numerical Control). Наиболее важной отличительной особенностью систем ЧПУ с микропроцессорным управлением является многообразие задач, которые они способны решать. Рабочие функции в CNC УЧПУ выполняются не аппаратно, а так называемым «математическим обеспечением», т.е. программой хранящейся в памяти микропроцессора. Эта программа в определенных пределах может меняться и адаптироваться без физического изменения конструкции схемы.

Таким образом, появление микропроцессоров, как оригинального перепрограммируемого элемента памяти, открыло новую эпоху в методах управления технологическим оборудованием, а микроЭВМ на их основе, стали важнейшим элементом современных электронных управляющих устройств станками, машинами и системами машин. CNC УЧПУ за счет мощного программно-математического обеспечения радикально повысили гибкость, функциональность и, что особенно важно, надежность (наработка на отказ 6-18 тыс. часов) эксплуатации станков типа ОЦ и ТОЦ.

CNC УЧПУ обеспечивают линейную, круговую, цилиндрическую, спиральную, винтовую, параболическую интерполяцию; оснащены цветным дисплеем размером до 18 дюймов для визуализации процесса обработки или другой «защитой» в УЧПУ информации; развитым пультом управления с квазисенсорными виртуальными клавишами; обладают постоянной и оперативной памятью до 60 Мбайт и выше (по желанию заказчика). Обеспечивают: работу УП без ее прогона на станке с имитацией процесса обработки на экране дисплея (без реальной заготовки и инструмента) с контролем геометрических размеров, при необходимости, электронной лупой до 1000 крат; максимальную мобильность, гибкость. Позволяют в автоматическом режиме реализовать практически все функции технологического процесса: управление по 2 – 27 осям, в том числе интерполяцию одновременно по 2 – 6 осям, дискретность ввода – вывода информации до 0,01 – 0,005 мкм; высокие и высочайшие значения холостых и рабочих ходов, соответственно до 60 – 80 м/мин (холостые ходы органов подачи

инструмента до врезания в заготовку) и (вращение шпинделя станка) до 90000 мин⁻¹, большой диапазон их регулирования; могут хранить в оперативной памяти большое количество - до 99 управляющих программ и до 999 подпрограмм; работать без перфоленты или другого внешнего программносителя от ОЗУ; имеют входы- выходы подключения к ЭВМ более высокого уровня для трансляции, хранения и ретрансляции УП.

Наличие большой постоянной памяти в УЧПУ и широкого спектра вспомогательных функций G (от 40 до 200); техники «меню», автоматических циклов обработки (продольный и торцовый съем припуска при работе резцами или фрезами, нарезание резьбы до М64, глубокое прерывистое сверление, прорезка канавок различной конфигурации); циклов чистовой обработки, многократного повторения контура, разгона и торможения (до 10 м/с²), циклы «привязки» инструментальных узлов станка к нулевым точкам; циклы врезания в заготовку и другие; параметрические подпрограммы обработки - до 99; большое количество макрокоманд; возможность ввода информации в УЧПУ на символьном языке; многоцветного дисплея и других средства визуализации с выводом на экран необходимых справочных цифровых, графических, текстовых, схемных, расчетно-аналитических и иных информационных материалов, что позволяет многократно упростить и ускорить процесс разработки, отладки УП, ее совершенствование и адаптацию к изменяющимся условиям производства [2].

Много осевая объемная интерполяция обеспечивает обработку на ОЦ и ТОЦ практически всей номенклатуры многомерных базовых, точных деталей сложно-контурной формы используемых в машино-приборостроении.

Появилась возможность оснащать ОЦ и ТОЦ богатым набором периферийных устройств: для автоматического накопления заготовок и подачи их в рабочую зону; для контроля инструмента, изделия, состояния процесса обработки; для диагностики, мониторинга и визуализации процесса обработки; для диалоговой разработки и ручного ввода непосредственно на рабочем месте управляющих программ; для коррекции и совершенствования УП; для управления роботами, транспортно-накопительными системами заготовок и инструмента; для опознавания кода деталей считывающим устройством; для автоматической коррекции износа режущих кромок инструмента и выполнения функций адаптивного управления; для решения широкого круга расчетно-аналитических задач.

К настоящему времени создано и эксплуатируются пять базовых поколений (и множество их разновидностей) многофункциональных CNC УЧПУ, для управления металлообрабатывающим оборудованием, которые сверх надежно обеспечивают решение практически всего спектра задач по резкому повышению производительности обработки и гибкости производства не только при условиях средне и крупно серийного производства, но и при обработке единичных изделий или заготовок мелкими сериями. [3]

Современные УЧПУ оснащены системами автоматизированного проектирования, а так же аппаратурой для разработки УП на новую деталь без

остановки процесса механической обработки партии заготовок выполняемой на станке. Ряд зарубежных фирм освоили выпуск, так называемых, «интуитивных» УЧПУ (пятого поколения). Они предназначены для автоматического проектирования фрагментов УП и управления станками типа ОЦ при обработке заготовок средних и крупных размеров с иррегулярной поверхностью из литья в землю и кузнечных поковок, со значительными величинами разброса размеров припусков. В оптическом приборостроении подобные заготовки - редкость и составляют не более 0,005 % от всей номенклатуры деталей. Более детальное исследование развития конструктивных и функциональных возможностей современных УЧПУ, включая и «интуитивные», – предмет отдельного рассмотрения.

Следует отметить, что расширение функциональности и технологических возможностей оборудования и систем ЧПУ является одним из концептуальных положений Гибкой автоматизации. Эта концепция способствовала тому, что за сравнительно короткий срок (15 – 20 лет) на основе блочно – модульного принципа создана гамма станков – автоматов с ЧПУ по всем типам металлорежущих станков. Эти станки в условиях серийного производства могут обеспечивать реализацию прогрессивных схем обработки деталей, перечисленных ранее и свойственных, как правило, массовому производству.

Таким образом, сложилась ситуация, при которой обработку корпусных и других сложных, многомерных деталей в условиях массового и, в ряде случаев, крупносерийного производства экономически выгодно выполнять на традиционном оборудовании с жёсткими системами управления. Это оборудование постоянно совершенствуется и развивается. При этом оно часто интегрирует в себе отдельные элементы, заимствованные из техники ЧПУ, что повышает его гибкость и технологические возможности. Но в объёме выпуска автоматических станков доля жёстко программируемого специального и автоматического оборудования увеличивается незначительно.

В то же время работы по внедрению в производство гибкой автоматизации за рубежом во всех типах производства, но особенно в серийном (мелко-, средне-, - крупном), получают приоритетное развитие; существенно возросла надёжность и производительность станков с УЧПУ и сервисных устройств к ним (роботов, манипуляторов, автоматического транспорта и других). Рассмотрим некоторые обобщённые технологические возможности многоцелевых станков [4].

Современные ОЦ и ТОЦ это системы механотроники самого высокого уровня. Они компактны, эргономично оформлены, имеют мощные высокодинамичные приводы; жёсткую конструкцию станины и всех узлов, термосимметричные направляющие и шпиндельный узел; снабжены большим количеством разнотипных инструментов и автооператорами для их последовательной замены по УП.

Многоцелевые станки воплощают идею концентрации и комбинации операций, широко функциональны и универсальны. ТОЦ и ОЦ обеспечивают одноточечное расположение оборудования в пространстве, 3-х – 6-ти стороннюю обработку, позволяют интегрировать и выполнять все или

большее число разнородных технологических операций, например: получистовое и чистовое точение и растачивание, фрезерование всеми типами фрез, сверление, рассверливание, зенкерование, развёртывание, резьбонарезание метчиками и фрезами, и др. непрерывно, за один установ заготовки, без её перемещения по цеху, что во много раз позволяет сократить длительность цикла производства и стабилизирует точность обработки.

Изготовление объёмно-сложных по форме, многомерных корпусных деталей и не центровых тел вращения может быть осуществлено полностью за один установ на одном станке или в гибкой технологической ячейке из двух станков последовательно или последовательно параллельно в автоматическом цикле. Существенно уменьшается потребность в квалифицированной рабочей силе. Практически полностью исключается ручной труд на вспомогательных и машинных переходах обработки, ликвидируются (или сводятся до минимума) межоперационные транспортные, контрольные, установочные и разметочные операции, складирование и пролёживание заготовок. Отпадает необходимость в многочисленных перемещениях заготовок по цеху и в большой номенклатуре дорогой специальной оснастки; обеспечивается возможность многостаночного обслуживания. В результате достигаются преимущества, свойственные поточному крупносерийному производству.

Для повышения законченности цикла обработки и повышения уровня автоматизации и функциональности многоцелевые станки типа ОЦ оснащают одно и двух - поворотными столами, различными поворотными головками, в том числе многошпиндельными, для углового сверления и фрезерования; устройствами для автоматической замены спутников с заготовками и обработанными деталями. Станки типа ТОЦ комплектуют двумя и, реже, тремя револьверными головками, в том числе, с приводными инструментами и механизмом кругового позиционирования шпинделя - осью С в дискретном режиме 0 - 360 градусов.

Оба типа многоцелевых станков комплектуют различными системами активного автоматического контроля: деталей, инструментов, процесса обработки, самодиагностики УЧПУ и станка.

Перечисленные компоненты выдвигают ОЦ и ТОЦ на передний план в технологии гибкой автоматизированной обработки деталей объёмно-сложной формы.

Многоцелевые станки и, во многих случаях, одноцелевые станки с CNC – ЧПУ являются первым уровнем гибкой автоматизированной обработки. Максимальное освоение их экономического потенциала по времени работы и техническим возможностям потребителями создаёт предпосылки для интенсивной разработки гибких технологий более высокого уровня: робототехнических комплексов (РТК), гибких производственных модулей (ГПМ), гибких производственных систем (ГПС).

Многоцелевые станки, в ряде случаев, целесообразно комплектовать промышленными роботами, автоматическими манипуляторами или системой спутников с установленными на них заготовками вне рабочей зоны станка. Универсальные станки, управляемые от УЧПУ, ОЦ и ТОЦ за рубежом (по их

значимости в машино- и приборостроении) сравнивают с созданием паровой машины, автомобиля, самолёта, а гибкое автоматизированное производство (ГАП) – с достижениями космической техники.

Эти достижения позволили перейти к качественно более прогрессивному этапу технологии и организации производства, который в литературе всё чаще определяется термином «Гибкая автоматизация».Ниже приводится их терминология (табл. 1).

Таблица 1. Терминология

Обозначение		Определение
Русское	Международное	
Гибкие производственные системы (ГПС)		
ГПС	FMS	Гибкая производственная система (это обобщающий термин для всех уровней гибкой автоматизации) – совокупность оборудования с УЧПУ (ГПМ, станки, транспорт и т.д.) с управлением от ЭВМ, обладающая свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.
ГПМ	FMM	Гибкий производственный модуль – обрабатывающий центр с накопителем заготовок, магазином инструмента и автоматическим осуществлением всех функций. Понятие ГПМ относится и к робототехническому комплексу, если предусмотрена возможность встраивать его в ГПС более высокого уровня.
ГАЛ		Гибкая автоматическая линия – ГПС, в которой оборудование расположено в заданной последовательности технологических операций
ГАУ		Гибкий автоматизированный участок – ГПС, в которой предусмотрено изменение последовательности использования технологического оборудования.
ГАЦ	FMF	Гибкий автоматизированный цех – ГПС для изготовления изделий (узлов) заданной номенклатуры, включающая в себя несколько ГАУ или ГАЛ с общей транспортной и складской системой.

В дореформенные годы в нашей стране проводились серьёзные теоретические и прикладные исследования, включая опытно – конструкторские работы повнедрению гибкой автоматизации в машино – приборостроении. При рыночных преобразованиях результаты этих работ существенно замедлились или совсем приостановились. Многие достижения и накопленный опыт утеряны или не востребованы. Однако гибкая автоматизация в технологии металлообработки – необратимая ценность. Это определяет насущную необходимость ее более интенсивного и широкого промышленного

использования. Здесь, по-видимому, целесообразно использовать стимулирующие и координирующие воздействия государственных институтов, как это принято во всех промышленно развитых странах. Одними из необходимых мер, в этом плане, являются: многократное усиление государственной поддержки инновационной активности машино-приборостроения; стимулирования научно-технического прогресса за счет увеличения бюджетных ассигнований (и жесткий контроль их целевого использования); освобождение от налога на доходы из прибыли предприятий для приобретения оборудования и освоения новейших технологий, включая финансирование комплексных мероприятий по внедрению гибкой автоматизации механического производства, как весьма трудоемкого.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штаймхимлер Р. Концепция технологии 90-х годов. Автоматика и робототехника. Р. Штаймхимлер Модерн Индустрии (Германия) и Ост Контакт (Швейцария). – 1990. – № 2. – С. 12–18.

2. Шлишевский, Б.Э., Микропроцессорные устройства ЧПУ и Гибкая автоматизация оборудования в оптическом приборостроении. Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов, Е.Е. Трифионов. – Новосибирск: НИГАиК, 1989. – 143 с.

3. Каталоги и проспекты, материалы симпозиума фирм производителей УЧПУ за 2002–2006 год: Hajdenchajn, Siemens, Boch, Traub, Gildemejster (ФРГ); Fanuc, Jmazaki, Okuma (Япония); Facor (Испания) Num (Франция).

4. Каталоги, проспекты и материалы симпозиумов (по ОЦ и ТОЦ) станкостроительных фирм: ОАО «СТЕРЛИТОМАК - М. Т. Е.», ОАО «ИЗТС», ОАО «Красный пролетарий», ОАО «РСЗ» (Россия); Heckler – Koch, Hüller – Hille, BurkhardtundWeber, Maho, F. Werner, Ex – Cell – O, Mauser, Traub, Gildemeister (ФРГ); CincinnatiMilackron, Kearney + Trecker, HAASAUTOMATION (США); Oerlikon, Wyssbrod, Wahli (Швейцария); Olivetti, Mandelli (Италия); MitsuiSeiki, Roki – Rorki, Makino, Tayoda, OKUMA (Япония); Bridgenort (Англия). 2004 – 2007 г.

© Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов, 2008

УДК 681.782.44

О.Я. Абель

ФСТ Лтд., Израиль

П.И. Петров

СГГА, Новосибирск

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С ИНВЕРТИРОВАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

O. Abel

FST Ltd., Israel

P.I. Petrov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

A REFLECTIVE INTERFEROMETER HAVING AN INVERTED DISTRIBUTION OF INTENSITIES

A method of inverting of distribution intensities in a multi-beam interferometer is described. The method is based on spatial filtering of an image and allows increase a signal/noise ratio.

Измерение смещения одного зеркала интерферометра относительно другого возможно осуществлять лишь в отраженном свете, где интерференционная картина представляет собой узкие темные минимумы на светлом фоне, что подразумевает значительную засветку фотодетектора, а, следовательно, повышает уровень дробовых шумов, поэтому предпринимаются попытки снизить уровень шумов инвертированием интерференционной картины.

Одним из направлений применения высокочувствительных интерференционных измерений является детектирование и измерение сверхмалых подвижек земной коры и тектонических плит, вызванное гравитационными волнами при возможных взрывах сверхновых звезд в Нашей Галактике (проекты ТАМА-300 в Японии, LIGO в США, VIRGO в Италии и др.).

Чувствительность классического интерферометра Майкельсона оказалось недостаточной, поэтому схема интерферометра была изменена.

В обычном интерферометре Фабри-Перо в проходящем свете наблюдаются узкие максимумы на темном фоне, в свете отраженном, в котором и возможно измерение смещений одного зеркала относительно другого, наблюдается так называемая дополнительная картина – узкие темные минимумы на сплошном светлом фоне.

Такая картина увеличивает постоянную засветки фотодетектора, иными словами, повышает уровень дробовых шумов, поэтому предпринимаются попытки снизить уровень шумов чисто оптическими методами, а именно - инверсией многолучевой интерференционной картины.

Под руководством Ю.В. Троицкого в Новосибирском Академгородке разработаны так называемые интерферометры с согласованным передним зеркалом. Переднее зеркало выполняют асимметричным – коэффициент отражения со стороны источника света стремится к нулю, а со стороны второго зеркала стремится к единице.

Такая асимметрия достигается благодаря сочетанию многослойного диэлектрического покрытия с поглощающей пленкой. Вследствие целого ряда причин, подробно проанализированных в (1,2), крутизна интерференционных полос в несколько раз ниже, чем в классическом ИФП.

Авторами настоящей работы сделана попытка получить инвертированную картину более простым способом - устранить нулевую составляющую методом пространственной фильтрации (3,4,5).

Рассмотрим разработанный метод более подробно.

ИФП представляет собой две плоско-параллельные пластины, которые наклонены друг относительно друга под некоторым небольшим углом. При освещении ИФП плоским пучком возникает две интерференционные картины – в проходящем и отраженном свете, причем эти картины являются дополнительными, т. е. максимумам картины в отраженном свете соответствует минимум в свете проходящем, и наоборот. В проходящем свете интерференционная картина представляет собой узкие светлые полосы, разделенные широкими темными промежутками, в отраженном свете наблюдается дополнительная картина – на сплошном светлом фоне видны узкие темные полосы.

В проходящем свете несколько спектральных линий, соответствующих различным длинам волн, дают отдельные системы полос. В отраженном свете система широких светлых полос, соответствующих различным длинам волн, накладываются друг на друга, и либо резко падает контраст картины, либо она вообще пропадает. Поэтому при анализе немонахроматического излучения ИФП может быть использован только в проходящем свете.

В ряде случаев второе зеркало интерферометра является глухим, т. е. имеет коэффициент отражения почти 1, и спектральные измерения с таким интерферометром невозможны.

В настоящей работе предложено расширение функциональных возможностей способа наблюдения интерференционной картины в отраженном свете при помощи ИФП, включающее разложение отраженного от ИФП светового пучка в пространственный спектр при помощи наклона одного из зеркал ИФП относительно другого зеркала на малый угол α , фокусировку отраженного светового пучка объективом и подавление нулевого пространственного порядка при помощи поглощающей диафрагмы, причем угол наклона α выбирают из условия:

$$\alpha \geq 1,22\lambda / D,$$

где λ – наибольшая длина волны зондирующего излучения;

D – световой диаметр зеркал ИФП.

Отраженные от ИФП лучи образуют последовательность колебаний:

$$S_0 = a * \rho' * e^{-i\delta'} \quad (1)$$

$$S_1 = a * (\tau')^2 * \rho' * e^{i\delta'} * e^{-i\delta'} \quad (2)$$

$$S_2 = a * (\tau')^2 * \rho' * (\rho')^2 * e^{i\delta'} * e^{-2i\delta} \quad (3)$$

$$S_3 = a * (\tau')^2 * \rho' * (\rho')^4 * e^{i\delta} * e^{-3i\delta} \quad (4)$$

$$S_j = a * (\tau')^2 * \rho' * (\rho')^{2(j-1)} * e^{i\delta} * e^{-ji\delta} \quad (5)$$

где a – амплитуда падающего колебания;

ρ и τ – коэффициенты отражения и соответственно пропускания;

ρ' и τ' – амплитудные коэффициенты отражения и пропускания зеркальных слоев;

S_j – j -е световое колебание, отраженное от поверхности пластины.

Если каким-то образом исключить из прогрессии её нулевой член,

$$S_0 = a * \rho' * e^{-i\delta'}, \quad (6)$$

то оставшаяся часть образует бесконечно убывающую геометрическую прогрессию, сумма членов которой равна:

$$S_p = \sum_{j=1}^{\infty} S_j = a * (\tau')^2 * \rho' * e^{i\delta'} * \frac{1}{1 - (\rho')^2 * e^{-i\delta'}} \quad (7)$$

Заменив в последнем выражении комплексные величины на действительные и умножив на комплексно-сопряженную величину, найдем распределение интенсивностей в отраженном свете:

$$I = I_0 * \rho * \frac{\tau^2}{(1 - \rho^2) + 4\rho * \sin^2(\delta/2)}. \quad (7)$$

Последнее выражение имеет точно такой же вид, что и распределение интенсивностей в прошедшем свете. Это означает, что исключение светового пучка нулевого порядка, например, при помощи фокусирующего объектива и поглощающей диафрагмы, позволяет инвертировать распределение освещенностей интерференционной картины.

Осуществление заявленного способа поясняется с помощью устройства, представленного на рис. 1.

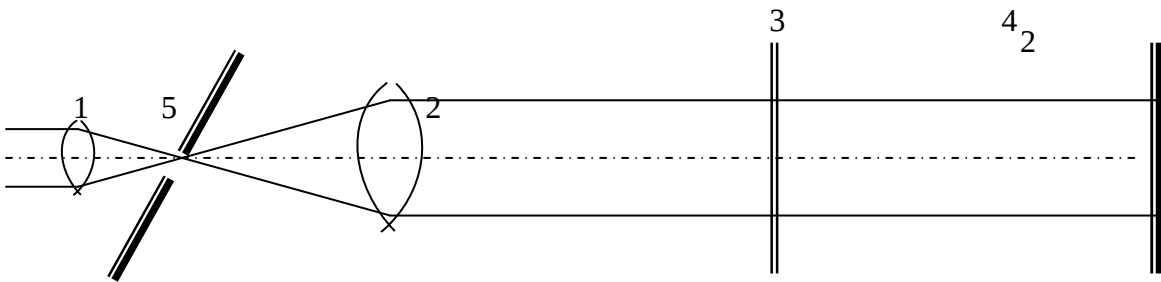


Рис. 1. Оптическая схема ИФП

Устройство содержит объективы 1 и 2, при помощи которых получают коллимированный пучок излучения, зеркала интерферометра 3 и 4, зеркало 5 с отверстием, при помощи которого происходит фильтрация нулевого отраженного пучка, причем объективы расположены конфокально, и с их общим фокусом совпадает отверстие в зеркале.

Экспериментальная проверка предлагаемого способа осуществлена при помощи гелий-неонового лазера ЛГ-79, микрообъектива с фокусом 15 мм и объектива со световым диаметром 50 мм и фокусным расстоянием 400 мм из комплекта оптической скамьи ОСК-2 и двух плоско-параллельных пластинок со световым диаметром 50 мм и коэффициентом отражения 60 % и 98 %. Интерферограммы, полученные в отраженном свете с не исключённой (а) и исключенной (б) нулевой компонентой, представлены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Исходная и инвертированная интерферограммы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Троицкий, Ю.В. Упрощение расчета высокочастотных многолучевых отражающих интерферометров [Текст] / Ю.В. Троицкий // Оптический журнал. – 2002. – т. 69, № 6. – С. 47–52.
2. Троицкий, Ю.В. Отражательный интерферометр с трансмиссионной характеристикой как элемент интерференционных детекторов гравитационных волн [Текст] / Ю.В. Троицкий // Оптика и спектроскопия. – 2005. – т. 98, № 1. – С. 135–141.
3. Заявка № 2005136174 Российская Федерация, МПК G 02 B 5/30. Способ наблюдения многолучевой интерференционной картины в отраженном свете при помощи интерферометра Фабри – Перо [Текст] / Носков М.Ф. (РФ);

заявитель СГГА; пат.поверенный Тырышкина Е.П.; заявл. 21.11.2005. Положительное решение о выдаче патента РФ № 2005136174/28. Патент на изобретение № 2302612 от 10.07.2007 г.

4. Носков, М.Ф. Двухлучевой интерферометр повышенной чувствительности для регистрации сверхмалых подвижек тектонических плит [Текст] / М.М. Кузнецов, М.Ф. Носков // Известия вузов. Горный журнал. – 2007, № 4. – С. 58–61.

5. Носков, М.Ф. Повышение отношения сигнал/шум при создании высокочувствительных интерференционных детекторов гравитационных волн [Текст] / М.Ф. Носков // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 7. – С. 78.

© О.Я. Абель, П.И. Петров, 2008

УДК 681.7

О.Я. Абель

ФСТ Лтд., Израиль

П.И. Петров

СГГА, Новосибирск

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

O. Abel

FSTLtd., Israel

P.I. Petrov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

HIGH-PRECISION INTERFERENTIAL MEASUREMENTS OF SURFACE SHAPE OF OPTICAL PARTS

A method of a precision increasing in a multi-passing interferometer is described that based on an optimizing of numbers of passing at which the sensitivity of the measurements is maximum.

Точность измерений повышается путём многократного переотражения зондирующего излучения между эталонной и исследуемой поверхностью. Учитывание фактора видности интерференционной картины V_n , позволяет оптимизировать метод путём выбора числа проходов n из соотношения $n \cdot V_n$, при котором чувствительность измерений максимальна.

Точность определения координат интерференционных полос от их расчётных координат определяет точность измерения формы оптических поверхностей интерференционным методом. Многократно переотражая излучение между эталонной и исследуемой поверхностями, а затем, сводя эти лучи, мы можем получить интерференционную картину излучения между эталонной и исследуемой поверхностями. Она образуется между исходным и одним из многократно отражённых от исследуемой поверхности лучей.

При этом, чувствительность измерений прямо пропорциональна числу отражений от исследуемой поверхности, однако, многократные отражения повышают уровень шумов, таким образом, что интерференционные полосы перестают быть видны на их фоне.

Предлагаемое решение приведённого противоречия состоит в определении оптимального количества проходов (отражений от исследуемой поверхности) следующей последовательностью действий, при которой сначала нужно измерить интенсивность максимума $I_{\max}$ и минимума $I_{\min}$ интерференционных полос для каждого числа n отражений от исследуемой поверхности, а затем

рассчитать видность интерференционной картины $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ для каждого из n проходов. Интерференционные измерения оптимальны при таком количестве проходов n , при которых величина

$$n \cdot V_n \quad (1)$$

максимальна.

Чувствительность измерительного устройства dI/dx , где dI есть изменение сигнала на входе, а dx – вызвавшее его изменение измеряемой величины. В терминах интерферометрии величина dx – это изменение оптической разности хода при однократном прохождении или отражении излучения от исследуемого объекта.

Величина dI ($dI/I_{\max}$) – изменение интенсивности интерференционной картины.

Распределение интенсивностей в полосах многопроходовых интерферометров

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{пад}} \cdot \cos^2(n \cdot \Delta/2); \quad (2)$$

где $I_{\text{пад}}$ – интенсивность падающего на интерферометр потока, а $I_{\text{пр}}$ – интенсивность проходящего через интерферометр потока.

Продифференцировав выражение (2) и определив экстремум чувствительности, можно убедиться, что чувствительность максимальна при $\max n \cdot V_n$.

Экспериментальная проверка была проведена с использованием гелий-неонового лазера ЛГ-38 (мощностью 50 мВт), микрообъектива с фокусом 20 мм, коллимирующего объектива с фокусным расстоянием 400 мм и световым диаметром 50 мм и двух плоскопараллельных пластинок со световыми диаметрами 60 мм имеющими коэффициент отражения = 80. Интенсивность I в $\max$ и $\min$ интерференции измерялись фотодиодом ФД-24К. Для использования максимально возможной площади фотодиода, настройку производили на 3 интерференционные полосы. При одном отражении видность картины составила 0,8, при двух отражениях – 0,7, при трёх – 0,61, при четырёх – 0,49, при пяти – 0,41, при шести – 0,29, при семи – 0,15, при восьми отражениях интерференционная картина исчезла. Таким образом, продемонстрировано, что четыре или пять проходов оптимальны, что согласуется с критерием выражения (1).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

G.A. Kurilenko, M.B. Ustyugov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

PREDICTION OF DEVICES-PARTS CYCLIC LIFE

To achieve higher accuracy of prediction as concerns cyclic life of devices parts, thermographic parameters of damageability- process development can be used. The method developed by the authors resulted from the information on the kinetics of the passive temperature fields, which appear on the surface of the parts under test. Observation of the part's surface is conducted by means of modern apparatus for non-contact temperature measurement.

Основной причиной существенного отклонения расчетной долговечности от фактической при использовании известных методов является опора на вероятностные, а не фактические параметры процесса накопления повреждаемости. Для увеличения точности прогнозирования циклического ресурса деталей приборов следует по возможности исходить из истинных параметров повреждаемости испытываемого объекта. Покажем, как это было сделано на основе термодинамического подхода, примененного к изгибным колебаниям консольных образцов постоянного прямоугольного сечения, изготовленных из стали 45.

Циклический ресурс n_p определяется из уравнения

$$\int_0^{n_p} W_n^{(1u)}(n) dn = W, \quad (1)$$

где $W_n^{(1u)}(n)$ – энергия, расходуемая на развитие повреждаемости за один цикл колебаний; W – средняя энергия, необходимая для разрушения деталей данного технологического уровня изготовления при соответствующей нагрузке. Величина W , как показано в [1] и подтверждено нашими экспериментами, практически не зависит от уровня нагружения и определяется при испытании контрольной партии деталей; $W_n^{(1u)}(n)$ рассчитывается через поток удельной энтропии $\Delta S_n^{(1u)}$, расходуемой на накопление повреждаемости

$$W_n^{(1u)} = T \int_{V_{\text{очага}}} \Delta S_n^{(1u)} dV. \quad (2)$$

Здесь $V_{\text{очага}}$ – объем очага накопления и развития повреждаемости (он определяется объемом тех частей образца, в которых амплитудные напряжения превышают предел выносливости σ_R (см. рис. 1)); $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ – средняя температура очага за цикл колебаний.

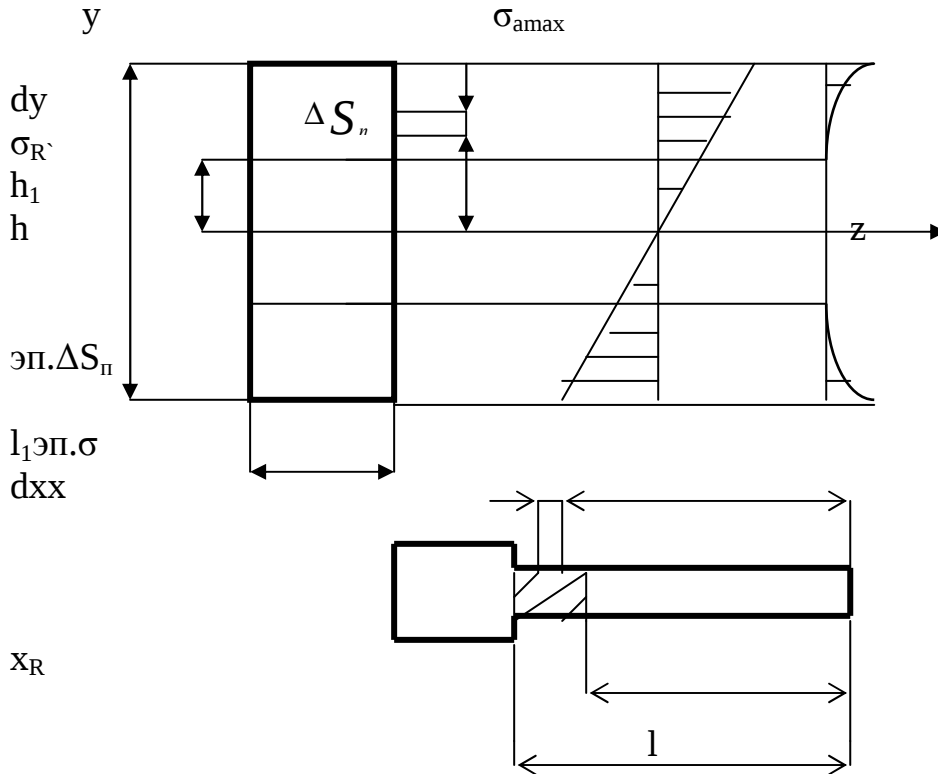


Рис. 1. Зоны сечения, в которых образуется поток повреждающей энтропии

Учитывая размеры очага в соответствии с рис. 1, выражение (2) принимает вид

$$W_n^{(1n)}(n) = 2T l_1 \int_{h_1}^{h/2} \int_{x_R}^l \Delta S_n^{(1n)} dx dy, \quad (3)$$

$$\text{где } h_1 = \frac{\sigma_R h l}{\sigma_{a \max} 2x}, \quad x_R = \frac{\sigma_R l}{\sigma_{a \max}}.$$

Поток повреждающей энтропии рассчитываем по формуле [2]

$$\Delta S_n^{(1n)} = \frac{(\psi - \psi_R) E \varepsilon_a^2 - 2c_v (T_2 - T_1)_{1n}}{T_1 + T_2}, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – температуры очага соответственно в начале и конце рассматриваемого цикла колебаний; ψ – коэффициент поглощения энергии; ψ_R – коэффициент поглощения энергии, соответствующий работе при амплитудных напряжениях σ_R ; ε_a – амплитудная деформация; E – модуль упругости материала образца; c_v – теплоемкость материала.

Чтобы воспользоваться формулами (3) – (3), необходимо иметь функцию $\Delta S_{II}^{(1u)}(x,y,n)$. Проанализируем с этой целью выражение (4) для $\Delta S_{II}^{(1u)}$. В этом выражении от вышеназванных параметров зависят $\psi = \psi(x, y, n)$ и $\varepsilon_a = \varepsilon_a(x, y)$.

Зависимость $\varepsilon_a(x, y)$ имеет очевидный вид (см. рис. 1)

$$\varepsilon_a(x, y) = \varepsilon_{a \max} \frac{2xy}{hl} . \quad (5)$$

Для нахождения функции $\psi(x, y)$ необходимо воспользоваться экспериментальными графиками $\psi = \psi(\sigma_a(x, y), n)$ (см. рис. 2). Учитывая практически линейный характер второго участка этих кривых, который по существу определяет ресурс образца, зависимость $\psi(x, y, n)$ можно представить в виде

$$\psi(x, y, n) = \psi_0(x, y) + tg\beta(x, y)n . \quad (6)$$

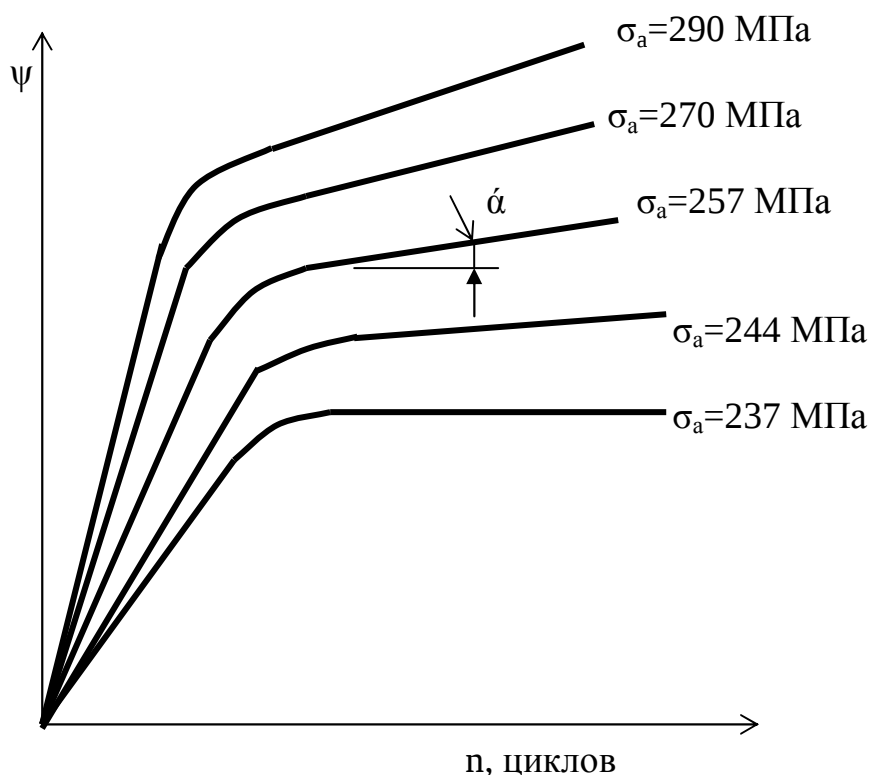


Рис. 2. Зависимость $\psi = \psi(\sigma_a, n)$ для стали 45

Покажем полный расчет долговечности по формулам (1) – (6) на примере одного из образцов, разрушенного при постоянном уровне амплитудных напряжений $\sigma_{a \max} = 257$ МПа.

Аналитические зависимости $\psi_0(x, y)$, $tg\beta(x, y)$ и $(T_2 - T_1)_{1u} = \Delta T_{1u}(n, \sigma_{a \max} = const)$ удобнее всего получить в виде степенных функций: $\psi_0 = \alpha \varepsilon_a^\gamma$, $tg\beta = \alpha_1 \varepsilon_a^{\gamma_1}$, $\Delta T_{1u} = \alpha_2 n^{\gamma_2}$.

В табл. 1 дается исходный экспериментальный материал, взятый из графика (рис. 2), для расчета зависимостей $\psi_0(x, y)$ и $tg\beta(x, y)$. Значения параметров на соответствующих уровнях нагружения взяты при $n = 10^4$ циклов.

В табл. 2 приведены исходные данные для расчета зависимости $\Delta T_{1y}(n)$.

Таблица 1. Исходные экспериментальные данные для расчета $\psi_0(x, y)$ и $tg\beta(x, y)$

$\sigma_{a \max}$, МПа	237	244	257	270	280
$\varepsilon_{a \max}$	0,001185	0,00122	0,001285	0,00135	0,0014
ψ_0	0,175	0,187	0,206	0,21	0,218
$\Delta\psi$	0	0,0045	0,009	0,0138	0,014
$tg\beta = \frac{\Delta\psi}{\Delta n}$	0	$0,5 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	$1,53 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2. Экспериментальные данные для расчета $\Delta T_{1y}(n)$

t, мин	1	2	3	4
n, циклов	7800	15600	23400	31200
ΔT_{1y} , К	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$

Расчет коэффициентов $\alpha, \beta, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ проводился методом наименьших квадратов. При этом сразу определялась и среднеквадратическая ошибка. Результаты расчетов: $\alpha = 812,41 \pm 2,05$; $\beta = 1,25 \pm 0,00258$; $\alpha_1 = 0,00047 \pm 0,00002$; $\beta_1 = 1,272 \pm 0,052$; $\alpha_2 = 0,434 \pm 0,00071$; $\beta_2 = -0,943 \pm 0,0017$ (здесь дана удвоенная среднеквадратическая ошибка, что, как известно, соответствует доверительной вероятности 0,95).

Подставляя эти коэффициенты, а также следующие значения параметров: $C_v = 5,16 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}}$, $E = 2 \cdot 10^{11} \text{Па}$, $\varepsilon_{a \max} = 1,285 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_R = 232 \text{МПа}$, $W = 143,2 \text{Дж}$, $l = 0,12 \text{м}$, $l_1 = 0,015 \text{м}$, $h = 0,005$, $\psi_R = 0,175$ в уравнения (1)-(6), получаем $n_p = 6,45 \cdot 10^5$ циклов.

В табл. 3 приведены значения расчетных и фактических долговечностей для 7 образцов из стали 45, испытанных при одноступенчатом циклическом нагружении, но на различных уровнях максимальных амплитудных напряжений $\sigma_{a \max}$. Как видно из таблицы, погрешность прогнозирования долговечности не превышает 20% (анализ систематических и случайных ошибок при использовании данной методики показал, что максимальная ошибка прогнозирования может составить 40%).

Таблица 3. Испытания образцов из стали 45 при одном уровне нагружения

Номер образца	W, Дж	$\sigma_{a\max}$, МПа	σ_{-1} , МПа	n_p , циклов (расчетная долговеч.)	n_ϕ , цикл. (факт. долгов.)	Расхожд., %
1		257	232	$6,45 \cdot 10^5$	$8,03 \cdot 10^5$	19,7
2		250	240	$41,2 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^5$	17,65
3	143,2	255	238	$17,3 \cdot 10^5$	$1,65 \cdot 10^5$	4,85
4		280	244	$2,71 \cdot 10^5$	$2,95 \cdot 10^5$	8,14
5		270	241	$6,02 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^5$	12,6
6		265	235	$5,16 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^5$	5,3
7		260	233	$5,27 \cdot 10^5$	$5,75 \cdot 10^5$	8,35

Рассмотренный подход позволяет прогнозировать долговечность и при многоступенчатом нагружении с различными уровнями $\sigma_{a\max}$. Формула (1) при этом приобретает вид

$$\sum_0^{n_i} W_n^{(1u)}(n) dn = W. \quad (7)$$

Таким образом, предложенная термодинамическая методика позволяет существенно повысить точность прогнозирования циклического ресурса деталей приборов по сравнению с известными методами. Это достигается за счет того, что при прогнозировании наряду с вероятностным параметром W, который, кстати, для деталей определенного технологического уровня изготовления имеет незначительный разброс, используются индивидуальные характеристики сопротивления усталости, такие как σ_R , ψ_R . Эти параметры определяются без разрушения детали с довольно высокой точностью [3]. Зависимость $\psi(x, y, n)$ можно получить как по результатам испытания данной детали без ее разрушения, так и с доведением до разрушения группы идентичных деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуревич, С.Е. Методика экспериментального определения разрушающей энергии при циклическом нагружении /С.Е. Гуревич, А.П. Гаевой // Заводская лаборатория, 1983. – № 9. – С.1110–1114.
2. Куриленко, Г.А. Использование определяющего уравнения для энтропии при оценке усталостной повреждаемости/Г.А. Куриленко// Новосиб. электротех. инст. – Новосибирск, 1990. – С.98–104.
3. А.С. 1499167 СССР, МКИ⁴G 01 N 3/32. Способ определения предела выносливости / Г.А. Куриленко. 6 с.; ил. 3. – Б.И. – 1989, №29.

УДК 621.923.

Л.А. Канушина, А.Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

L.A. Kanushina, A.N. Sosnov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

INVESTIGATION OF FRACTURE MECHANISM OF OPTICAL DETAILS SURFACE LAYER IN GRINDIN

The article deals with different factors (strains, thermoelastic stresses, disjoining pressure of cilicic- acid colloid gel) affecting the process of glass grinding with loose and fixed abrasive. The authors present the limiting values of some factors influencing the character of the fracture.

Стекло является хрупким материалом, поэтому основным способом его обработки является абразивный – шлифование свободным и связанным абразивом. Разрушение поверхностного слоя при шлифовании происходит под действием нескольких факторов: механических и термоупругих деформаций, а также за счет расклинивающего действия геля кремниевой кислоты, возникающего вследствие химических реакций и термического расширения.

Процесс абразивного разрушения поверхностного слоя стекла подробно изучен и описан Престоном, Поляковым Н.И., Качаловым Н.Н и др. Большинство закономерностей получено ими эмпирически, а проведение опытов носит описательный характер [1]. Позже Балыковым А.В. [2] установлено – разрушение хрупких материалов происходит, когда напряжение под зерном достигает предела прочности на сжатие, затем при некотором критическом значении $P_{сж}$ за контуром поверхности давления развиваются круговые трещины, обусловленные возникновением растягивающих напряжений. Так как разрушение не может происходить при меньших нагрузках, а в период трещинообразования энергия реализуется на разрушение, то величина разрушенного слоя постоянна и зависит от свойств материала и величины зерна. Произведя работу хрупкого разрушения, растягивающие напряжения релаксируются, поэтому глубина разрушенного слоя стекла не может быть меньше или больше некоторого предела, связанного с началом хрупкого разрушения под действием нормальной силы.

В процессе шлифования, возникающее в зоне контакта зерна со стеклом внешнее и внутреннее трение сопровождается выделением тепла. Исследования Бессонова Н.А. [3] показало, что при относительных скоростях 0,2 – 0,12м/с и

давлении 1000 г/см^2 выделения тепла при шлифовании кварца составляет 84–70 % от всей затраченной работы, а энергия, идущая непосредственно на диспергирование составляет ничтожную часть $10^{-2} - 10^{-3} \%$. Остальные 30–16 % расходуются на классическую деформацию кристаллической решетки. В последствие эти результаты подтвердились Головиной М.Н. Сергеевой О.А.[4] и при шлифовании различных марок стекол. Известно, что температура в зоне трения пропорциональна скорости относительного перемещения и усилию трущихся пар. При шлифовании свободным абразивом относительная скорость обработки вычисляется по формуле (1):

$$V_{\text{отн}} = L \cdot \omega / 2 = L \cdot \pi \cdot n / 2 \cdot 60 \approx 0,055 L \cdot n \text{ м/с}, \quad (1)$$

где L – размах качания верхнего звена;

ω – частота качания верхнего звена;

n – частота вращения нижнего звена.

По паспортным данным станка 6ШП-200М при $L = 100 \text{ мм}$, $n = 200 \text{ об/мин}$ относительная скорость не превышает $0,0198 \text{ м/с}$, а давление $P = 300 \text{ Н}$, так как дальнейшее повышения усилия на поводке приводит к раздавливанию зерен. Таким образом, при режимах, характерных для шлифования свободным абразивом выделение тепла незначительно [1], нагрев всего поверхностного слоя не превышает нескольких градусов, что существенно не влияет на тепловое расширение геля кремниевой кислоты и термические напряжения стекла.

Скорость образования пленок геля кремниевой кислоты на поверхности стекла высока, и по данным [6] составляет порядка $5 \cdot 10^{-3} \text{ мкм/с}$. При относительной скорости – $0,0198 \text{ м/с}$ в каждой трещине образуется пленка, соизмеримая с толщиной трещин, а так как объем геля больше, чем воды, возможно расклинивающее действие.

В случае алмазно-абразивной обработки процесс разрушения поверхностного слоя стекла усложняется большими скоростями обработки, более продолжительным контактом зерна с обрабатываемым материалом, наличием тангенциальной силы резания и возникновением нескольких очагов трения: зерен об обрабатываемый материал, продуктов диспергирования о связку и обрабатываемый материал и внутреннее трение при пластическом деформировании материала зернами с малым вылетом.

Механизм образования и структуру царапин описал Казанский в своей диссертации [1]. Им было показано, что в зависимости от глубины внедрения зерна в стекло характер разрушения различен. При малых нагрузках происходит пластическое отеснение стекла. С увеличением нагрузки и глубины внедрения зерна образуются гладкие неглубокие царапины, что является микрорезанием. Крупные зерна (более 40 мкм) глубоко внедряются в материал и образуют так называемые вибрационные трещины, производя хрупкое разрушение.

Как уже указывалось, в результате нескольких очагов трения происходит значительный нагрев обрабатываемой поверхности и подповерхностного слоя. Температуры, возникающие при шлифовании стекла можно разделить на три вида по степени их влияния на сопутствующие явления:

- Средняя температура детали $T_{срд.}$ влияет на макрогеометрическую точность обработки поверхности [1] – коробление деталей.
- Средняя температура подповерхностного слоя $T_{срп.}$ проявляется отрицательно в засаливании инструмента. Если $T_{срп.}$ превышает температуры размягчения стекла или связки, то пластичная масса заполняет межзерновое пространство, лишая инструмент работоспособности.
- Контактная мгновенная температура на зерне влияет на термическое разрушение алмаза и стекла, а так же на его структуру.

По данным [5] среднеинтегральная температура контакта в зависимости от условий обработки достигает $250 - 550^{\circ}\text{C}$, а по результатам измерений контактных температур [1] колеблется от 130° до 310° для различных видов обработки. Сравнивая эти температуры с термopрочностью стекла, достигающей $100-200^{\circ}$, можно предположить теоретическую составляющую разрушения стекла.

В области движущего теплового источника кривые изменения температуры можно разделить на три характерные зоны: 1) незначительного повышения температуры перед приближающимся тепловым источником; 2) интенсивного роста ее под тепловым источником; 3) резкого снижения температуры после прохождения источника. Последнюю зону можно считать предельно напряженной и ответственной за образование шлифовочных трещин, ибо здесь особенно резко проявляется роль температурного градиента. В этой зоне поверхностный слой, подвергаясь интенсивному охлаждению, уменьшается в объеме. Глубинные слои, препятствуя этому, вызывают большие временные термоупругие напряжения, величина которых может превышать предел прочности материала. Деление некоторого объема материала, прилегающего к пятну контакта, на зоны позволяет определить общую схему напряженного состояния поверхностного слоя шлифуемой детали.

Алмазно-абразивная обработка невозможна без СОЖ – водных растворов эмульсий, глицерина, масел. Эти растворы соприкасаясь с нагретой поверхностью детали превращаются в пар. Обычно влияние парообразования не учитывается при описании механизма разрушения стекла, в частности из-за того, что эти процессы мало изучены, а моделью шлифования служит одиночное зерно, при которой тепловые явления мало выражены.

В реальных условиях, по нашему мнению, происходят следующие физические процессы. Во-первых, снижение теплонапряженности в зоне обработки происходит не только за счет теплообмена нагретой поверхности и СОЖ, но и за счет перехода водного раствора в парообразное состояние. Во-вторых, на месте контакта СОЖ и нагретой поверхности образуется паровая подушка, которая вследствие высоких скоростей обработки сдвигается следом идущими зернами и над рабочей зоной всегда заметно паровое облако. В-третьих, СОЖ заполняет трещины, полученные в результате предыдущей обработки. При прохождении зерен вблизи этих трещин СОЖ нагревается и за счет термического расширения производит их расклинивание, способствуя процессу разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Формообразование оптических поверхностей: сб. ст. / под ред. Куманина К.Т. – М.: Оборонгиз, 1962.
2. Попов, С.А. Состояние поверхностного слоя кварца при алмазном шлифовании / С.А. Попов, А.В. Балыков // Вестник машиностроения. – 1970. – № 2. – С. 73–76.
3. Кузнецов, В.Д. Поверхностная энергия твердых тел / В.Д. Кузнецов М.: Гостехиздат, 1954.
4. Голованова, М.И. Исследование прочности удержания алмазных зерен в органической связке / М.И. Голованова, О.А. Сергеев // ОМП. – 1959. – № 8. – С. 56–59.
5. Маградзе, Д.В. Исследование зависимости среднеинтегральной температуры контакта от условий обработки оптического стекла / Д.В. Маградзе // ОМП. – 1989. – № 3. – С. 13–14.
6. Ходаков, Г.С. Физико-химические процессы полирования оптического стекла / Г.С. Ходаков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
7. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.

© Л.А. Канушина, А.Н. Соснов, 2008

УДК 004.4

М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов

ФГУП «ПО «НПЗ», Новосибирск

А.А. Марач

СГГА, Новосибирск

ПРОГРАММА UTCO209C ДЛЯ УЦО СЕРИИ 209

M.S. Kombarov, M.M. Kuznetsov

Novosibirsk instrument-making plant

A.A. Maratch

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

PROGRAMME UTCO209C FOR UTCO (UNIFIED DIGITAL MEASURING INDICATOR) SERIE 209

The program utco209.exe is meant for operation with unified digital measuring indicators УЦО serie 209 and solves measuring problems according using the data acquired by means of these devices.

Программа состоит из трех файлов:

utco209c.exe – исполняемый модуль программы;

utco.ini – файл настроек к программе;

utco.dat – файл, в котором сохраняется последнее состояние программы.

Если удалить файлы utco.ini, utco.dat и запустить программу utco209c.exe, то программа создаст эти файлы заново, заполнив их значениями по умолчанию.

Середину диалогового окна занимает рабочая область, на которой изображаются объекты.

Под объектом понимается любая точка, линия, окружность, дуга или отрезок.

Выделение объектов осуществляется щелчком левой клавиши мыши на объекте.

Снятие выделения – щелчок левой клавиши мыши с нажатой клавишей <Shift>.

Щелчок левой клавишей мыши с нажатой клавишей <Ctrl> добавляет точку.

Если при одновременном нажатии <Shift> и <Ctrl> нажать левую кнопку мыши и обвести появившимся квадратом несколько точек, то выделятся только точки полученные из УЦО. Точки появившиеся в результате расчетов не выделятся.

Поворот колеса мыши над рабочей областью вызывает изменение масштаба.

Поворот колеса мыши над линейками прокрутки слева и внизу окна вызывает смещение изображения.

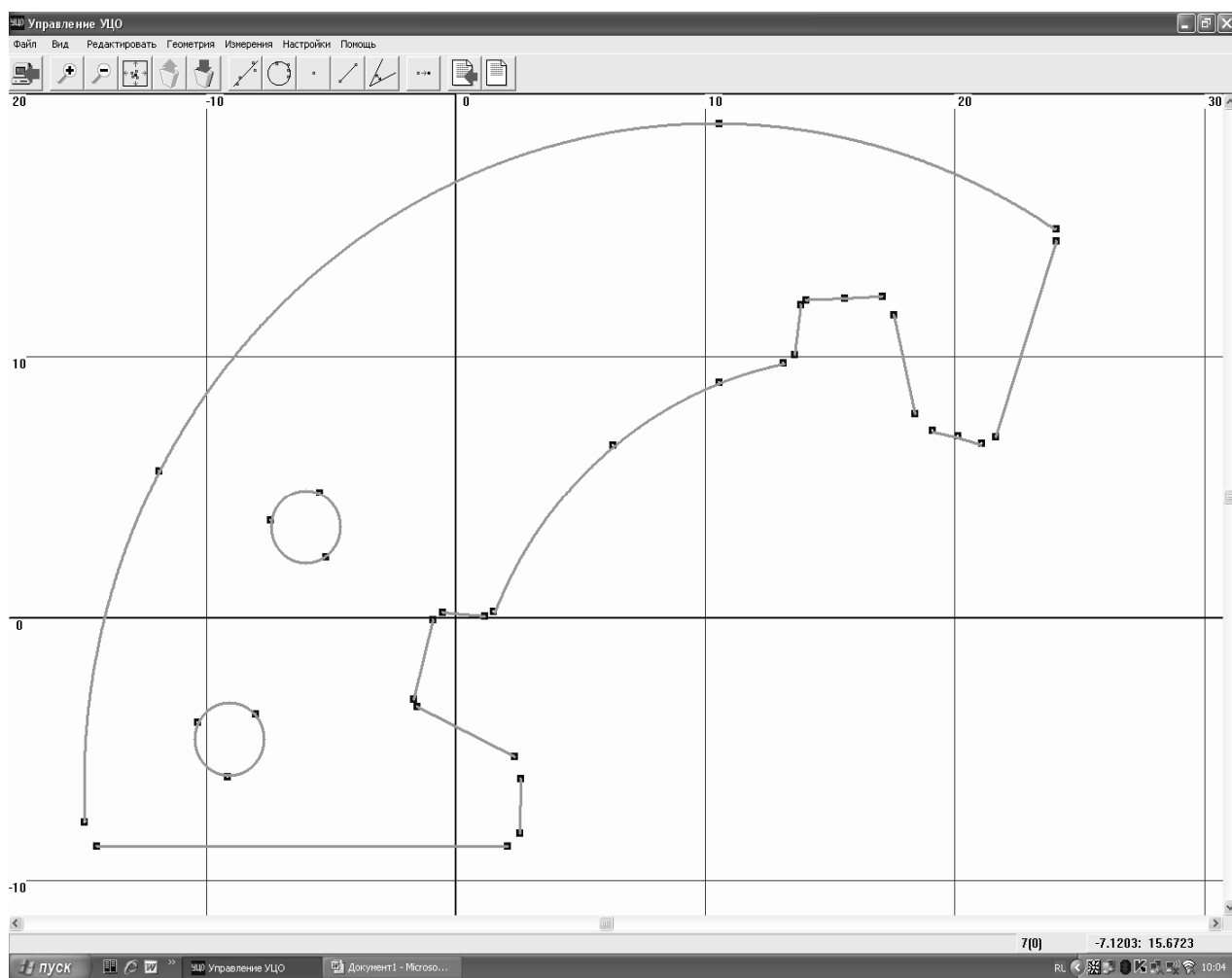
Строка состояния располагается внизу окна и разбита на три части:

- В первой части строки состояния выводятся системные сообщения;
- Во второй части выводится общее количество объектов и сколько из них выделенных;
- В третьей части строки состояния выводится координата (в мм) точки, над которой в данный момент расположен курсор мыши.

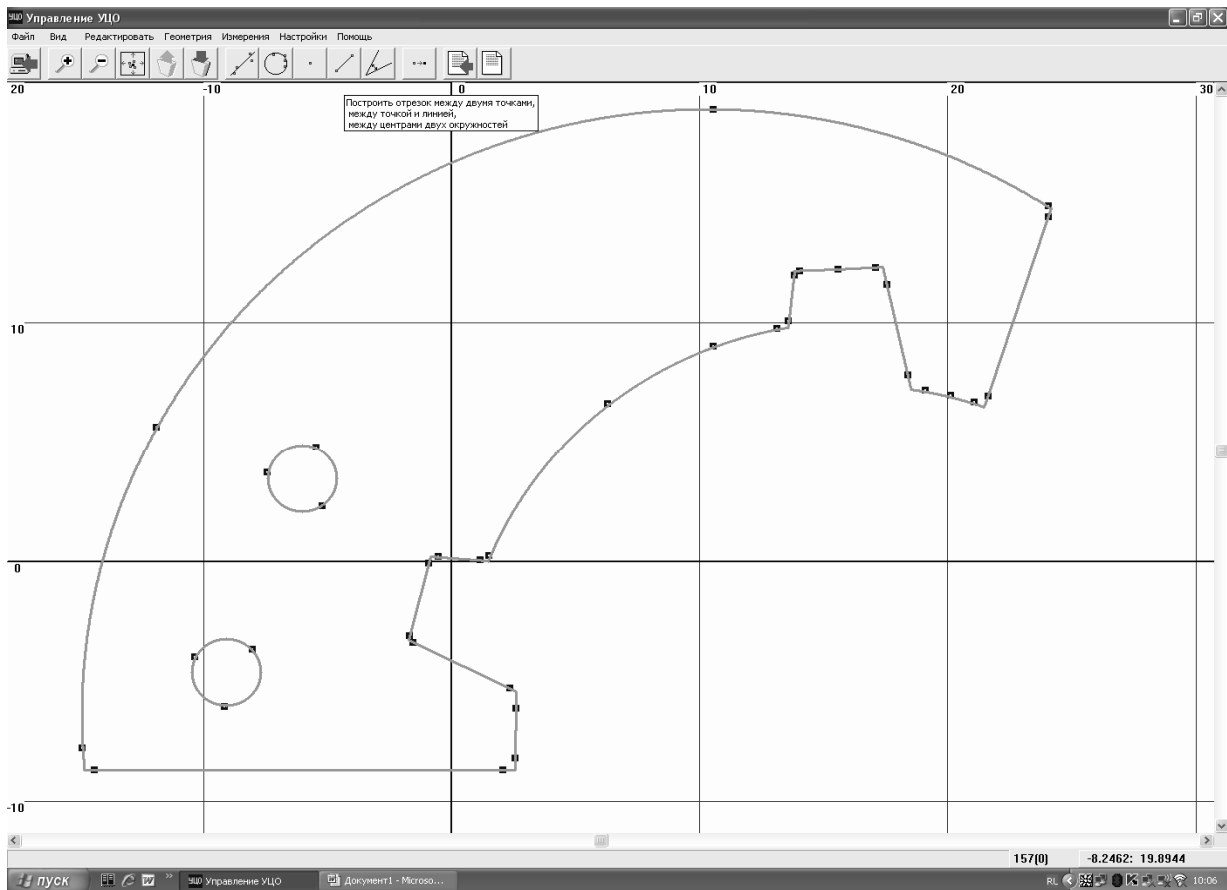
Программа позволяет:

- Проводить максимально правдоподобную линию по предварительно выделенным точкам;
- Проводить максимально правдоподобную окружность по предварительно выделенным точкам;
- Создавать точку в центре выделенной окружности, дуги;
- Если выделен отрезок – создаст точку в середине отрезка;
- Если выделена группа точек – создаст точку в центре этой группы;
- Если выделены две фигуры (окружности, линии, отрезки) – создаст точки на их пересечении;
- Создавать отрезок между двумя выделенными точками;
- Если выделены две окружности – создаст отрезок между их центрами;
- Если выделены точка и прямая – создаст перпендикуляр к прямой, проходящей через выделенную точку;
- Если выделены две прямые – рассчитает угол между ними;
- Если выделен угол – изменит его на дополнительный к нему.

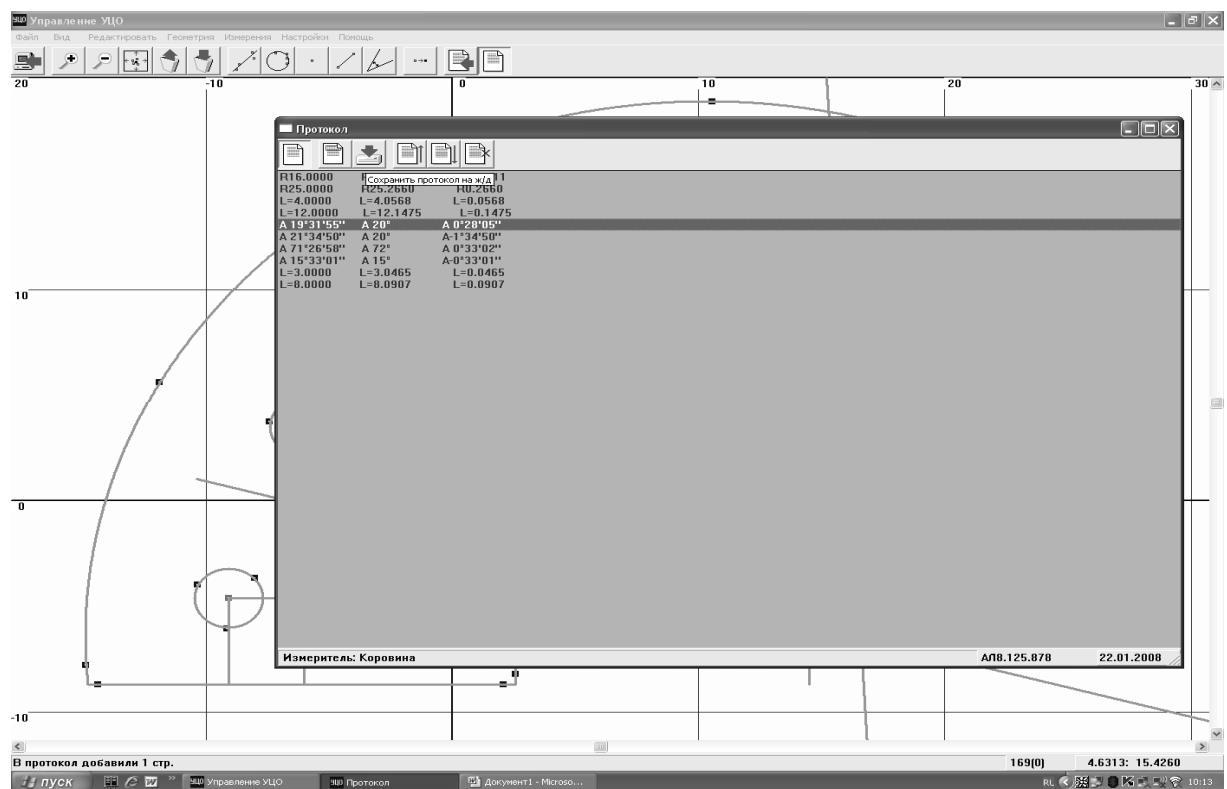
Пример траекторной информации по контуру детали до обработки:



Пример траекторной информации по контуру детали после обработки:



Рабочее окно протокола:



Пример файла протокола:

РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ

В результате измерения детали XX.XXX.XXX оказалось следующее:

N	Чертежные p-ры	Действительные p-ры	Разность размеров	Примечания
1	R16.0000	R15.8489	R-0.1511	
2	R25.0000	R25.2660	R0.2660	
3	L=4.0000	L=4.0568	L=0.0568	
4	L=12.0000	L=12.1475	L=0.1475	
5	A 19°31'55"	A 20°	A 0°28'05"	
6	A 21°34'50"	A 20°	A-1°34'50"	
7	A 71°26'58"	A 72°	A 0°33'02"	
8	A 15°33'01"	A 15°	A-0°33'01"	
9	L = 3.0000	L = 3.0465	L = 0.0465	
10	L = 8.0000	L = 8.0907	L = 0.0907	

Оператор Коровина
Дата 22.12.2007

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Микроскоп УИМ-23М. Программное обеспечение. Руководство пользователя [Текст]. г. Новосибирск: ООО «Метролог», 2005.

© А.А. Марач, М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов, 2008

УДК 535.4

М.М. Кузнецов

ФГУП «ПО «НПЗ», Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ОБЪЕКТОВ НА ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

M.M. Kuznetsov

Novosibirsk instrument-making plant

INVESTIGATION OF OBJECTS PHASE DISCONTINUITY IN OPTICAL INTERFEROMETERS

The article analyzes interference measurements precision parameters. The generalized flow chart of objects phase discontinuity investigation is also presented.

Оптические интерферометры широко используются для исследования полей показателя преломления прозрачных сред, для измерения деформаций моделей и реальных конструкций, для анализа состава сплавов по спектру испускаемого излучения и решения ряда других подобных задач.

Наиболее актуальной проблемой, не решенной до сих пор, является проблема поиска гравитационных волн.

В последнее время к этим классическим задачам добавились наноизмерения, в том числе измерение толщины и показателя преломления пленочных покрытий размером 50-100 нанометров, используемых для создания покрытий с отрицательным оптическим поглощением.

Перечисленные задачи могут быть решены как при помощи применения интерферометров повышенной чувствительности, так и при помощи применения более высокочувствительного анализатора интерференционной картины.

Для анализа точностных параметров интерференционных измерений воспользуемся обобщенной блок-схемой исследования фазовой неоднородности (рис. 1).

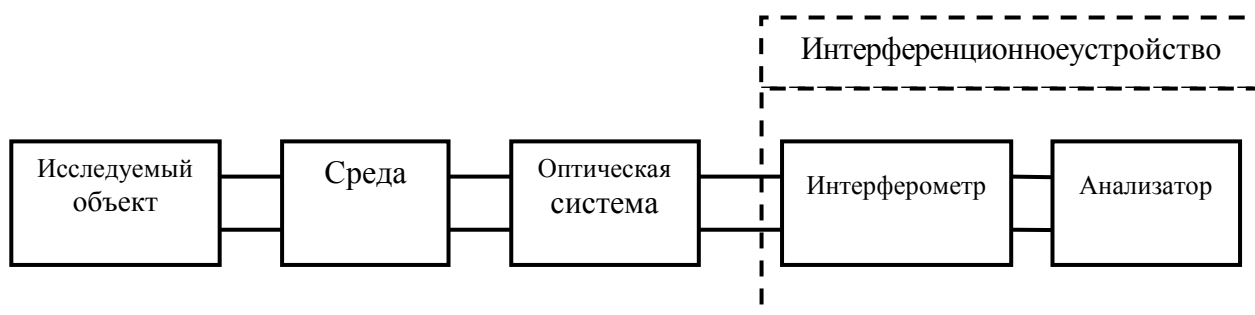


Рис. 1. Обобщенная блок-схема исследования фазовой неоднородности объекта

Основным источником случайных погрешностей являются потоки в среде между интерферометром и исследуемым объектом. Исключением является только тот случай, когда исследуются сами потоки. Случайные погрешности можно значительно уменьшить термостатированием интерферометра и окружающего пространства и свести к нулю помещением интерферометра в вакуум.

Оптическая система интерферометра вносит систематические погрешности измерений, обусловленные аберрациями и погрешностями изготовления элементов. В случае относительных измерений, например, исследовании деформаций твердых тел, эти погрешности исключаются.

Таким образом, во многих случаях погрешность измерений, в конечном счете, определяется погрешностью самого интерференционного устройства, в состав которого входит интерференционный преобразователь, часто называемый интерферометром, и устройство для анализа интерференционных картин, или – анализатор.

Исторически сложилось так, что анализатором является глаз человека.

В последнее десятилетие большое распространение получили системы фотоэлектрической обработки интерферотрам.

Такое разбиение интерференционного устройства на два самостоятельных блока целесообразно при анализе и синтезе свойств этих блоков, так как подход к чисто оптическим и чисто электронным блокам неодинаков.

Согласно РМГ 29-99 под чувствительностью S любого измерительного прибора, в том числе и интерферометра, следует понимать отношение изменения сигнала dl на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины dx :

$$S = dl/dx. \quad (1)$$

В интерферометрах величиной dx является $d\Delta$ – изменение оптической разности хода лучей L при прохождении излучения сквозь исследуемый объект один раз или при однократном отражении от него. При определении физического смысла величины dl у различных исследователей возникают разногласия.

Анализ результатов работ [1, 2, 3] позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Если многолучевой интерферометр настроен на полосы бесконечной ширины, то чувствительность измерений пропорциональна первой степени резкости полос F ; если он настроен на полосы конечной ширины, то чувствительность измерений пропорциональна квадрату резкости полос F . Учитывая, что резкость полос может составлять несколько десятков, это разночтение является весьма существенным.

2. Сравнительная чувствительность $\hat{S}$ интерферометров многопроходового типа зависит не столько от числа проходов, сколько от произведения числа проходов на видность интерференционной картины при n -ном проходе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, М.М. Выделение малоконтрастных элементов на фотографических снимках [Текст] / М.Ф. Носков, И.Н. Белоус, М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов // Сб. матер.междунар. науч. конгресс «ГЕО-Сибирь 2006», 24-28 апреля 2006 г., г. Новосибирск, т. 4. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 114–117.
2. Кузнецов, М.М. Выделение малоконтрастных элементов на фотографических снимках. [Текст] / М.Ф. Носков, И.Н. Белоус, М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов // Сб. матер.междунар. науч. конгресс «ГЕО-Сибирь 2006», 24-28 апреля 2006 г., г. Новосибирск, т. 6. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 82–85.
3. Кузнецов, М.М. Отражательный интерферометр с инвертированным распределением интенсивностей. [Текст] / О.Я. Абель, М.М. Кузнецов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2007, № 9. – С. 150–152.

© М.М. Кузнецов, 2008

УДК 681.787

М.М. Кузнецов

ФГУП «ПО «НПЗ», Новосибирск

А.А. Марач

СГГА, Новосибирск

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ФГУП «ПО «НОВОСИБИРСКИЙ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»

M.M. Kuznetsov

Novosibirsk instrument-making plantФ

A.A. Maritch

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

SYSTEM OF QUALITY MANAGEMENT AT NOVOSIBIRSK INSTRUMENT- MAKING PLANT

Under current conditions the main task of any company's competitiveness is being able to meet the ever growing demand of consumer market and regular customers. One of the ways to solve this rather a difficult problem is to develop and introduce the quality management system which could meet the highest international requirements (1).

The current certified quality management system at the instrument-making plant is a successor of the quality system, the former Soviet complex system of quality management.

В основную структуру СМК предприятия входят:

- Внешние нормативные документы;
- «Руководство по качеству»;
- Документально оформленное заявление высшего руководства о политике и целях в области качества;
- 91 стандарт предприятия СМК;
- Положения о подразделениях и должностные инструкции;
- Конструкторская и технологическая документация.

СТП СМК описывают все требования ГОСТ Р ИСО 9001 и СРПП ВТ 15.002 за исключением раздела 7, пункт 7.3 (ГОСТ Р ИСО 9001), так как предприятие изготавливает продукцию, разработанную другими организациями.

В системе менеджмента качества выделены следующие процессы:

- К основным процессам относится процесс производства
- К вспомогательным:

- а) Процесс подготовки и освоения производства;
- б) Процесс подготовки кадров;
- в) Процесс закупок;
- г) Процесс метрологического обеспечения;
- К процессам управления:
- а) Процесс анализа со стороны руководства;
- б) Процесс анализа требований, относящихся к продукции.

Порядок выполнения каждого процесса, определенного в СМК предприятия, для наглядности представлен в «Руководстве по качеству» в виде алгоритма. Для каждого процесса на предприятии определены:

- Владелец процесса;
- Руководитель процесса;
- Входы процесса;
- Выходы процесса;
- Показатели результативности процесса.

Управление каждым процессом включает в себя этапы: планирование, организация работ, контроль выполнения и анализ результатов и регулирование.

Планирование каждого процесса предусматривает определение цели процесса и ресурсов, необходимых для достижения целей.

Организация работы предусматривает определение последовательности выполнения процесса и ответственности должностных лиц за достижение результата.

Контроль выполнения и анализ предусматривают оценку соответствия результатов процесса запланированным целям, выявление несоответствий и их причин, анализ результативности работ.

Регулирование предусматривает планирование и реализацию корректирующих и предупреждающих действий по устранению несоответствий, и их причин для улучшения процесса.

Владельцы и руководители процессов осуществляют менеджмент процессов СМК. Оценка результативности процессов осуществляется путем сравнения достигнутых показателей с запланированными. В зависимости от меры соответствия результативности процесса установленным показателям и динамики их изменений владельцы и руководители процессов осуществляют адекватные управляющие воздействия на процесс.

Общую оценку эффективности функционирования системы менеджмента качества осуществляет генеральный директор на совещаниях по качеству. Текущие вопросы качества рассматриваются на ежемесячных заседаниях Постоянно-действующей комиссии по качеству, проводимых под председательством главного инженера - представителя высшего руководства по СМК.

Сертифицировав в 2005 году систему менеджмента качества во ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ» (теперь ЗАО «Монолит-серт») мы начали работы по созданию

системы управления охраной окружающей среды. Ввиду большого сходства требований стандартов серии ГОСТ Р ИСО-9000 и ГОСТ Р ИСО-14000 было решено начать работы по созданию интегрированной системы менеджмента. Проанализировав существующую систему, для получения предварительного сертификата на СУОС, оказалось необходимым разработать только 5 новых документов и откорректировать порядка 7 стандартов. Прделав эти работы в начале 2006 года в сентябре 2007 года заводом был получен предварительный сертификат на СУОС [2].

Основные требования к качеству продукции, выпускаемой предприятием: качество продукции должно удовлетворять требованиям и запросам потребителей, соответствовать лучшим зарубежным и отечественным анализам и обеспечивать стабильность финансово-экономического положения объединения.

В настоящее время предприятие серийно выпускает следующие виды приборов:

- Приборы специального назначения;
- Телескопы ТАЛ различных модификаций;
- Измерительные микроскопы различных модификаций;
- Автоколлиматоры;
- Зрительные трубы;
- Товары народного потребления;
- Проекторы измерительные различных модификаций.

Основной задачей 2008 года можно считать ресертификационный аудит СМК предприятия, получение заключения на систему охраны окружающей среды и начало работ по созданию на предприятии системы охраны труда в соответствии с международным стандартом OHSAS: 18000.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 1.Смирнов, В.А. Опыт разработки системы качества [Текст] / А.В. Брувер, А.А. Амяльев, В.А. Смирнов // Методы менеджмента качества. – 2002. – № 8. – С. 25–29.
2. Кузнецов, М.М. СМК на Новосибирском приборостроительном заводе [Текст] М.М. Кузнецов // Сб. матер.круг. стола «Проблемы создания и совершенствования системы качества на предприятиях», 8 ноября 2007 г., г. Новосибирск. – Сибирская ярмарка. – С. 25–26.

© М.М. Кузнецов, А.А. Марач, 2008

УДК 669.131.018.256:621.762:539.538

Т.В. Ларина

СГГА, Новосибирск

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ ПОРОШКОВЫЕ БЕЛЫЕ ЧУГУНЫ

T.V. Larina

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

WEARPROOF WROUGHT POWDER WHITE CAST-IRONS

The aim of this work is to choose a new approach to the principles of white cast iron alloying and to the mechanisms of affecting the structure and properties in order to increase wear resistance not by the traditional alloying but by using potentialities of a metal matrix and a carbide component, powdered to nanostructural state.

До 1970-х годов все виды чугунов, включая ковкий, относились к пластически недеформируемым материалам. Считалось, что предельное содержание углерода в сплавах, способных деформироваться без разрушения, не должно превышать 1,7 %. В последнее время во всем мире интерес к проблеме деформации чугунов значительно возрос. В особенности это касается стабильного к графитизации белого чугуна, по прочности лишь немногим уступающего стали, но отличающегося высокой износостойкостью.

Материалом исследования служили белые чугуны с 1,9–4,5 % С, полученные по технологии порошковой металлургии, следующего состава (массовые доли элементов, %; содержание серы не превышало 0,005 %, фосфора – 0,002 %):

Чугун	C	Cr	Mn	Si	O
ПБЧ-1,9	1,9	1,3	1.1	0,6	0,1
ПБЧ-2,5	2.5	1,8	1.1	0.6	0.02
ПБЧ-2,9	2.9	1,9	1.0	0.4	0.1
ПБЧ-3.2	3.2	1.9	1.1	0,6	0.003
ПБЧ-4,5	4,5	1,9	1,1	0,6	0,02

Выбор указанного интервала содержания углерода определялся возможностью исследовать как до-, так и заэвтектические составы при выбранной схеме легирования Fe - Cr - Mn - C, полностью исключить графитизацию минимальным содержанием хрома и марганца, а также ограничением до 0,5 % содержания наиболее опасного в этом отношении кремния, присутствие которого обусловлено технологией.

Порошок белого чугуна (основная фракция < 50 мкм) получали путем распыления расплава заданного состава азотом на установке УРС 40-1 или водой высокого давления на установке. В зависимости от размера частиц скорость охлаждения при кристаллизации в случае распыления азотом изменялась от 5000 до 10000 К с⁻¹, а в случае распыления водой была в 2 - 3 раза большей. Порошок белого чугуна, распыленный азотом, вследствие высокой жесткости и сферической формы частиц мог быть скомпонован только путем горячей экструзии свободно насыпанных капсул, в то время как распыленный водой чугун, частицы которого имели неправильную форму с весьма развитой поверхностью (после восстановительного отжига и размола) – тремя способами: А – горячей экструзией, Б – холодным прессованием с последующим спеканием, В – холодным прессованием с последующей горячей штамповкой пористых заготовок.

Структура распыленного порошка аналогична структуре литого белого чугуна, но с разницей лишь в размере ее составляющих: в частицах порошка они в 10 - 100 раз мельче. Такое измельчение структурных составляющих уже на этапе получения гранул благоприятно для достижения наноструктурного состояния.

Во всех случаях чугун при $< 3,9$ % С относится к доэвтектическим, а с $> 4,3$ % С — к заэвтектическим, т. е. при любой скорости охлаждения в процессе кристаллизации содержание углерода в эвтектике остается постоянным ($\sim 4,1$ %). Количественный фазовый рентгено-структурный анализ показал возрастание доли аустенита с повышением скорости кристаллизации и увеличением в нем содержания углерода от 1,9 до 2,2 %, что больше равновесного (2 % в присутствии хрома). Порошок, распыленный водой, подвергали восстановительному отжигу в среде водорода (950 °С, выдержка 1 ч), в результате чего уменьшилось содержание кислорода от 0,7 до 0,08–0,1 %, а углерода – на 0,3–0,4 %.

Литой белый чугун считался практически недеформируемым главным образом из-за наличия в структуре ледебуритной эвтектики, кристаллизующейся в промежутках между аустенитными дендритами в виде каркаса, толщина и непрерывность которого зависят от содержания углерода. В процессе пластической деформации жесткий ледебуритный каркас в условиях больших сдвиговых напряжений раздробляется, при высокой температуре фрагменты сфероидизируются, утрачивая осколочную форму. Быстрое охлаждение от температуры деформации способствует образованию многочисленных центров зарождения частиц цементита размером не более 1 — 2 мкм. Высокая степень дисперсности наследуется структурами, образующимися при охлаждении.

Для горячей экструзии свободно насыпанных капсул (универсального метода получения компактных заготовок из порошков, распыленных как азотом, так и водой) применили горизонтальный гидравлический пресс и схему прямого истечения при усилии 15 МН, температуре 1050 °С и степени деформации 90 % (вариант А). При холодном прессовании (только распыленных водой порошков) давление составляло 700 МПа, температура

спекания 1050 °С, выдержка 1 ч, атмосфера – водород (вариант Б). Плотность спеченных заготовок с 1,9 и 2,9 % С равнялась 6,5 и 5,7 г/см³ соответственно. Пористые заготовки (только для распыленных водой порошков), полученные холодным прессованием при давлении 500 МПа, после нагрева в среде диссоциированного аммиака подвергали горячей штамповке в закрытом штампе на механическом молоте с удельной энергией 300 Дж/см³ (вариант В). Плотность заготовок составляла 7,45 и 7,3 г/см³ для ПБЧ с 1,9 и 2,9 % С соответственно.

После компактирования структура ПБЧ представляла собой матрицу в виде сорбитообразного порошка с карбидами размером < 1 - 2 мкм. Размер зерна соответствовал номеру ≥ 14.

Сравнение порошкового белого чугуна трех способов получения показало, что по степени измельчения структуры, ее однородности, величине зерна сорбитообразного перлита и матрицы и дисперсности карбидов наиболее привлекательна технология получения компактной заготовки методом горячей экструзии из распыленных водой порошков (табл. 1). Структура порошкового белого чугуна после горячей экструзии и отжига (800 °С, 1 ч) — сорбитообразная матрица (карбиды типа (Fe,Cr)₃C размером менее 1 мкм) с вкраплением в нее крупных частиц карбидов того же типа. Структура ПБЧ после горячей штамповки (перлитная матрица с крупными частицами карбидов) во многом схожа со структурой чугуна после горячей экструзии, но уступает по плотности (присутствуют щелевидные поры) и дисперсности карбидов. Состояние после горячей экструзии отличает и наибольшее количество карбидов с размерами наноструктурных элементов ≤ 0,1 и 0,01 мкм (см. табл. 1).

Таблица 1. Параметры структуры порошкового белого чугуна после различных режимов компактирования

Чугун	Энергоноситель при распылении	Вариант компактирования	Количественное соотношение карбидов*, %, размером, мкм		
			≤2	≤1	0,01(0,1)
ПБЧ-2,5	Азот Азот Вода Вода	А	30	50	20
ПБЧ-3,2		А	35	45	20
ПБЧ-1,9		А	20	70	10
		Б	20	10	(70)
		В	10	80	(10)
		А	15	75	10
	Вода	Б	20	70	10**
ПБЧ-2,9		В	10	80	(10)

* В том числе наноструктурированных.

** Размером ≤ 0,2 мкм.

Увеличение содержания углерода от 2,5 до 4,5 % приводит к падению уровня прочности и ударной вязкости в 2–3 раза. Это обусловлено тем, что с увеличением доли углерода возрастает объемная доля хрупкой и малоэнергоемкой карбидной фазы, через участки которой наиболее легко движется магистральная трещина.

Установлены оптимальные режимы термической обработки, обеспечивающие наиболее благоприятное сочетание механических свойств порошкового белого чугуна: отжиг при 800 °С в течение 1 ч; закалка при 850 °С, отпуск при 600 °С. Чугуны, полученные методом горячей экструзии (вариант А), обладают после отжига более высокой прочностью при изгибе $\sigma_{изг} = 1400 - 1800 \text{ Н/мм}^2$ и пластичностью (ударной вязкостью) $KС = 20 - 25 \text{ Дж/см}^2$, а после закалки и высокого отпуска: $\sigma_{изг} = 1600 - 1900 \text{ Н/мм}^2$, $KС = 14 - 15 \text{ Дж/см}^2$ (табл. 2). Значительно уступают по прочности ПБЧ, полученные методом холодного и горячего прессования (варианты Б и В). Установлена практически линейная зависимость твердости от содержания углерода и, следовательно, от величины объемной доли карбидов. С увеличением содержания углерода от 2,5 до 4,5 % твердость HRC возрастает от 34 до 57 при отжиге и от 57 до 60 – при закалке от 800 °С.

Таблица 2. Механические свойства порошкового белого чугуна после оптимальных режимов термической обработки*

Чугун	Вариант	Отжиг		Термическое улучшение	
		Н/мм ²	Дж/см ²	Н/мм ²	Дж/см ²
ПБЧ-1,9	А	1600	25	1900	14
	Б	800	10	850	8
	В	900	20	920	16
ПБЧ-2,5	А	1800	25	1900	15
ПБЧ-2,9	А	1500	20	1600	14
	Б	550	10	600	8
1	2	3	4	5	6
ПБЧ-3,2	В	600	15	650	10
	А	1400	20	1600	14

* Отжиг в течение 1 ч при 800 °С термическое улучшение – закалка от 850 °С + отпуск при 600 °С.

Частичное растворение сравнительно крупных карбидов в аустените при нагреве ПБЧ до температуры закалки (850 °С) и последующее выделение большого числа мелких наноструктурированных карбидов при высоком отпуске (600 °С) приводят к упрочнению матрицы, повышению твердости и износостойкости материала.

Испытания на установке трения-износа по схеме вал – колодка при удельном давлении 5, 10 и 25 МПа показали, что с увеличением содержания углерода износостойкость возрастает, достигая максимума у термически улучшенного чугуна (закалка от 850 °С и отпуск при 600 °С) и минимума после

закалки и отпуска при 200 °С. С увеличением содержания углерода более 3,5 % износостойкость практически не зависит от термической обработки. В результате отжига и высокого отпуска резко возрастает количество ультрадисперсных мелких частиц карбидной фазы ($< 0,02$ мкм), причем после отпуска их значительно больше. Присутствие наноструктурированных карбидных частиц может служить объяснением более высоких значений износостойкости.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что наилучшим сочетанием механических свойств и износостойкости обладает порошковый белый чугун, полученный методом горячей экструзии распыленных порошков с содержанием углерода 2,5 % и наноструктурированными карбидными частицами, после закалки от 850 °С в воде и отпуска при 600 °С в течение 1 ч.

Образование наноподобных структур на основе карбидной фазы обеспечивает повышение износостойкости по сравнению со штатно применяемыми материалами в 1,5 – 2 раза. Оптимизированы массовые доли углерода, хрома и марганца, что позволило увеличить содержание углерода до 3,5 % и сохранить пластичность (деформируемость), недоступные при традиционно применяемых технологиях.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что наилучшим сочетанием механических свойств и износостойкости обладает порошковый белый чугун, полученный методом горячей экструзии распыленных порошков с содержанием углерода 2,5 % и наноструктурированными карбидными частицами, после закалки от 850 °С в воде и отпуска при 600 °С в течение 1 ч. Образование наноподобных структур на основе карбидной фазы обеспечивает повышение износостойкости по сравнению со штатно применяемыми материалами в 1,5 – 2 раза. Оптимизированы массовые доли углерода, хрома и марганца, что позволило увеличить содержание углерода до 3,5 % и сохранить пластичность (деформируемость), недоступные при традиционно применяемых технологиях.

© Т.В. Ларина, 2008

УДК 006:681.7

С.В. Хатюшин

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЕРКИ УСТАНОВКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ ЛЮКСМЕТРОВ, ЯРКОМЕРОВ И ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

S.V. Khatyushin

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

DEVELOPMENT OF TESTING METHODS FOR THE INSTALLATION AINED AT INSPECTION AND CALIBRATION OF LUXMETERS, BRIGHTNESS METERS AND MEASUREMENT OF RADIATION DETECTORS RELATIVE SPECTRAL SENSITIVITY

The article presents the methods developed by the authors and approved for testing the installation aimed at the inspection and calibration of luxmeters, brightness meters and measurement of radiation detectors relative spectral sensitivity.

Поверка люксметров в Новосибирском ЦСМ проводится на установке УПЛ-1, которая имеет узкий диапазон создаваемой освещенности (от 2 до 400 лк) и большую погрешность (около 6 %). Эти характеристики приемлемы для поверки люксметров старого образца, таких как Ю-116 и Ю-117, но современное приборостроение создает новые требования для поверки. Также не было возможным проводить поверку яркометров. Для повышения точности воспроизведения и передачи единицы физической величины была разработана и собрана установка на базе фотометрической скамьи ФС, в которую вошли две группы рабочих эталонов первого разряда:

- Группа светоизмерительных ламп СИС 107-500;
- Группа фотометрических головок ФГ5М.

Для целей утверждения типа этой установки встала необходимость разработать методику поверки, которая приведена ниже.

Область распространения.

Настоящая методика поверки распространяются на установку, предназначенную для поверки и калибровки люксметров и яркометров, устанавливающих методы и средства первичной и периодической поверки.

1. Операции поверки.

1.1. При проведении поверки должны выполняться операции указанные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование операций	Номера пунктов методики	Проведение операций при	
		первичной поверке	периодической поверке
Внешний осмотр	6.1	да	да
Опробование	6.2	да	да
Определение погрешности измерения расстояния по шкале фотометрической скамьи	6.3.1	да	нет
Определение длины измерителя расстояния	6.3.2	да	да
Определение погрешности, обусловленной неравномерностью распределения яркости по поверхности рассеивателя	6.3.3	да	да
Определение диаметра рассеивателя и погрешности его измерения	6.3.4	да	нет

2. Средства поверки.

2.1. При проведении поверки должны применяться следующие средства поверки:

– Эталонная рулетка металлическая по ГОСТ 7502-98 2-го класса точности;

– Штангенциркуль (ГОСТ 166-80) с ценой деления 0,05 мм;

– Фотодиод ФД-256;

– Штангенрейсмасс – ШР 60-630 – ГОСТ 164-73;

– Плита поверочная – ГОСТ 10905-75;

– Автоколлимационная установка –

М34.11.501

ЮПС – 1

– Пластина плоскопараллельная –

М34.11.501

ВС – 3

– Поверочная линейка ЛД-1-200 – ГОСТ 8026-75;

– Поверочная линейка УТ-1-1000-60-ш – ГОСТ 8026-75;

2.2. Средства поверки должны иметь действующий документ о поверке (аттестации).

3. Требования безопасности.

Требования безопасности при поверке должны соответствовать требованиям, изложенным в руководствах по эксплуатации (РЭ) вспомогательного оборудования и средств поверки, поверяемой установки.

4. Условия поверки.

При проведении поверки должны соблюдаться следующие условия:

– Температура окружающей среды $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$;

- Относительная влажность воздуха $65\pm 15\%$;
- Атмосферное давление, кПа..... 101 ± 4 ;
- Напряжение питающей сети, В..... 220 ± 22 .

5. Подготовка к поверке.

Все приборы и средства измерений, входящие в состав установки, должны быть подготовлены к использованию в соответствии с их руководством по эксплуатации и иметь действующие свидетельства о поверке.

6. Проведение поверки.

6.1. Внешний осмотр.

При проведении внешнего осмотра проверяется соответствие следующим требованиям:

- Установка укомплектована в соответствии с требованиями технической документации;
- Отсутствие механических повреждений, влияющих на работу установки и ухудшающих ее внешний вид;
- Отсутствие засветки фотометрических головок от внешних источников света;
- Гравировка штрихов, цифр и знаков должна быть выполнена четко и тщательно заполнена краской;
- Щитки образцовых ламп должны быть окрашены в черный матовый цвет;
- Экраны должны быть обшиты черным бархатом, не допускается наличие складок, небрежных и грубых швов, а также осыпки и разлохмачивания бархата в швах;
- Соответствие электромонтажа схеме, приведенной в руководстве по эксплуатации;
- Наличие заземления.

6.2. Опробование.

6.2.1. При проверке качества сборки и взаимодействия частей следует установить соответствие следующим требованиям:

- Приспособления, входящие в комплект установки, должны без приложения значительных усилий устанавливаться в посадочные отверстия тележек;
- Перемещение тележек по направляющим должно осуществляться от руки плавно, без скачков и заеданий;
- Тормоза тележек должны обеспечивать надежное крепление их в требуемом положении, при включении тормоза не должно происходить сдвига тележки;
- Держатель лампы должен обеспечивать жесткое крепление лампы;
- Экраны должны свободно, без заеданий перемещаться по скамье и надежно крепиться в заданном положении;
- Кронштейн малых экранов должен легко и надежно устанавливаться на держателе фотоэлементов;

– Малые экраны должны легко передвигаться по кронштейну и надежно стопориться в заданном положении;

6.2.2. Проверка стрелы прогиба труб производится с помощью измерительной линейки и набора щупов. Величина прогиба не должна быть более $\pm 0,2$ мм на длине 130 мм и $\pm 0,6$ мм на длине 1000 мм.

6.2.3. При проверке качества сборки измерителя расстояния следует установить соответствие следующим требованиям:

а) Непараллельность плоскости, проходящей через упоры наконечника измерителя расстояния, плоскости, проходящей через вертикальные штрихи его сеток, не должна быть более $\pm 10'$. Для определения параллельности плоскостей, проходящих через упоры наконечника и через вертикальные штрихи сеток, измеритель расстояния устанавливают упорами наконечника на горизонтальную поверочную плиту. Штангенрейсмассом измеряют расстояние A_1 и A_2 от основания плиты до каждого перекрестия измерителя расстояния. Разность ($A_1 - A_2$) должна быть не более 0,7 мм;

б) Неперпендикулярность плоскости, проходящей через упоры наконечника измерителя расстояния к оси скамьи не должна быть более $\pm 10'$. Проверка производится с помощью автоколлимационной установки.

Измеритель расстояния устанавливается на каретке измерителя расстояния таким образом, чтобы наконечники находились на уровне автоколлимационной трубки установки. К упорам наконечника прижимают плоскопараллельную пластину из комплекта установки. Покачиванием пластинки в вертикальной плоскости на упорах наконечника добиваются появления бликов в поле зрения трубки. По сетке окуляра трубки определяют отклонение от перпендикулярности. Проверка производится в двух положениях измерителя расстояния;

в) Непараллельность горизонтальных штрихов перекрестий измерителя расстояния к плоскости, проходящей через верхние образующие направляющих труб не должна быть более $\pm 10'$.

Для проверки параллельности горизонтальных штрихов перекрестий измерителя расстояния плоскости, проходящей через верхние образующие направляющих труб, на направляющие трубы устанавливается плоскопараллельная пластина. Штангенрейсмассом определяется расстояние от пластины до концов горизонтального штриха сетки. Разность отсчетов не должна превышать $\pm 0,1$ мм;

г) Несовпадение расстояний упоров наконечника измерителя расстояния и центров сеток до направляющих скамьи не должно быть более $\pm 1,5$ мм.

Для проверки на направляющие трубы устанавливают плоскопараллельную пластину. Штангенрейсмассом измеряют расстояние от пластины до центров сеток и упоров наконечника измерителя расстояния. Проверка производится в двух положениях (на 2-х фиксаторах) измерителя расстояния.

6.2.4. При проверке качества сборки лимба следует установить соответствие следующим требованиям:

а) Зазор между лимбом и индексом не должен быть более 0,1 мм.

Проверка ширины зазора между лимбом и индексом производится с помощью набора щупов;

б) Гравированные поверхности лимба и индекса должны лежать в одной плоскости с отклонением не более $\pm 0,1$ мм.

Проверка производится с помощью индикатора;

в) При установке лимба на деление «0» плоскость, проходящая через ось вращения лимба и через деление $0^\circ - 180^\circ$ лимба должна быть перпендикулярна оси скамьи. Отклонение от перпендикулярности не должно быть более $15'$.

Проверка производится с помощью автоколлимационной установки. Плоскопараллельная пластина из комплекта установки устанавливается в специальной оправе в гнезде лимба.

Выставка автоколлимационной трубки аналогично п. 6.2.3.

6.2.5. Проверка перпендикулярности опорной плоскости держателя.

Проверка производится с помощью автоколлимационной установки. Автоколлимационная трубка выставляется относительно оси скамьи аналогично п. 6.2.3. Плоскопараллельная пластинка из комплекта установки устанавливается на место фотоэлемента.

Опорная плоскость держателя фотоэлемента должна быть перпендикулярна оси скамьи. Отклонение от перпендикулярности не должно быть более $15'$.

6.2.6. Проверка диапазона создаваемой освещенности.

Максимальное значение освещенности создается с помощью излучателя прожекторного типа АМ13.1100-600 на расстоянии (0,7-0,75) м от последнего.

Измеренное значение освещенности должно быть не менее 80000 лк.

Минимальное значение освещенности создается излучателем малой мощности АМ13.1100-700, на расстоянии (1-1,2) м от лампы с применением нейтрального светофильтра из набора КНФ-1 ($\tau=5,5\%$).

Измеренное значение освещенности не должно превышать 1 лк.

Измерение освещенности должно проводиться группой фотометрических головок (рабочий эталон 1-го разряда) по ГОСТ 8.023-2003 (погрешность 1,5%), входящих в состав установки.

6.2.7. Проверка диапазона создаваемой яркости.

Максимальное значение яркости создается с помощью излучателя прожекторного типа АМ13.1100-600 и рассеивателя с матовым стеклом (толщиной 3 мм), установленным на расстоянии 1 м от излучателя.

Яркость светорассеивающего стекла определяется по формуле:

$$L = \frac{4I_{\Phi Г} \cdot l^2}{\pi d^2 \cdot S_{\Phi Г}} \quad (\text{кд/м}^2) \quad (1)$$

$I_{\Phi Г}$ – ток фотометрической головки, измеряемый прибором Щ300;

l – расстояние от светорассеивающего стекла до фотометрической головки;

d – диаметр диафрагмы;

$S_{\text{фг}}$ – чувствительность фотометрической головки из свидетельства о поверке.

Измеренное значение яркости должно быть не менее 50000 кд/м².

Минимальное значение яркости создается излучателем АМ13.1100-700 при размещении рассеивателя с молочным стеклом МС-23 на расстоянии 1 м от излучателя.

Измеренное значение яркости не должно превышать 1 кд/м².

Для измерения расстояния нужно использовать рулетку металлическую по ГОСТ 7502-98 2-го класса точности, L = 3000 мм.

6.2.8. Проверка фоновой засветки.

Закрывать прямоугольное окно перед лампой светонепроницаемым материалом и произвести измерение фототока при открытой и закрытой крышке фотометрической головки.

Фоновая засветка должна отсутствовать.

6.3. Определение метрологических характеристик.

6.3.1. Определение погрешности измерения расстояний по шкале фотометрической скамьи производится при помощи эталонной рулетки 2-го класса точности по ГОСТ 7502-98. Измерение проводят в четырех точках шкалы в диапазоне от 0,5 до 2,7 м, совместив первые штрихи эталонной рулетки и фотометрической скамьи.

Погрешность оценивается по формуле

$$\Delta_p = \frac{I_{\text{изм.}} - I_{\text{действ.}}}{I_{\text{действ.}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где $l_{\text{изм.}}$ – расстояние, измеренное по шкале фотометрической скамьи;

$l_{\text{действ.}}$ – показания эталонной рулетки.

Погрешность измерения расстояния по шкале фотометрической скамьи не должно превышать 0,2%.

6.3.2. Определение длины измерителя расстояния производится штангенрейсмасом. Измеритель расстояния устанавливают на поверочную плиту, штангенрейсмасом измеряют расстояние A_1 и A_2 от плоскости плиты до каждого перекрестия измерителя расстояния. За длину измерителя расстояния принимается, измеренная с погрешностью $\pm 0,1$ мм.

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

Длина измерителя расстояния заносится в паспорт прибора.

6.3.3. Определение погрешности, обусловленной неравномерностью распределения яркости по поверхности рассеивателя, производят с помощью фотодиода ФД-9К или ФДК-155. Фотодиод прикладывают вплотную к рассеивателю и проводят серию измерений фототока I_i в 5 точках: в центре и по краям через 90°.

Погрешность определяется по формуле

$$(\Delta) = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2I_{\text{cp}}} \cdot 100\%$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – максимальное и минимальное из полученных значений фототока;

$I_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое результатов измерения фототока.

Погрешность определяется для двух рассеивателей, с молочным и матовым стеклом.

Значение погрешности не должно превышать 1,5 %.

6.3.4. Определение диаметра рассеивателя и погрешности его измерения.

Измерения проводятся на восьми несовпадающих между собой диаметрах рассеивателя (примерно через 22,5°) штангенциркулем по ГОСТ 166-80 с ценой деления 0,05 мм.

За результат измерения диаметра рассеивателя ($d_{\text{ср}}$) принимается среднее арифметическое из 8 измерений.

Погрешность измерения диаметра рассеивателя определяется по формуле

$$\Delta_d = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2d_{\text{ср}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

где $d_{\max}$ и $d_{\min}$ – максимальное и минимальное из измеренных значений диаметра;

$d_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое результатов измерения диаметра, заносится в паспорт прибора.

Диаметр и погрешность его измерения определяется для двух рассеивателей, с молочным и матовым стеклом.

Погрешность измерения диаметра не должна превышать 0,1 %.

7. Оформление результатов поверки.

7.1. Результаты, полученные при поверке, заносятся в протокол.

7.2. Установка, прошедшая поверку с положительными результатами, признается годной и допускается к дальнейшему использованию. На нее выдается свидетельство о поверке установленной формы.

7.3. Установка, не прошедшая поверку, к эксплуатации не допускается, и на нее выдается извещение о непригодности.

© С.В. Хатюшин, 2008

УДК 669.01

В.А. Неронов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО
РАН, Новосибирск

Т.В. Ларина, А.Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

СНОВА О ДИАГРАММЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ БОР - АЛЮМИНИЙ

V.A. Neronov

S.A. Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics of the Siberian
division of the Russian academy of sciences

T.V. Larina, A.V. Sosnov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

AGAIN ON BORON-ALUMINIUM SYSTEM STATE DIAGRAM

A variant of the diagram of Boron – aluminium state is offered.

Некоторые бориды алюминия впервые были получены в 1857 г. Сент - Клер Девиллем и Вёлером, ошибочно трактовавшими их первоначально как кристаллические модификации бора.

Бориды алюминия обладают малым удельным весом, высокими температурами плавления, химической стойкостью, большим поперечным сечением захвата тепловых нейтронов и другими важными для современной техники свойствами.

Несмотря на практическую значимость соединений бора с алюминием, диаграмма состояния системы бор - алюминий до настоящего времени окончательно не разработана. Это обстоятельство обусловлено трудностью получения чистых образцов бора и высокой реакционной способностью бора и алюминия.

По системе В - Al имеется большое число публикаций, сведения о которых обобщены в работах [1-6]. Основные результаты, приведенные в этих публикациях, изложены ниже.

Условия образования фаз в системе бор - алюминий исследовались во многих работах. Было показано, что в системе существуют два борида: AlB_2 и $\alpha-AlB_{12}$. Соединения со структурой AlB_{10} , $\beta-AlB_{12}$ и, вероятно, $\gamma-AlB_{12}$, описанные в литературе рядом исследователей как двойные, образуются, согласно другим данным, в присутствии третьих элементов (углерода, кремния, РЗМ и др.) и представляют, таким образом, тройные фазы. Состав боридов со структурой AlB_{10} и $\beta-AlB_{12}$ был описан соответственно формулами C_4AlB_{24} и $C_2Al_3B_{48}$.

Качественно новый результат проведенных нами экспериментов заключается в том, что в соединении $C_2Al_3B_{48}$ было обнаружено переменное содержание углерода (0,65–1,32 %), что значительно меньше стехиометрического (3,85 %). Это положение было подтверждено другими исследователями. Поскольку кремний является аналогом углерода, можно ожидать, что в системе В - Al - Si, также не исключено образование тройного соединения со структурой типа $\beta-AlB_{12}$. Действительно, в системе В - Al - Si нами было установлено образование тройного соединения $SiAl_3B_{48}$, кристаллизующегося в тетрагональной сингонии ($a = 0,891$, $c = 0,505$ нм) и аналогичного фазе $C_2Al_3B_{48}$.

С другим элементом подгруппы углерода - германием получить подобное соединение не удалось. По-видимому, устойчивость тройного соединения определяется некоторым минимальным статистическим весом SP^3 - конфигураций образующих его атомов.

В целом можно отметить, что представленные в ряде работ доказательства существования двойного борида $\beta-AlB_{12}$ нельзя считать убедительными (отсутствие анализа на углерод, взаимодействие с материалом тигля).

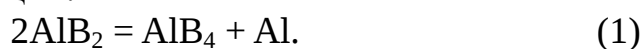
Анализ условий, в которых был синтезирован борид AlB_{10} , также не позволяет сделать однозначный вывод о том, что указанное соединение получено в отсутствие углерода. Интересно отметить, что как в кристаллах $C_2Al_3B_{48}$, так и в кристаллах C_4AlB_{24} было обнаружено переменное содержание углерода, которое оказалось значительно меньше стехиометрического.

Особенности образования фазы $\gamma-AlB_{12}$ не ясны. Отмечается, что каркас из атомов бора в структуре $\gamma-AlB_{12}$ родствен по строению каркасу структуры $\alpha-AlB_{12}$. Многие исследователи полагают, что борид $\gamma-AlB_{12}$ образуется в присутствии небольших количеств кремния, редкоземельных и переходных металлов IV и VI групп. Это подобно ситуации в случае еще одной модификации AlB_{12} – с моноклинной структурой, которая стабилизируется азотом, а самостоятельно не существует.

Таким образом, полной ясности об условиях и механизме образования соединений бора с алюминием нет.

Обращает внимание на себя относительно старая публикация 1953 года, в которой Лиль и Еничек [7] сообщают о распаде гексагонального диборида алюминия AlB_2 при комнатной температуре, сопровождающемся увеличением объема.

Лиль и Еничек представляют процесс распада следующим образом. Сначала гексагональный AlB_2 превращается в другую модификацию более низкой симметрии. Затем последняя претерпевает эвтектоидный распад по реакции:



Процесс превращения ускоряется при нагреве до 100 - 150° С и идет тем быстрее, чем выше содержание AlB_2 в сплаве. Конечный продукт представляет тонкий серый порошок с содержанием 60,6 - 60,8 масс. % В.

На многие годы о факте распада AlB_2 практически «забыли», хотя он является очень важным с точки зрения использования материала в технике.

Вопрос о распаде AlB_2 вновь поставлен в связи с публикацией [8] в 2004 г. В этой работе подтверждается факт распада диборида алюминия при охлаждении (ниже 213°C). Однако, сама реакция распада выглядит следующим образом:



Примечательно, что авторы [8] не ссылаются на работу [7], что указывает независимость полученных в [8] данных.

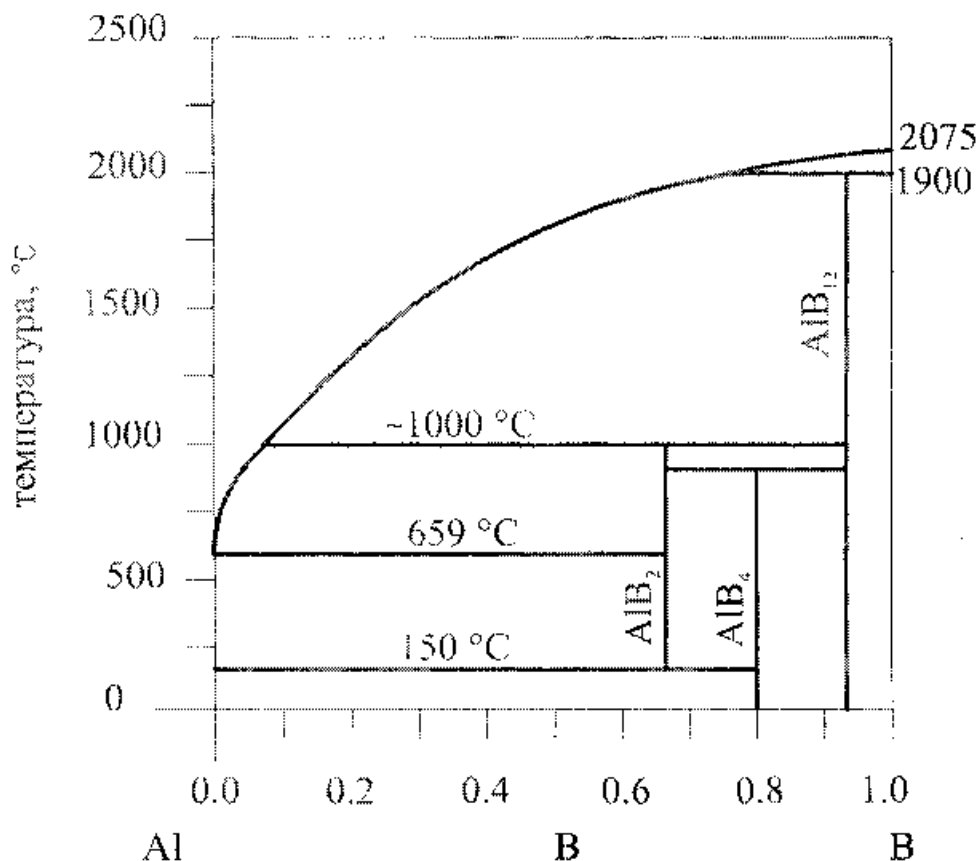
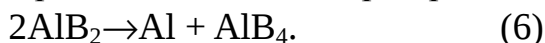


Рис. Диаграмма В – Al

На рисунке представлена диаграмма состояния системы бор - алюминий с учетом результатов Лиля и Еничека о распаде диборида алюминия. Из этой диаграммы следует, что при нагреве протекают следующие реакции распада:



При охлаждении диборид распадается по схеме:



Изложенное свидетельствует о том, что фазовые равновесия в системе В – Al требуют дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неронов, В.А. Бориды алюминия / В.А. Неронов. – Новосибирск: Наука, 1966. – 72 с.
2. Самсонов, Г.В. Бориды / Г.В. Самсонов, Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
3. Бориды алюминия / П.С. Кислый, В.А. Неронов, Т.А. Прихна, Ю.В. Бевза. – Киев: Наумова думка, 1990. – 192 с.
4. Серебрякова, Т.И. Высокотемпературные бориды / Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов, П.Д. Пешев. – М.: Металлургия, 1991. – 368 с.
5. Неронов, В.А. Обзор данных по диаграмме состояния системы Al-B / В.А. Неронов // Порошковая металлургия. – 1989. – № 10. – С. 58–62.
6. Неронов, В.А. Цикл исследований и разработок экстремальных процессов получения тугоплавких боридов и материалов на их основе: докт. дис. / В.А. Неронов. – Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 1998. – 53 с.
7. F. Lihl, P. Jenitschek. Über den zerfall des hexagonalen Aluminiumborids AlB_2 / Z. Metallkunde / 1953, Band 44, S. 414–417.
8. D. Mirkovic, J. Grobner, R. Schmid-Fetzer, O. Fabrichnaya, H.L. Lukas. Experimental study and thermodynamic re-assessment of the Al – B system. / Journ. of Alloys and Compounds. 2004. Vol. 384. № 1–2, P. 168–174.

© В.А. Неронов, Т.В. Ларина, А.Н. Соснов, 2008

УДК 628.517.4, 539.3

А.И. Родионов

СГГА, НГТУ, Новосибирск

Г.С. Юрьев

НГТУ, Новосибирск

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВИБРОЗАЩИТНЫЕ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

A.I. Rodionov

SSGA, NSTU, Novosibirsk

G.S. Yuriev

NSTU, Novosibirsk

THE PRECISION TECHNOLOGICAL VIBRATION PROTECTION PLATFORMS FOR OPTICAL AND OPTIC-ELECTRONIC DEVICE BUILDING

There are the results of experimental and theoretical researches which explain the experimentally observed increasing of internal friction in the vibration protection systems, which use quasi-zero stiffness effect. Here elastic element was done as a bar, stiffness of which is decreasing by compressive force. The phenomenon is more marked when minimum stiffness bars takes place. It corresponds to the infra-low oscillation frequency in the system “vibration protection platforms – object” (0,3-0,5 hertz)

The contents of experiments and some results are described in [1]. It is discovered that elastic hysteresis is essentially increased under condition of cycling strain of compression bar when longitudinal force P draw near approach to the critical Euler's force. The regularity beside of cognizing interest has a practical importance. To realize necessary damping in the vibration protection systems with such elastic bars. We have made techniques of synthesis of monolithic modules of qvasi-zero rigidity with given elastic, dissipative and geometrical characteristics. On their basis we created vibration protection systems for vibro-insulation of the sensitive optic-electronic equipments, elements. They work in production of microelectronic goods.

Patents of Russia protect all products and techniques.

Борьба с помехами возможна путем виброизоляции прецизионного оборудования: оно устанавливается на виброзащитные столы и платформы, опорами которых служат виброизоляторы. Однако множество их конструкций не удовлетворяет современным требованиям.

В системах виброизоляции, разработанных на кафедре теоретической механики и сопротивления материалов (ТМ и СМ) Новосибирского

государственного технического университета (НГТУ) под руководством проф. Юрьева Г.С., с упругим элементом типа рессоры-балки, жесткость которой снижается осевыми силами сжатия, экспериментально наблюдался аномальный рост гистерезисных потерь. Это явление наиболее заметно при минимальной жесткости балок, или инфранизкой собственной частоте колебаний в системах "балка-масса" защищаемого объекта. (0,3-0,5 Гц). Содержание экспериментов по исследованию эффекта роста гистерезисных потерь и некоторые результаты описаны в [1]. Сущность этих исследований состоит в том, что при статическом и циклическом деформировании продольно-сжатой балки диссипация энергии внутри нее может аномально увеличиваться, если продольная сила каким-либо способом приближается к критическому значению. Объяснение роста гистерезисных потерь при стремлении продольно-сжимающей силы к критическому значению было дано проф. Родионовым А.И. с кафедры Основ приборостроения СП Л в рамках феноменологической классической теории [2, 3]. Оно будет приведено в конце работы. Такая закономерность, помимо познавательного интереса, имеет большое практическое значение, например, для осуществления необходимого демпфирования в колебательных и виброзащитных системах, содержащих упомянутые упругие элементы.

Еще в 80-90-е годы 20-го века на кафедре ТМ и СМ НГТУ проф. Юрьев Г.С. с коллегами начал разрабатывать принципиально новые рессорно-пружинные анизотропно-упругие устройства (модули квазинулевой жесткости), работающие на основе этого эффекта [3-5]. В них сочетаются функции нелинейно-упругого элемента с квазинулевой жесткостью и направляющих движение без конструкционного, вредного трения. На базе этих элементов были разработаны макетные и опытные виброзащитные устройства. Наибольшее распространение получил упругий элемент в виде балки, рабочая (поперечная) жесткость которой управляется и снижается до нуля за счет распора - напряжений сжатия. Конструктивно балка выполнена заодно с опорной рамкой (камертон), что устраняет дефекты сборки и конструкционное трение. Остаточное внутреннее рассеяние энергии колебаний является наиболее целесообразным и во многих случаях достаточным для ограничения размахов в импульсных и резонансных режимах работы. Таким образом, нулевые значения упругих и диссипативных сил являются по существу теоретическим пределом эффективности виброизоляции, рекордное значение которой было получено при испытании наших образцов.

В реальных конструкциях во избежание большой статической осадки и раскачивания защищаемых объектов применяют нелинейно-упругий элемент с квазинулевой жесткостью, что достигается за счет введения обратной связи между прогибом балки и продольной в ней силой (вариация задаваемой начальной и рабочей форм изгиба балки). При значительном отклонении балки от рабочей точки происходит уменьшение распорной силы и восстановление жесткости – равновесия объекта. При создании виброзащитных устройств необходимо учитывать не только основные формы колебаний, но и всякого рода "паразитные". Если основная частота балки составляет 0.5 Гц, то ее следующая частота достигает порядка 1 кГц, что удовлетворяет многих потребителей.

Сложнее убрать резонансы плиты-столешницы, поэтому используются комбинированные многослойные, сотовые и ячеистые конструкции.

В эти же годы по заданию предприятий оптической и электронной промышленности СССР был создан типовой ряд универсальных столов и платформ для установки специального технологического и контрольного оборудования с массой от 30кг до 1,5 тонн, которые были использованы в производстве больших интегральных микросхем и оптических систем. Тяжелые платформы, которые обычно применяются для защиты оборудования с перемещающимися массами в рабочем процессе, имеют автоматическое управление несущей способностью упругого подвеса для оптимизации режима виброизоляции (минимальный коэффициент передачи) в реальном масштабе времени. Причем это управление не входит в классификацию управляемых упругих подвесов и происходит без изменения жесткости и, следовательно, эффективности защиты. Каждый узел управления подвесом содержит оптический датчик положения рабочего стола и двигатель-редуктор настройки несущей способности подвеса.

Результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний образцов виброзащитных платформ показали практическую их полезность и соответствие характеристик расчетным моделям. По коэффициенту передачи при виброизоляции эти платформы превосходили аналогичные отечественные и зарубежные устройства. Для сравнения приведем значения коэффициента передачи вибрации разработанных (с участием промышленного объединения "Обь", г. Искитим) платформ и аналогичных фирмы "Ньюпорт", США, в которых применены пневматические упругие элементы.

Частота возбуждения, Гц	2	4	8	16
Коэффициент передачи вибрации:				
Наш вариант	0,35	0,08	0,022	0,0075
Фирмы "Ньюпорт"	1,8	0,44	0,077	0,014

Точность работы одной из прецизионных технологических установок при использовании нашей виброзащитной платформы была повышена в 50 раз (НИИ "Восток", г. Новосибирск) и достигла величины 0.01 мкм.

Приведем объяснение роста гистерезисных потерь в наших модулях квазинулевой жесткости. Рассмотрим случай *статического нагружения*.

Традиционно учет внутренних потерь осуществляется через коэффициент поглощения Ψ [6-8].

$$\Delta E = \Psi E \quad (1)$$

ΔE - потери энергии в стержне за цикл нагружения; E - энергия упругой деформации. Такой способ учета внутренних потерь правомочен, когда Ψ и E не являются функциями параметра α . Здесь $\alpha = P / P_{kr}$, P_{kr} - критическая эйлерова сила. Однако, если хотя бы одна из этих величин является функцией α , то оценку потерь энергии за цикл нагружения можно сделать по теореме о среднем

$$\Delta E(\alpha) = \langle \Psi \rangle E(\alpha) \quad (2).$$

Анализ выражений (1,2) укажет на наличие или отсутствие аномального роста потерь при $\alpha \rightarrow 1$. Согласно [6] внутренняя энергия балки равна

$$E = 2F^2 \ell^3 / (\pi^4 EJ) \sum_{m=0}^{\infty} ((2m+1)^2 - \alpha)^{-2}, \quad (3)$$

тогда

$$\Delta E \approx K(1-\alpha)^{-2} + K \sum_{m=1}^{\infty} (16m^2(2m+1)^{-1}) \quad (4)$$

Здесь $K = 2\langle \Psi \rangle F^2 \ell^3 / (\pi^4 EJ)$ и в последней сумме величина α заменена на единицу, что мало влияет на результат, так как ряд является быстросходящимся. Анализ формулы (4) показывает, что при $\alpha \rightarrow 1$ должен наблюдаться рост гистерезисных потерь, что и имеет место в эксперименте.

Рассмотрим *динамический* вариант решения задачи. В этом случае объясним эффект в рамках *модели с комплексным модулем Юнга*. Как известно [9], введение комплексного модуля упругости автоматически закладывает наличие гистерезисных потерь любой природы. Рассмотрим эту модель.

Пусть $E = E + i\varepsilon$, ε/E - мало. В этом случае уравнение поперечных колебаний стержня примет вид

$$E^* J \frac{\partial^4 y^*}{\partial x^4} + P \frac{\partial^2 y^*}{\partial x^2} + \rho S \frac{\partial^2 y^*}{\partial t^2} = l^{-1} F^*(t) \delta(x-d) \quad (5)$$

$$\text{и } y^* = \sum_{m=1}^{\infty} y_m^*(t) \sin(m\pi d/l) = y + iq \ddot{y}_m^* + \Omega_m^2 y_m^* = m(2\pi F^*(t) / \rho S l) \sin(m\pi d/l)$$

Здесь

$$\Omega_m^2 = (\pi/l)^4 (\rho S)^{-1} [EJ - P(m\pi/l)^{-2} + i\varepsilon J] = m^4 \omega_0^2 \sqrt{(1-\alpha/m^2)^2 + (\varepsilon/E)^2} \exp(i \arctg(\varepsilon/(E(1-\alpha/m^2)))$$

$$\text{причем } \omega_m = \text{Re } \Omega_m, \quad \beta_m = \text{Im } \Omega_m$$

При гармоническом возбуждении добротность системы для каждой моды примет вид

$$Q_m = 0.5 \text{ctg}(0.5 \arctg(\varepsilon/(E(1-\alpha/m^2)))) \quad (6)$$

Анализ приведенных формул показывает, что через небольшой промежуток времени колебание балки будет протекать на своей первой форме. В этом случае ее добротность будет определяться выражением

$$Q \approx Q_1 = 0.5 \text{ctg}(0.5 \arctg(\varepsilon/(E(1-\alpha)))) \quad (7)$$

Анализ (7) однозначно показывает, что при $\alpha \rightarrow 1$ добротность балки будет падать. Это указывает на рост гистерезисных потерь при стремлении сжимающей силы к критическому значению.

Таким образом, наличие эффекта роста гистерезисных потерь и уменьшения основной собственной частоты колебания системы при стремлении значения сжимающей силы к критической эйлеровой силе считаем доказанным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юрьев, Г.С. Состояние совершенной неупругости твердого тела / Г.С. Юрьев // Изв. СО АН СССР– 1988.: сер.техн. науки. – № 11. – С. 101–105.
2. Родионов, А.И. Об аномальном росте гистерезисных потерь в продольно-сжатых элементах стержневых виброизоляторов при стремлении сжимающих к критическому значению / А.И. Родионов, Г.С. Юрьев // Вопросы динамики механических систем: сб. науч. тр. / Новосиб. эл.-тех. ин-т; отв.ред. Г.С. Мигиренко.– Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1989. – С. 107–112.
3. Юрьев, Г.С. Виброзащитные устройства для прецизионного технологического оборудования в производстве БИС и СБИС / Г.С. Юрьев, Б.К. Бахтерев, В.И. Лазарев // Электронная промышленность. – 1990. – № 5. – С. 33–36.
4. Пат. 2093730 РФ, МКИ6F16F 13/00. Виброзащитная платформа / Г.С. Юрьев // Изобретения. – 1992.
5. Пат. 1155803 РФ, МКИ6F16F 13/00; F16F 3/02. Амортизатор / Г.С. Юрьев // Изобретения. – 1993.
6. Тимошенко, С.П. Статические и динамические проблемы теории упругости: монография / С.П. Тимошенко. – Киев: Наукова думка, 1975. – 564 с.
7. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах: монография / В.С. Постников – М.: Металлургия, 1974. – 352 с.
8. Шпигельбурд, И.Я. Некоторые вопросы учета внутреннего трения в материале при колебаниях элементов конструкций: учеб.пособие / И.Я. Шпигельбурд; Новосиб. электро-техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1970. – 39 с.
9. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1978. – Т. I. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. – 1978. – 352 с.

© А.И. Родионов, Г.С. Юрьев, 2008

УДК 681.7.067

А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, С.В. Критинина

СГГА, Новосибирск

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОШИБОК ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОЧНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛИНЗ

A.N. Sosnov, N.K. Sosnova, S.V. Kritinina

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

OPTICAL METHODS FOR CONTROL OF ERRORS OF PRODUCING OF PRECISE CYLINDRICAL LENSES

The use of contact-mechanical devices (ПКР) for measuring a turn of two-dimensional refracting surfaces is rather efficient in serial and large-scale production. For a small-scale production of the details more convenient may be a device which is not meant for a certain lens type and size. Moreover the control by a mechanical device may always damage the polished surface of the detail. In this respect the optical methods of measurement have certain advantages.

Автоколлимационный метод

В основу метода положен принцип автоколлимации из центров кривизны цилиндрических поверхностей контролируемой линзы, в результате чего результаты измерений не искажаются оптическим действием детали. Основными достоинствами метода следует считать высокую точность измерений, универсальность (с точки зрения диапазона контролируемых деталей) и возможность получать действительные значения углов разворота цилиндрических поверхностей и децентрировки линз.

Оптическая схема устройства (рис. 1) состоит из двух ветвей, одинаковых по структуре и принципу действия, условно называемых далее верхней и нижней.

Входящие в обе трубки микрообъективы (13-14) с $f' = 20$ мм ($\Gamma \approx 8^x$) повышают чувствительность схемы к угловым смещениям бликов, увеличивая тем самым точность измерений. Апертура пучков должна быть по

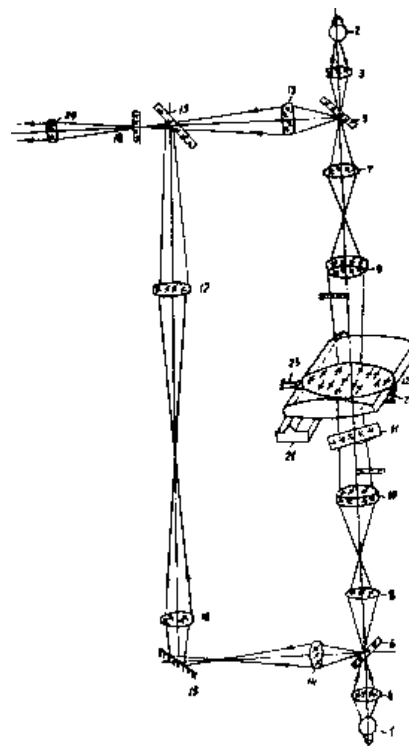


Рис. 1. Оптическая схема автоколлиматора

возможности большей для повышения чувствительности наводок. Угол разворота цилиндрических поверхностей линзы (угол β) измеряют следующим образом. Контролируемую линзу (12) устанавливают на столике прибора на нож (21) и сферическую опору (22) и прижимают к боковому зазору (23). Фокусировкой объективов (7 – 9 и 8 – 10) совмещают изображение марки с центрами кривизны обеих поверхностей линзы и приводят автоколлимационные блики в поле зрения окуляра. Затем перемещают столик с деталью вдоль ее оси так, чтобы оптическая ось прибора прошла вблизи одного из краев светового диаметра линзы. Наклоном детали с помощью регулировочных винтов столика центры кривизны поверхностей детали приводят на оптические оси ветвей.

При этом блики в окуляре сливаются в линию. Перемещают столик параллельно образующей нижней поверхности, пока ось светового пучка не выйдет к противоположному краю светового диаметра линзы. Величина Δ_p , расхождения бликов в поле зрения окуляра характеризует угол разворота поверхностей и определяется по формуле (1)

$$\operatorname{Tg}\beta = \frac{\Delta_p}{L}, \quad (1)$$

где L – величина перемещения детали (ее световой диаметр).

Для удобства измерений в схеме устройства предусмотрен оптический микрометр (11) в виде плоско-параллельной пластинки, по углу наклона которой (необходимой для сведения бликов) оценивают величину смещения центров кривизны поверхностей. Узел компенсатора – микрометра представляет съемное устройство, устанавливаемое перед нижней автоколлимационной трубкой и обеспечивающее точность отсчета 1-2 мкм.

Устройство позволяет определить величину геометрической децентрировки контролируемой детали. Для этого линзу с приведенными на оптические оси ветвей центрами кривизны поверхности переворачивают вокруг вертикальной оси на 180° и наблюдают положения бликов для того же сечения детали. Их расхождение характеризует величину смещения центра кривизны верхней поверхности (ее линейную децентрировку). Более удобно выражать ее в угловой мере формула (2)

$$A = \frac{\Delta}{R}, \quad (2)$$

где α – децентрировка (угловая косина) линзы, Δ – линейная децентрировка верхней поверхности, где R – радиус ее кривизны.

Для практических целей достаточно определить величину α в двух трех сечениях линзы. Предлагаемый метод может быть использован и для контроля склеенных компонентов, и в самом процессе склейки – для ориентации осей линз параллельно друг другу. Наличие двух оптических ветвей позволяют сократить время на эти операции.

Погрешность метода в определении угловой величины непараллельности (разворота) поверхностей складывается из следующих ошибок.

1. Угловая погрешность приведения автоколлимационного блика от базовой поверхности (обычно большего радиуса) в центр биссектора у обоих краев детали формула (3)

$$\sigma_1'' = \frac{\sqrt{2}\Delta\alpha f_{ок}'}{2V_{об/мин} f_{об}'}, \quad (3)$$

где $\Delta\alpha = 20''$ – чувствительность глаза к биссекритированию слабо контрастного объекта, $f_{ок}'$ – фокусное расстояние используемого окуляра (для $\Gamma = 15^x$ $f_{ок}' = 16$ мм), $f_{об}''$ – фокусное расстояние объектива трубки, $V_{об/мин}$ – увеличение микрообъектива.

2. Угловая погрешность отсчета расстояний между автоколлимационными бликами от обеих поверхностей с помощью оптического микрометра формула (4)

$$\sigma'' = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{R_{пов.}}\right)^2 + \theta^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{0,01 \times \rho^n}{R_{пов.}}\right)^2 + \theta^2}, \quad (4)$$

где $\Delta a = 1 \text{ мкм}$ – погрешность отсчета по оптическому микрометру,

$R_{пов.}$ – радиус верхней (не базовой) поверхности, $\theta \approx 2\sigma_1'' \approx 1''$ – погрешность повторного (двойного) приведения блика от верхней поверхности на середину биссектора (в пространстве предметов). Тогда для $R_{пов.} = 25$ мм $\sigma_2'' = \pm 8''$.

3. Угловая погрешность направляющих параллельного смещения стола (на длину до $L = 120$ мм) формула (5)

$$\sigma_3'' = \pm \frac{\Delta b}{p} \rho'', \quad (5)$$

где $\Delta b = 1,5 \div 2,0$ мкм – величина допустимой неплоскостности направляющих, P – расстояние между направляющими (база «ножей»), $P = 150$ мм, то $\sigma_3'' = \pm 3''$.

4. Угловая погрешность, вызванная ухудшением резкости бликов вследствие местных ошибок поверхностей. Дифференцируя формулу (6)

$$h = \frac{D^2}{8R}, \quad (6)$$

где h – стрелка прогиба поверхности, D – световой диаметр поверхности (хорда – для цилиндрической поверхности), R – радиус кривизны поверхности, получаем формулу (7)

$$dh = d\left(\frac{D^2}{8R}\right) = d\left(\alpha \frac{D}{8}\right); \Delta h = \Delta\alpha \frac{D}{8}, \quad (7)$$

где D – диаметр светового пятна от автоколлимационной трубки на поверхности детали. Если задать $\Delta N = 0,5$ интерференционной полосы на световом диаметре детали $D_g = 30$ мм, получим (при $D_{тр} = 10$ мм): $\Delta\alpha'' = 1,5$

$$\sigma_4'' = \pm \frac{\Delta\alpha''}{2} = 0'',8. \quad (8)$$

5. Погрешность из – за расширения изображения щели из – за разворота поверхностей линзы или неточного начального выставления линзы параллельно направляющим столика (отнесенная в пространство предметов) формула (9)

$$\sigma_5'' = \pm \frac{\Delta\gamma \times p \times \rho''}{f_{об}' \times 2 \times V_{м/об}}, \quad (9)$$

где $\Delta\gamma = \beta = 10'$ – максимальная величина разворота поверхностей линзы или погрешность начального выставления^{х)}, $f_{об}' = 50$ мм – фокусное расстояние объектива трубы, $V_{м/об} = 8^x$ – увеличение микрообъектива автоколлимационной трубки, $P = 7$ мм – линейная величина окулярного поля зрения.

Тогда $\sigma_5'' = 5'',2$.

6. Погрешность определения величины перемещения детали формула (10)

$$\sigma_6'' = t\beta\left(\frac{\Delta l}{L}\right), \quad (10)$$

где $\beta = 5'$ – величина непараллельности (разворота) цилиндрических поверхностей, $\Delta l = 0,5$ мм – линейная погрешность определения величины перемещения детали по индексу, $L = 60$ мм – средняя длина линзы.

Тогда $\sigma_6'' = \pm 3'',0$.

Предельная средняя квадратическая угловая ошибка определения изменения положения оптической оси цилиндрической поверхности в пространстве на длине детали L , определяется по формуле (11)

$$\sigma_{пред}' = \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_6^2} \approx 8'',5. \quad (11)$$

Погрешность в определении угловой величины геометрической непараллельности поверхностей $\Delta\beta$, определяется по формуле (12):

$$\Delta\beta = \pm \sqrt{\left(\Delta\alpha_{баз.}'' R_{баз.}\right)^2 + \left(\Delta\alpha_2'' \times R\right)^2} \frac{1}{L}, \quad (12)$$

где $\Delta\alpha_{баз.}'' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = \pm 3'',6$ – угловая погрешность определения положения базовой поверхности $R_{баз.}$, $\Delta\alpha_2'' \approx 10''$ – угловая погрешность определения положения второй поверхности.

Тогда окончательно:

$$\Delta\beta = \sqrt{(3'',6 \times 100)^2 + (10'' \times 40)^2} \times \frac{1}{60} \approx 9''^{(*)} \quad (13)$$

Для проверки работоспособности метода был изготовлен и разработан действующий макет прибора, всесторонние испытания которого подтвердили высокую чувствительность схемы.

Интерференционный метод

Данный способ основан на применение лазерных источников света.

Контроль взаимного положения линзы проводят в следующем порядке. Пучок монохроматического света выходит из лазера (1) (рис. 2), расширяется телескопической системой (2) и падает на полупрозрачную пластинку (3), за которой помещается контролируемая деталь (4). При взаимодействии лучей, отраженных от верхней и нижней поверхностей линзы, возникает интерференционная картина, которую рассматривают в наблюдательную систему (5) (микроскоп, экран, глаз и т. п.).

Для идеальной линзы картина должна иметь вид параллельных друг другу полос. Их разворот и деформация свидетельствуют о наличии у детали ошибок взаимного расположения поверхностей. Известно, что интерференционные полосы повторяют форму «линии равной толщины», соединяющих точки контролируемой поверхности [5].

Выведем аналитическую зависимость между углом поворота поверхностей линзы и величиной наклона интерференционных полос. Представим линзу в виде двух цилиндров, (рис. 3) и запишем их уравнения:

$$x^2 + (y_{\text{верхн.}} + h_1)^2 = R_1^2, \quad (14)$$

$$x^2 + (y_{\text{нижн.}} + h_2)^2 = R_2^2.$$

При повороте одного из цилиндров (например, нижнего) вокруг оси ОУ на малый поворот β его уравнение примет вид:

$$(x - Z\beta)^2 + (y_{\text{нижн.}} - h_2)^2 = R_2^2 \quad (15)$$

Из (14) и (15):

$$y_{\text{верхн.}} = -h_1 + \sqrt{R_1^2 - x^2}; y_{\text{нижн.}} = h_2 - \sqrt{R_2^2 - x^2 + 2xZ\beta}, \quad (16)$$

где $h_1 = R_1 - t_1$; $h_2 = R_2 - t_2$.

Основное условие определения «равнотолщинных» линий:

$$y_{\text{верхн.}} + |y_{\text{нижн.}}| = \text{const}, (\text{const} = \alpha).$$

Подставив $y_{\text{верхн.}}$ и $y_{\text{нижн.}}$, получим:

$$\sqrt{R_1^2 - x^2} + \sqrt{R_2^2 - x^2 + 2xZ\beta} - R_1 + t_1 - R_2 + t_2 = \alpha. \quad (17)$$

Отсюда

$$Z = \frac{\sqrt{R_2^2 - x^2}}{x\beta} (P - \sqrt{R_1^2 - x^2} - \sqrt{R_2^2 - x^2}), \quad (18)$$

где $P = R_1 + R_2 - t + \alpha$.

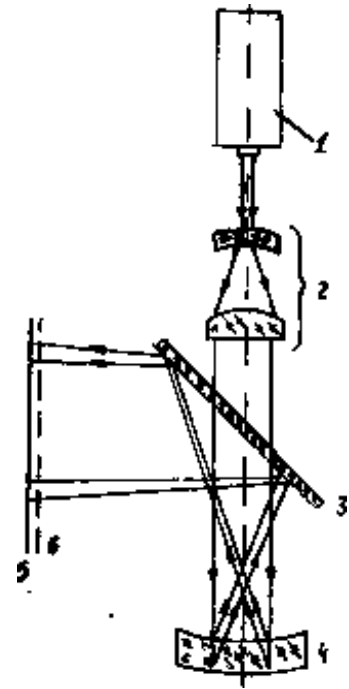


Рис. 2. Оптическая схема лазерного интерферометра

При разных значениях α из (3) можно получить всю совокупность линий равной толщины и наклон ε интерференционных полос при развороте поверхностей линзы на угол β :

$$\varepsilon = \frac{1}{|z'|} = f(x)\beta = \frac{x^2 \beta}{x^2 \left\{ 2 - \frac{P}{\sqrt{R_1^2 - x^2}} + \frac{R_1^2}{\sqrt{(R_2^2 - x^2)(R_1^2 - x^2)}} \right\} - (P \sqrt{R_2^2 - x^2} - \sqrt{(R_2^2 - x^2) - \sqrt{(R_2^2 - x^2)(R_1^2 - x^2)} - R_2^2 + x^2})}$$

(19)

Отсюда $\beta = \frac{\varepsilon}{f(x)}$.

Расчеты, проведенные по (3) на ЭВМ, показали, что наклон полос ε пропорционален углу разворота цилиндрических поверхностей линзы. Чувствительность метода можно значительно повысить введением в схему установки раstra (6). Очевидно, что наиболее удобно будет использовать этот метод для контроля деталей серийного производства по принципу отбраковки (годен - брак). При этом желательно одновременно наблюдать в совмещенном поле зрения интерференционные картины, возникающей у эталонной и контролируемой детали.

Заключение

Рассмотренные выше способы автоколлимационного и интерференционного контроля взаимного расположения преломляющих поверхностей цилиндрических линз имеют реальные преимущества перед используемыми предприятиями отрасли и после соответствующей конструктивной проработки могут быть рекомендованы для использования и широкого внедрения в производство.

УДК [621.9.06 – 52:658.527:681.3.06] (035)

Б.Э. Шлишевский, Е.Ю. Кутенкова

СГГА, Новосибирск

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ С УЧПУ – СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД. ПОДСИСТЕМА ПТМ (ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МЕТОДЫ)

B.E. Shlishevsky, Ye.Yu. Kutenkova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

INCREASE IN EFFICIENCY OF MULTI-PURPOSE CNC MACHINE-TOOLS – SYSTEMS APPROACH. SUBSYSTEM OF PROGRESSIVE TECHNOLOGICAL PROCESSES AND METHODS

The article deals with the increase in efficiency of multipurpose CNC machine-tools due to the systems approach (subsystem of technological processes and methods) by concentrating operations in machining.

Key words: multipurpose machine-tools, CNC, efficiency, flexible automation.

Требования научно-технического прогресса в механической обработке предполагают использование прогрессивной технологии, в которой органически сочетаются автоматизация, гибкость, минимальные затраты живого труда, наивысшая производительность и наименьшая себестоимость; обеспечивается стабильное качество обработки изделий; максимальная экономия материала и энергоносителей; рациональная загрузка оборудования; соблюдаются требования экологии и охраны окружающей среды, техники безопасности рабочего персонала, а также удобство сервисного обслуживания и эксплуатации оборудования и средств автоматизации; высокая надежность в работе используемых в производстве технических средств: станков-автоматов, устройств числового программного управления (УЧПУ), инструментов и другого технологического оснащения.

Решение этих задач является многоаспектной проблемой и требует для ее решения системного целевого подхода. В настоящей работе рассматривается подсистема «Прогрессивная технология» и методы обработки (ПТМ) и её элементы.

В течение последних 10-15 лет промышленность развитых стран и некоторые предприятия Российской Федерации освоили серийный выпуск технологических машин (металлообрабатывающих станков и иного оборудования), которые отвечают требованиям универсальности, автоматичности, производительности, а также скоростной обработки (точением,

фрезерованием давлением и др.); и обеспечивают возможность силового скоростного и сверхскоростного резания или штамповки, выдавливания и прессования основных видов конструкционных материалов, используемых в машино- и приборостроении.

Как правило, это в первую очередь мощные высокоскоростные автоматические одно- и многоцелевые или многошпиндельные станки, прессы и другое оборудование. В данной работе рассматриваются станки типа обрабатывающие центры (ОЦ) с УЧПУ.

Различают станки с УЧПУ: одно- и многоцелевые сверлильно-фрезерно-расточной группы их именуют «Обрабатывающие центры сверлильно-фрезерно-расточной группы» (ОЦ СФР); многоцелевые станки для токарных работ называют «Токарные обрабатывающие центры» (ТОЦ).

Технология обработки на станках типа ОЦ и ТОЦ – это комплексная система самого высокого технического уровня, ее базой является триада интегрированных компонентов:

- Непосредственно многоцелевых станков с УЧПУ с высокочастотным регулируемым главным приводом и с шарико-винтовыми или линейными приводами подач;

- Многофункциональные системы УЧПУ – это устройства четвертого – шестого поколения, математическая мощность которых модульно наращивается под технологию конкретного заказчика, по принципу восходящей совместимости и позволяет осуществить в автоматическом режиме управление и контроль всех функций работы станка при реализации и проектировании управляющих программ (УП);

- Технологического оснащения, которое, в первую очередь, включает прогрессивный высокостойкий режущий инструмент и, в ряде случаев, универсальные или многопозиционные установочные приспособления для смешанной обработки заготовок различных деталей.

Здесь следует отметить, что каждый элемент триады несет свою нагрузку и не может заменить другой. Перечисленные элементы является результатом самых новейших достижений науки и техники на данный момент. Их взаимодействие позволяет реализовывать наиболее прогрессивные технологии в металлообработке, если компоненты триады работают совместно по заданной конкретной управляющей программе (УП).

Многоцелевые станки с ЧПУ – это системы механотроники самого высокого уровня, в них механические, электрические, гидравлические узлы органически сочетаются между собой и электронными компонентами. В то же время обеспечивается хороший дизайн и максимальная безопасность и комфортность работы (за счет блокировок и звукопоглощающих дверных ограждений станка), удобный доступ оператора к рабочей зоне ОЦ СФР или ТОЦ и обеспечения требования охраны труда.

Исключаются постоянные случайные погрешности каждого из станков с ручным управлением, а также погрешности многочисленных установов, базирования. Все это обеспечивает стабильную точность размеров и качество

обработки в целом. Особенно важно сокращение вспомогательного времени на смену инструмента, ибо за одну смену таких замен может происходить до 1100 – 1200.

Многоцелевые станки позволяют осуществить концентрацию разнообразных работ на одном операционном поле, таких как точение, все виды фрезерования, растачивание, сверление, зенкование, развертывание, цекование, а в некоторых моделях токарных ОЦ - протягивание, дорнование, изготовление и сборку 3-5 деталей в собранный узел; возможна многосторонняя обработка по каждой из трех осей координат X, Y, Z плюс вращение заготовки вокруг координатных осей, то есть многоосевая обработка до 6 – 12 осей. В ряде конструкций ОЦ реализована возможность автоматической переустановки заготовки и ее доработка относительно дополнительных параллельных осей координат. В ОЦ СФР автоматизированы не только процессы непосредственно резания, но и вспомогательные ходы: быстрый и сверхбыстрый подвод инструмента до заготовки с ускорением 10м/сек^2 и отводом на исходную позицию, быстрая автоматическая смена инструмента по командам УП для разнотипной обработки. При затуплении – автоматически вызывается инструмент – дублер.

Станки типа ОЦ СФР и ТОЦ и автоматические линии на их основе широко функциональны, снабжены магазинами инструментов, которые по управляющей программе (УП) автоматически заменяются и вступают для выполнения очередного технологического перехода. Таким образом, за один установ в непрерывном цикле выполняются самые разнообразные виды съема стружки, вместо их обработки на многих операциях (и установах) на традиционном оборудовании с ручным управлением, что обеспечивает стабильную повторяемость высокого качества и весьма существенную экономию вспомогательного времени.

Современные ОЦ СФР и ТОЦ определяют возможность внедрения новых технологий механической обработки, повышающих единичную производительность станков на 35 – 50%. Кратко рассмотрим их основные технические и технологические возможности.

В ОЦ СФР и ТОЦ обеспечивается: высокая мощность шпиндельного узла. Так для деталей приборостроения, вписывающихся в куб со стороной до 180 – 200 мм – мощность главного привода составляет до 30 – 40 кВт; высокая скорость и сверхвысокая скорость холостых ходов рабочих органов подачи – до 60 - 90 м/мин (заметим, что на ранее выпускавшихся станках этот показатели не превышали 2 – 12 м/мин), число оборотов шпинделя до 8 000 – 30 000 мин^{-1} , а по заказу до 90 000 мин^{-1} (швейцарской фирмы «Фельман») - это в 3-10 раз выше, чем в действующих ОЦ. Время смены инструментов на ТОЦ 0,2 – 0,3 сек., на ОЦ СФР от 2 – 3 сек., это в 5 -10 раз и более меньше, чем в большинстве эксплуатируемых многоцелевых станков; количество инструментов в магазине от 24 – 60 и до 500 (по особому заказу), на ТОЦ 24 – 36, в том числе инструментов с приводом вращения инструментов до 12-18 единиц. На крупных станках могут использоваться цепные магазины с количеством инструментов до 80 – 100 единиц, это позволяет смешанно

обрабатывать различные по конструкции и ассортименту детали. На всех типах станков предусмотрена предварительная продувка (очистка) посадочных мест конусов шпинделя и конусов инструментальной оправки, а посадочная поверхность непосредственно конуса шпинделя - закалена.

Устройства УЧПУ осуществляют автоматическое управление всеми рабочими функциями станка, его приводами и механизмами по реализации управляющих программ, включая наряду с обработкой резанием, контроль размеров обрабатываемой заготовки, самодиагностику УЧПУ и контроль исправности станка, а также возможность в автоматизированном режиме разработать УП параллельно на иную номенклатуру деталей, предупреждать о возможных сбоях в работе УЧПУ станка, в широких пределах корректировать УП на рабочем месте станка, и множество других функций.

Устройства УЧПУ оснащены мощными, быстродействующими 64 – разрядными микропроцессорными компонентами, по принципу восходящей совместимости.

Этим обеспечивается возможность адаптации УЧПУ к конкретным технологиям и нуждам заказчика, что в частности, необходимо при обработке точных контуров.

CNC УЧПУ обеспечивают линейную, круговую, цилиндрическую, спиральную, винтовую параболическую интерполяцию; оснащены цветным дисплеем размером до 18 дюймов для визуализации процесса обработки или другой «защитой» в УЧПУ информации; развитым пультом управления с квази-сенсорными виртуальными клавишами; обладают постоянной и оперативной памятью до 60 Мбайт и выше (по желанию заказчика). Обеспечивают: работу УП без ее прогона на станке с имитацией процесса обработки на экране дисплея (без реальной заготовки и инструмента) с контролем геометрических размеров, при необходимости, электронной лупой до 1000 крат; максимальную мобильность, гибкость. Позволяют в автоматическом режиме реализовать практически все функции технологического процесса: управление по 2 – 27 осям, в том числе интерполяцию одновременно по 2 – 6 осям, дискретность ввода – вывода информации до 0,01–0,005 мкм, могут хранить в оперативной памяти большое количество - до 99 управляющих программ и до 999 подпрограмм; работать без перфоленты или другого внешнего программносителя от ОЗУ; имеют входы- выходы подключения к ЭВМ более высокого уровня для трансляции, хранения и ретрансляции УП.

Наличие большой постоянной памяти в УЧПУ и широкого спектра вспомогательных функций G (от 40 до 200); техники «меню», автоматических циклов обработки (продольный и торцовый съем припуска при работе резцами или фрезами, нарезание резьбы до М64, глубокое прерывистое сверление, прорезка канавок различной конфигурации); циклов чистовой обработки, многократного повторения контура, разгона и торможения (до 10 м/с²), циклы «привязки» инструментальных узлов станка к нулевым точкам; циклы врезания в заготовку и другие; параметрические подпрограммы обработки - до 99; большое количество макрокоманд; возможность ввода информации в УЧПУ на символьном языке; многоцветного дисплея и других средства визуализации с

выводом на экран необходимых справочных цифровых, графических, текстовых, схемных, расчетно-аналитических и иных информационных материалов, что позволяет многократно упростить и ускорить процесс разработки, отладки УП, ее совершенствование и адаптацию к изменяющимся условиям производства.

Среди инноваций следует отметить увеличение выпуска высокоточных станков классов А и В, и использование в качестве приводов вместо шариковых винтовых пар принципиально новых, прецизионных линейных приводов на основе редкоземельных высокочастотных индуктивных катушек и обеспечивает более высокую точность обработки (до 1 мкм), что исключает ошибки и деформации, вызываемые приводами с винтовыми парами.

Такое оборудование весьма перспективно и целесообразно использовать в мелко- и среднесерийном производстве, что характерно для оптического приборостроения. Проблемой является высокая стоимость станков ОЦ от 6 до 16 млн. и более рублей за один станок. Поэтому вопросы окупаемости и экономичности его приобретения, в условиях рынка, требует тщательного анализа и обоснования. В целом задача пользователей заключается в максимальном использовании экстенсивных и интенсивных ресурсов ОЦ. Таким образом, при использовании станков типа ОЦ возникает необходимость материально оптимизировать количество основных фондов с объемом заказов в организованном производстве за счет следующих видов деятельности:

1. Оптимизировать количество современных многоцелевых станков с ЧПУ и другого высококласного автоматического оборудования, с объемом оснастки станков в соответствии с прогнозируемым объемом изготовления и реализации продукции. При этом необходима классификация сложно-контурных деталей по группам (в количестве 5 - 6 тысяч нормо-часов) для их обработки на конкретных типах ОЦ.

2. Разработать типовые техпроцессы с использованием стандартных циклов, макрокоманд и других компонентов оперативной памяти ЧПУ, обеспечивающих качество и высокую производительность работы станков по управляющим программам с проверкой на холостом прогоне.

3. Определить и обеспечить оптимальную номенклатуру стандартной оснастки, в том числе для групповой и смешанной обработки конкретных групп деталей.

4. Осуществить автономное инструментно-обеспечение, при этом необходимо тщательно разработать таблицу прогрессивного режущего инструмента и инструментального обеспечения специально для конкретных станков с УЧПУ. Цель: для каждого станка и группы деталей обеспечить оптимальную номенклатуру наличия прогрессивных инструментов для обеспечения максимальной производительности резания (обработки). То же самое по остальному технологическому оснащению.

5. Технологическое освоение станков и технологии — то есть изготовление качественной продукции по разработанному технологическому процессу.

6. Доработать ТП, оснастку и др. компоненты для стабилизации заданного качества и максимальной производительности. Оформить актом внедрения технологический процесс после выпуска опытной, а затем и серийной партии. Материально поощрить всех участников разработки ТП и организации его производственного внедрения.

7. Транслировать УП от головной ЭВМ и создавать библиотеку УП и подпрограмм.

Расчеты показывают, что эффективность использования ОЦ СФР и ТОЦ достигается при максимальном использовании интенсивных и экстенсивных ресурсов технического и организационного характера эксплуатации этих станков.

© Б.Э. Шлишевский, Е.Ю. Кутенкова, 2008

УДК 681.7

М.П. Егоренко

СГГА, Новосибирск

К ВОПРОСУ КОМПЕНСАЦИИ ХРОМАТИЗМА ЗЕРКАЛ МАНЖЕНА В НЕСКОЛЬКИХ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА

М.Р. Egorenko

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

TO A QUESTION OF COMPENSATION OF CHROMATISM OF MIRRORS MANZEN IN SEVERAL BANDS OF A SPECTRUM

In last decades the optical arrangements working in several bands of a spectrum simultaneously which considerably expand operational properties of a product have appeared. One of directions in engineering multispectral systems is design of the lens optical systems from crystal substances. In a design of objectives to a colour correction apply substances with tall optical properties, but low chemistry-mechanical stability to affecting a circumambient. These reasons restrict their scope in the technician on service conditions.

Зеркально-линзовые объективы из одного материала, содержащие отражающие компоненты в виде линз Манжена и компенсаторы с положительной оптической силой в параллельном ходе лучей обладают более высокими оптическими и эксплуатационными свойствами, в этом случае происходит частичная взаимная компенсация хроматических aberrаций между компонентами.

Интерес к разработке таких систем заключается в том, что этот прибор предназначен для замены трех оптических систем одним многоспектральным устройством, выполненного из ZnSe и прозрачного в диапазоне от 0,5 до 12 мкм.

На рис. 1 представлена конструкция данного объектива.

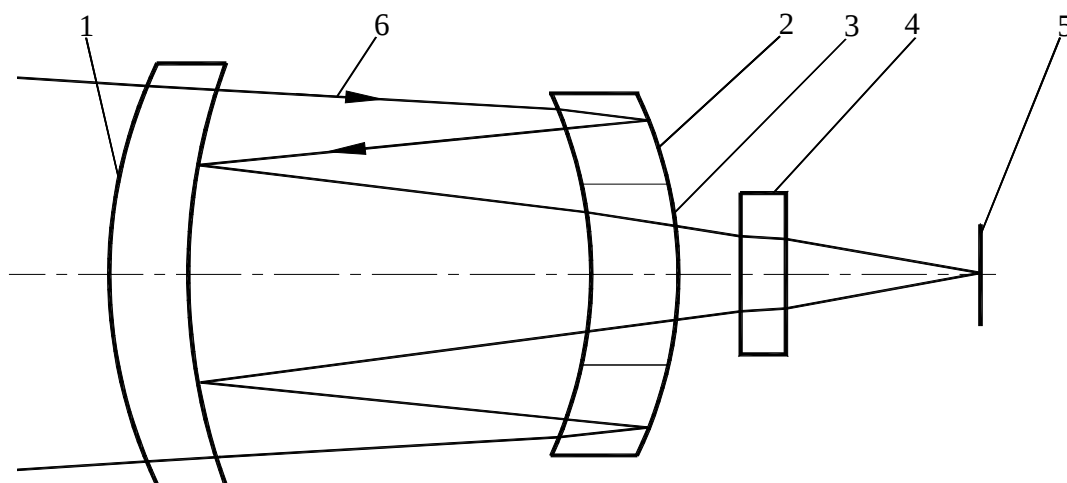


Рис.1. Оптическая схема многоспектрального зеркально-линзового объектива:

1 – афокальный компенсатор; 2 – зеркало Манжена; 3, 4 – полевой линзовый компенсатор, 5 – фокальная плоскость, 6 – апертурный луч

При помощи пакета оптических программ SYNOPSYS были получены зависимости хроматизма положения и хроматизма увеличения от изменения толщины первой линзы для трех диапазонов спектра: видимый диапазон (0,486 – 0,656 мкм), средний инфракрасный диапазон (3 – 5 мкм), дальний инфракрасный диапазон (8 – 12 мкм).

В табл. 1 и на рис. 2 представлены зависимость от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения и график по данным этих зависимостей для видимого диапазона спектра.

Таблица 1. Зависимость от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения для видимого диапазона спектра

Толщина первой линзы	Хроматизм положения	Хроматизм увеличения
12,94	0.14843	-0.02838
13,14	0.15130	-0.02945
13,34	0.15418	-0.03052
13,54	0.15706	-0.03160
13,74	0.15994	-0.03269
13,94	0.16282	-0.03377
14,14	0.16571	-0.03486
14,34	0.16859	-0.03596
14,54	0.17148	-0.03706
14,74	0.17437	-0.03816

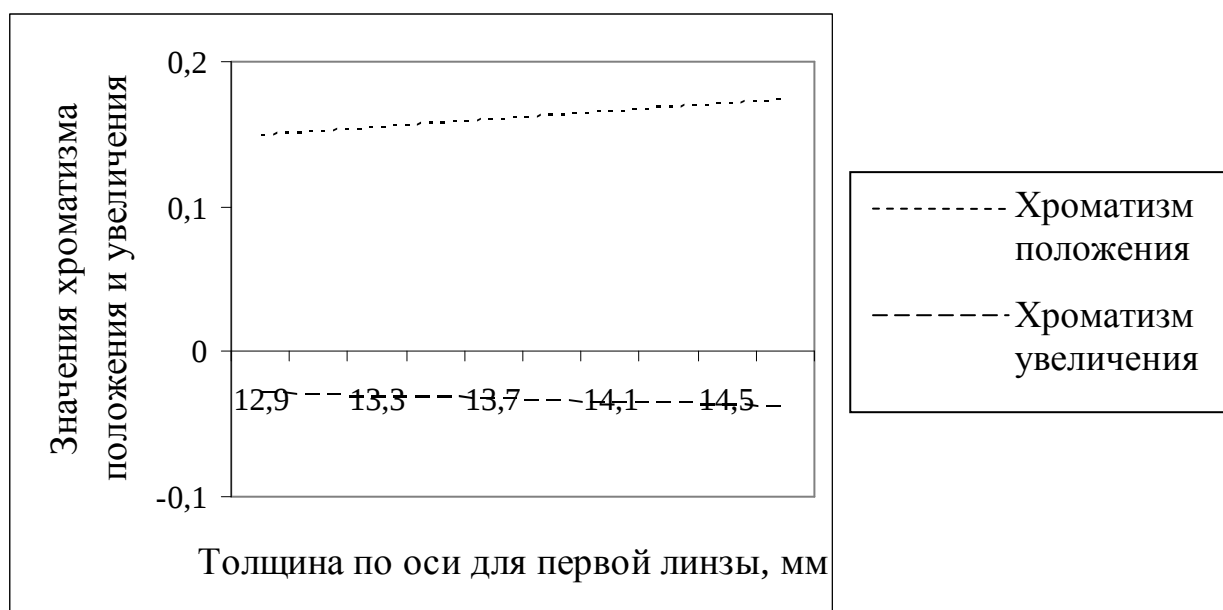


Рис.2.График зависимости от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения для видимого диапазона спектра

В табл. 2 и на рис. 3 представлены зависимость от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения и график по данным этих зависимостей для среднего инфракрасного диапазона спектра.

Таблица 2. Зависимость от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения для среднего инфракрасного диапазона спектра

Толщина первой линзы	Хроматизм положения	Хроматизм увеличения
12,94	0.00238	-0.00034
13,14	0.00250	-0.00038
13,34	0.00262	-0.00042
13,54	0.00274	-0.00047
13,74	0.00286	-0.00051
13,94	0.00298	-0.00055
14,14	0.00310	-0.00060
14,34	0.00322	-0.00064
14,54	0.00334	-0.00069
14,74	0.00346	-0.00073

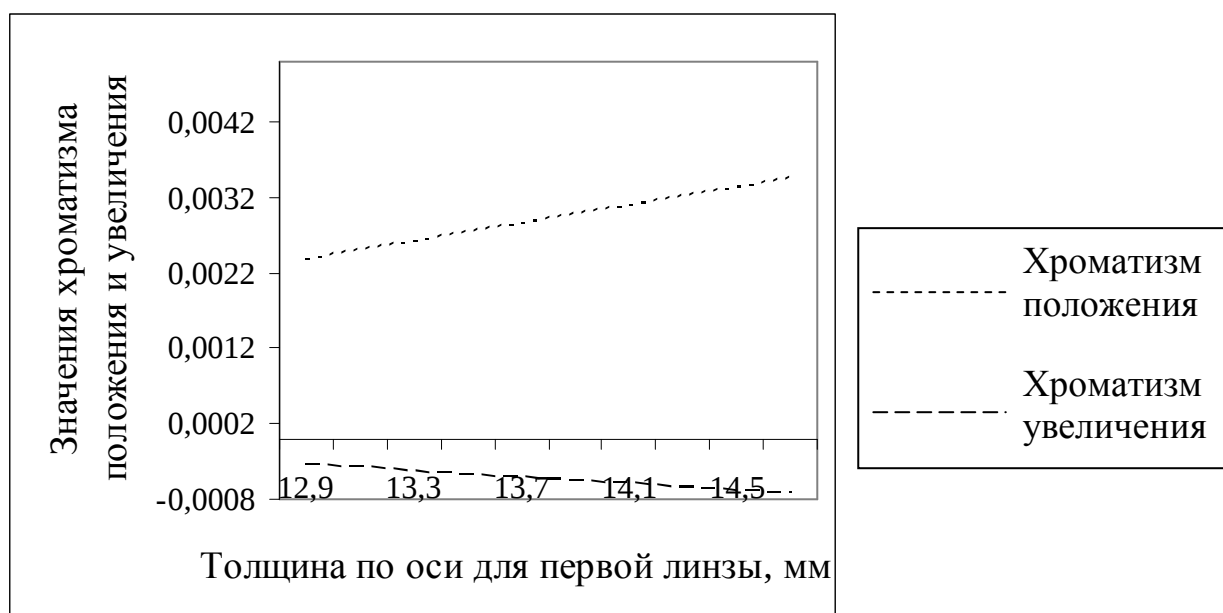
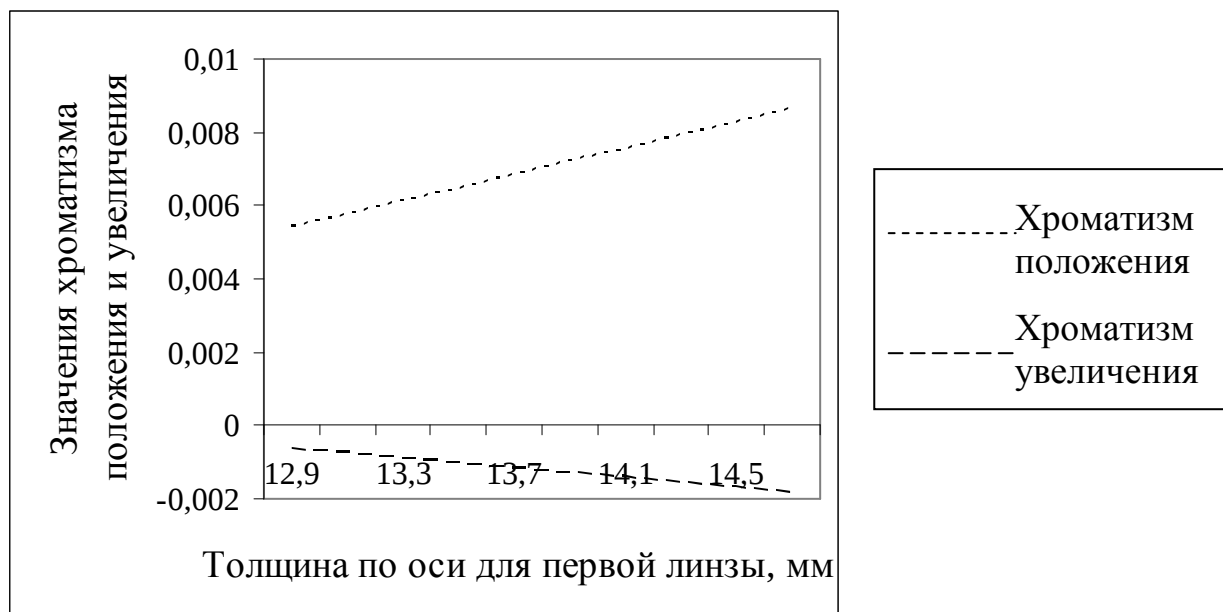


Рис.3.График зависимости от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения для среднего инфракрасного диапазона спектра

В табл. 3 и на рис. 4 представлены зависимость от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения и график по данным этих зависимостей для дальнего инфракрасного диапазона спектра.

Таблица 3. Зависимость от толщины первой линзы хроматизма положения и увеличения для дальнего инфракрасного диапазона спектра

Толщина первой линзы	Хроматизм положения	Хроматизм увеличения
12,94	0.00540	-0.00064
13,14	0.00576	-0.00077
13,34	0.00612	-0.00090
13,54	0.00648	-0.00103
13,74	0.00684	-0.00116
13,94	0.00720	-0.00129
14,14	0.00755	-0.00142
14,34	0.00791	-0.00155
14,54	0.00827	-0.00168
14,74	0.00863	-0.00181



По данным таблиц и графиков для трех диапазонов спектра можно сделать вывод, что хроматизм положения увеличивается с увеличением толщины, а хроматизм увеличения уменьшается с увеличением толщины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jamieson T.H. Ultrawide waveband optics // Optical Engineering. – 1984. – № 2. – С. 111–116.
2. Гаврилов, Д.В. Расчет простой линзы с одной отражающей поверхностью [Текст] / Д.В. Гаврилов // Оптика и спектроскопия. – 1962. – Т. 13. – С. 436–431.

© М.П. Егоренко, 2008

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОМЕТРА ДВОЙНОГО ОТНОШЕНИЯ

L.V. Tymkul, Yu.A. Fesko

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

TECHNIQUE CALCULATION TEMPERATURE SENSITIVITY OF THE PYROMETER DOUBLE SPECTRAL ATTITUDE

In work offered the technique and results researches temperature sensitivity of the pyrometer double spectral attitude working in conditions presence hindrances of thermal radiation of a non-uniform background and radiation of optical elements of the device.

В данной работе рассматриваются методика и результаты расчета температурной чувствительности пирометра двойного спектрального отношения (ДСО) [1,2] с учетом воздействия излучения «помех» с неоднородным полем излучения фона. Математическая модель работы пирометра ДСО была рассмотрена в работе [3]. Согласно этой работе температура T поверхности объекта определяется по следующему выражению:

$$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2\Delta\lambda^2 c_2} \cdot \ln \left[\frac{U_\Sigma(\lambda_2)}{U_\Sigma(\lambda_1)} \cdot \frac{U_\Sigma(\lambda_3)}{U_\Sigma(\lambda_2)} \right], \quad (1)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – рабочие длины волн пирометра; $U_\Sigma(\lambda_1), U_\Sigma(\lambda_2), U_\Sigma(\lambda_3)$ – суммарный сигнал пирометра на этих длинах волн; c_2 – постоянная в формуле Планка; $\Delta\lambda = \lambda_3 - \lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_1$.

Суммарный сигнал, который регистрируется приемником оптического излучения пирометра, представляет собой сумму сигнала от объекта $U(\lambda)$, сигнала, формируемого отраженным от поверхности излучения фона $U_{фон}(\lambda)$ и сигнала, который формируется собственным излучением элементов оптической схемы устройства $U_o(\lambda)$. Величина этого сигнала описывается выражением:

$$U_\Sigma(\lambda) = U(\lambda) + U_{фон}(\lambda) + U_o(\lambda), \quad (2)$$

где

$$U(\lambda) = \pi^{-1} A \omega S_\lambda \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\delta(\lambda) \epsilon(\lambda) M_e(\lambda, T); \quad (3)$$

$$U_o(\lambda) = \pi^{-1} A \omega S_\lambda \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\delta(\lambda) \epsilon_o(\lambda) M_e(\lambda, T); \quad (4)$$

$$U_{\delta\delta}(\lambda) = \pi^{-1} A \omega S_\lambda \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\delta(\lambda) \rho(\lambda) M_e(\lambda, T). \quad (5)$$

В выражениях (3) – (5) приняты обозначения:

A – площадь входного зрачка объектива, см²; ω – телесный угол поля зрения, ср; S_λ – абсолютная спектральная чувствительность приемника излучения, В/Вт; $\tau_a(\lambda), \tau_\phi(\lambda), \tau_o(\lambda)$ – спектральные коэффициенты пропускания слоя атмосферы, спектрального фильтра и оптических элементов; $\varepsilon(\lambda), \varepsilon_o(\lambda)$ – спектральный коэффициент собственного излучения объекта и оптических элементов соответственно; $\rho(\lambda)$ – коэффициент отражения поверхности исследуемого объекта; T – термодинамическая температура объекта, К; $T_{фон}, T_o$ – температура фонового источника излучения и оптических элементов, К; $M_e(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости АЧТ.

Учитывая тот факт, что поле излучения фона является неоднородным, пороговая температурная чувствительность представляется в виде:

$$\Delta T_{\text{пд}}^{(i)} = \frac{\pi \mu k_{\text{y}} \sqrt{ab \Delta f} \cdot (1 + U_o / U_{\text{й}} + \overline{\Delta U_{\text{дн}}} / U_{\text{й}})}{A \omega D^* c_2 \cdot (I + I_{\text{дн}})}, \quad (6)$$

где

$$\overline{\Delta U_{\text{дн}}} = U_{\text{дн}} (\overline{T_{\text{дн}}}) + \overline{\delta U_{\text{дн}}}; \quad (7)$$

$$U_{\text{дн}} (\overline{T_{\text{дн}}}) = \pi^{-1} A \omega \int_{\lambda_i^{(1)}}^{\lambda_i^{(2)}} S_\lambda \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \rho(\lambda) M_e(\lambda, \overline{T_{\text{дн}}}) d\lambda; \quad (8)$$

$$\overline{\delta U_{\text{дн}}} = \frac{A \omega}{\pi} \cdot \frac{c_2 \overline{\Delta T_{\text{дн}}}}{T_{\text{дн}}^2} \cdot \int_{\lambda_i^{(1)}}^{\lambda_i^{(2)}} S_\lambda \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, \overline{T_{\text{дн}}}) d\lambda; \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{T^2} \cdot \int_{\lambda_i^{(1)}}^{\lambda_i^{(2)}} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \varepsilon(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, T) d\lambda; \quad (10)$$

$$I_{\text{дн}} = \frac{1}{T_{\text{дн}}^2} \cdot \int_{\lambda_i^{(1)}}^{\lambda_i^{(2)}} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \rho(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, T_{\text{дн}}) d\lambda; \quad (11)$$

$S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения; $T_{\text{дн}}$ – среднее значение температуры фона; $\overline{\Delta T_{\text{дн}}}$ – среднее значение диапазона изменения температур фона; $U_{\text{й}}$ – пороговый сигнал приемника излучения; D^* – удельная обнаружительная способность приемника излучения; a, b – линейные размеры приемника излучения; $\lambda_i^{(1)}, \lambda_i^{(2)}$ – границы пропускания i -ого спектрального фильтра; Δf – полоса пропускания электрических частот приемника излучения; k_{y} – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника; μ – отношение «сигнал/помеха».

На рис. 1 приведены результаты расчета температурной чувствительности и ее зависимость от температуры поверхности объекта.

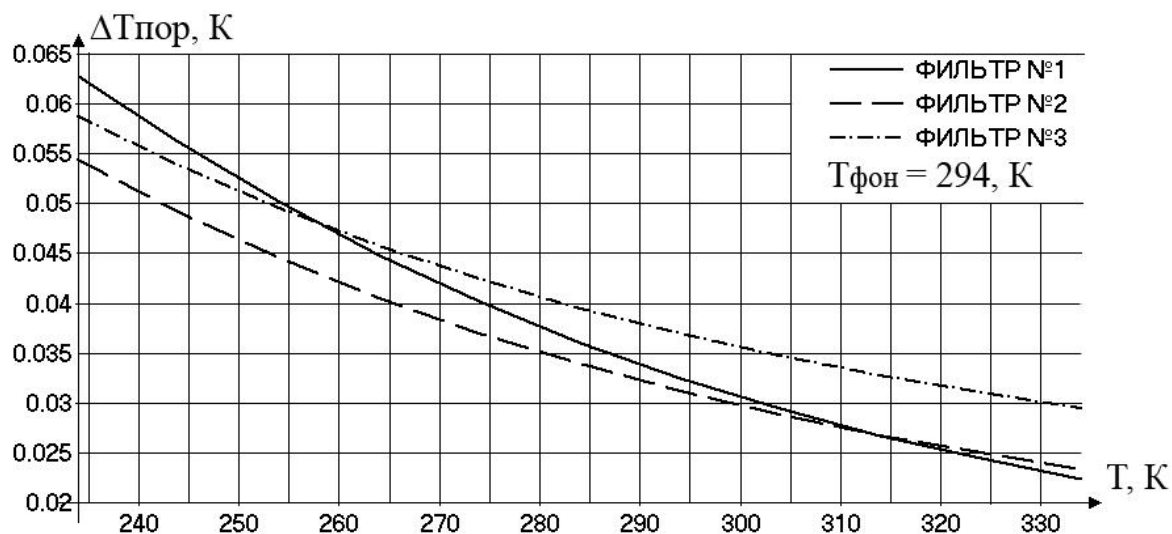


Рис. 1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Снопко, В.Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности [Текст] / В.Н. Снопко. – Минск: Наука и техника, 1988. – 152 с.
2. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] / Д.Я. Свет. – М., 1982. – 296 с.
3. Тымкул, В.М., Математическая модель работы пирометра двойного отношения. Материалы III Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2007» Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2 [Текст] / В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько. – Новосибирск.: РИО СГГА, 2007. – 215 с.

© В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько, 2008

УДК 536.521.2

Тымкул В.М., Шелковой Д.С.

СГГА, Новосибирск

ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХСПЕКТРАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА

V.M. Tymkul, D.S. Shelkovoy

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE THEORY AND MATHEMATICAL MODEL OF THE THREE-SPECTRAL OPTICAL PYROMETER

In work generalization of the theory and mathematical model of work of a three-spectral optical pyrometer in conditions of presence of handicapes is offered.

В работе [1] нами рассмотрены элементарная теория работы и функциональная схема оптического пирометра [2], который позволяет дистанционно измерить истинную (термодинамическую) температуру поверхности объектов без априорной информации о коэффициенте излучения их поверхности.

При этом принималось, что выходные сигналы прибора формировались за счет полезного теплового излучения исследуемого объекта, и не рассматривалось влияние излучения фона, отраженного от исследуемого объекта и излучение оптических элементов пирометра.

Настоящая работа посвящена обобщению теории и математической модели работы трехспектрального оптического пирометра в условиях наличия помех.

В этом случае значение суммарного выходного сигнала на заданной эффективной длине волны, формируемого на выходе приемника излучения пирометра запишем в следующем виде:

$$U_{\Sigma}(\lambda) = U(\lambda) + U_{\text{фон}}(\lambda) + U_o(\lambda), \quad (1)$$

где $U(\lambda)$ – выходной сигнал, формируемый собственным излучением поверхности исследуемого объекта, В;

$U_{\text{фон}}(\lambda)$ – выходной сигнал, формируемый отраженным излучением фона от поверхности объекта, В;

$U_o(\lambda)$ – выходной сигнал, формируемый излучением поверхности оптических элементов пирометра, В.

Представим в развернутом виде каждую составляющую суммарного выходного сигнала. Выходной сигнал, формируемый собственным излучением поверхности исследуемого объекта равен:

$$U(\lambda) = \pi^{-1} A \omega S_{\lambda} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) \epsilon(\lambda) M_e(\lambda, T), \quad (2)$$

где λ – эффективная длина волны измерительного канала, мкм;

A – площадь входного зрачка объектива пирометра, см²;

ω – телесный угол поля зрения объектива, ср;

S_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность приемника излучения, В/Вт;

$M_e(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости АЧТ

$$M_e(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} (1 / (\exp(c_2 / \lambda T) - 1)), \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1};$$

$\tau_o(\lambda), \tau_a(\lambda), \tau_{\phi}(\lambda)$ – спектральные коэффициенты пропускания соответственно объектива, слоя атмосферы и спектрального фильтра;

$\epsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент теплового излучения поверхности объекта;

T – термодинамическая температура поверхности объекта, К.

Для упрощения последующих записей введем коэффициент $K(\lambda)$, характеризующий «измерительный канал» пирометра:

$$K(\lambda) = \pi^{-1} A \omega S_{\lambda}. \quad (3)$$

Тогда, с учетом (3), выражение (2) примет следующий вид

$$U(\lambda) = K(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) \epsilon(\lambda) M_e(\lambda, T). \quad (4)$$

Выходной сигнал, формируемый отраженным излучением фона от поверхности объекта:

$$U_{\text{фон}}(\lambda) = K(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) \rho(\lambda) M_e(\lambda, T_{\text{фон}}), \quad (5)$$

где $\rho(\lambda)$ – коэффициент отражения поверхности исследуемого объекта;

$T_{\text{фон}}$ – абсолютная температура фона (окружающей среды), К.

В свою очередь, сигнал, формируемый излучением поверхности оптических элементов пирометра равен:

$$U_o(\lambda) = K(\lambda) \epsilon_o(\lambda) M_e(\lambda, T_o), \quad (6)$$

где $\epsilon_o(\lambda)$ – коэффициент теплового излучения поверхности оптических элементов;

T_o – абсолютная температура поверхности оптических элементов, К.

Согласно функциональной схемы трехспектрального оптического пирометра [2] необходимо регистрировать указанные сигналы $U_{\Sigma}(\lambda)$, $U_{\text{фон}}(\lambda)$ и $U_o(\lambda)$ на эффективных длинах волн $\lambda_{\text{эф1}}$, $\lambda_{\text{эф2}}$ и $\lambda_{\text{эф3}}$ трех спектральных измерительных каналов.

Поэтому в конечном итоге формируется следующая система трех уравнений с тремя неизвестными величинами T , $\epsilon(\lambda_{\text{эф1}})$, $\epsilon(\lambda_{\text{эф2}})$:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф1}}, T) &= \frac{K(\lambda_{\text{эф1}})\tau_o(\lambda_{\text{эф1}})\tau_a(\lambda_{\text{эф1}})\tau_{\phi}(\lambda_{\text{эф1}})\epsilon(\lambda_{\text{эф1}})(c_1 / \lambda_{\text{эф1}}^5)}{\exp(c_2 / \lambda_{\text{эф1}} T) - 1} + \\ &+ U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф1}}) + U_o(\lambda_{\text{эф1}}), \\ U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф2}}, T) &= \frac{K(\lambda_{\text{эф2}})\tau_o(\lambda_{\text{эф2}})\tau_a(\lambda_{\text{эф2}})\tau_{\phi}(\lambda_{\text{эф2}})\epsilon(\lambda_{\text{эф2}})(c_1 / \lambda_{\text{эф2}}^5)}{\exp(c_2 / \lambda_{\text{эф2}} T) - 1} + \\ &+ U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф2}}) + U_o(\lambda_{\text{эф2}}), \\ U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф3}}, T) &= \frac{K(\lambda_{\text{эф3}})\tau_o(\lambda_{\text{эф3}})\tau_a(\lambda_{\text{эф3}})\tau_{\phi}(\lambda_{\text{эф3}})(c_1 / \lambda_{\text{эф3}}^5)}{\exp(c_2 / (\lambda_{\text{эф3}} T)) - 1} \times \\ &\times (\alpha_1 \epsilon(\lambda_{\text{эф1}}, T) + \alpha_2 \epsilon(\lambda_{\text{эф2}}, T)) + U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф3}}) + U_o(\lambda_{\text{эф3}}). \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7), получаем уравнение:

$$e^{A3} = \alpha_1 e^{(A1 + c_2 / \lambda_{\text{эф1}} T)} + \alpha_2 e^{(A2 + c_2 / \lambda_{\text{эф2}} T)}, \quad (8)$$

$$\text{где } \alpha_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_3}, \quad \alpha_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_3};$$

$\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ и $\Delta\lambda_3$ – эффективная спектральная ширина соответственно, первого, второго и третьего измерительных каналов пирометра;

$$A1 = \ln(U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф1}}) - U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф1}}) - U_o(\lambda_{\text{эф1}}));$$

$$A2 = \ln(U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф2}}) - U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф2}}) - U_o(\lambda_{\text{эф2}}));$$

$$A3 = \ln(U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф3}}) - U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф3}}) - U_o(\lambda_{\text{эф3}})).$$

Для решения уравнения (8) в численном виде и для моделирования работы пирометра в целом, были разработаны алгоритм и компьютерная программа в среде программирования «Borland Pascal».

Исходные данные для проведения расчетов по указанной программе выбирались из параметров и характеристик как схемы трехспектрального оптического пирометра, так и его оптической системы, спектральных фильтров и приемника излучения [2–5].

Результаты моделирования показали, что в области температур от 240 до 330 К методическая ошибка в дистанционном измерении температуры поверхности объекта трехспектральным оптическим пирометром составляет от 4 до 5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тымкул, В.М. Теория работы и функциональная схема пирометра истинной температуры [Текст] / В.М. Тымкул, Д.С. Шелковой, О.В. Зубова // Современные проблемы геодезии и оптики. LIII междунар. научно-техн. конф., 11–21 марта 2003 г. Ч. II. Сб. материалов. – Новосибирск: СГГА, 2003. – С. 154–155.

2. Пат. 2219504 Российская Федерация, МПК7G 01 J 5/00. Пирометр истинной температуры [Текст] / Тымкул В.М., Лебедев Н.С., Шелковой Д.С., Воронин С.А.; заявитель и патентообладатель СГГА. – № 2002104325/28; заявл. 18.02.02; опубл. 20.12.03, Бюл. № 35. – 7 с.

3. Приемник оптического излучения пироэлектрический МГ–32. Технические условия 3.974.035–02 ТУ. – 48 с.

4. Характеристики пироэлектрического приемника оптического излучения МГ-32 [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.vostok.nsk.su/product1.html>.

5. Волф, У. Справочник по ИК-технике в 4-х томах. Т. 2. Проектирование оптических систем [Текст] / У. Волф, Г. Цисис. – М.: Мир, 1998. – 347 с.

© В.М. Тымкул, Д.С. Шелковой, 2008

УДК 535.317

*П.А. Алдохин, П.В. Журавлев, А.С. Рафаилович,
А.В. Турбин, С.М. Чурилов, В.Б. Шлишевский*
НФ ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

*P.A. Aldokhin, P.V. Zhuravlev, A.S. Rafailovitch,
A.V. Turbin, S.M. Churilov, V.B. Shlishevsky*

Novosibirsk branch of the Institute of semiconductors (Siberian division of the Russian academy of sciences) "Engineering and design institute of microelectronics" Novosibirsk

COMPACT HIGH-SENSITIVITY ULTRAVIOLET TELEVISION MODULE

The article presents the design and layout features of a compact high-sensitivity ultraviolet television module. The achieved parameters values and some practical use results are given.

Вопрос о современной элементной базе и оптико-электронных модулях ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра для различных образцов вооружения и военной техники (ВВТ) поднимался неоднократно и остается по-прежнему весьма актуальным [1, 2]. В этой связи в течение нескольких последних лет в Конструкторско-технологическом институте прикладной микроэлектроники СО РАН в широкой кооперации с другими НИИ и промышленными предприятиями соответствующего профиля ведутся целенаправленные работы в указанном направлении. Некоторые их результаты обсуждались ранее в [3 – 6].

В докладе сообщается о разработке унифицированного малогабаритного высокочувствительного телевизионного (ТВ) модуля УФ-ТВМ, предназначенного для использования при модернизации различных систем ВВТ. УФ-ТВМ может найти также применение для обнаружения разливов нефтепродуктов, мест радиационного загрязнения, для проведения профилактических работ на высоковольтных ЛЭП и др.

При создании модуля УФ-ТВМ использован опыт более ранней инициативной разработки низкоуровневой ТВ-камеры «Цербер-У» [3] (на основе ЭОП типа «Рассвет-У») с параметрами:

- | | |
|--|---------------------|
| – Диапазон спектральной чувствительности, нм | 200 – 380 |
| – Рабочая освещенность на местности, Вт/м ² | $10^{-1} - 10^{-3}$ |
| – ТВ-разрешение, ТВЛ, не менее | 300 |
| – Пороговая освещенность в плоскости фотокатода, Вт/м ² | 10^{-4} |
| – Фокусное расстояние входного объектива, мм | 290 |

– Поле зрения, град.

3,6×2,6

В состав УФ-ТВМ входят (рис. 1):

- Блок усилителя яркости на основе ЭОП с областью чувствительности в диапазоне 200 – 340 нм;
- Узел сочленения усилителя яркости с блоком формирования видеосигнала (высокоапертурная линзовая проекционная система);
- Блок формирования видеосигнала на основе ПЗС-матрицы;
- Вторичный источник питания (блок электропитания).

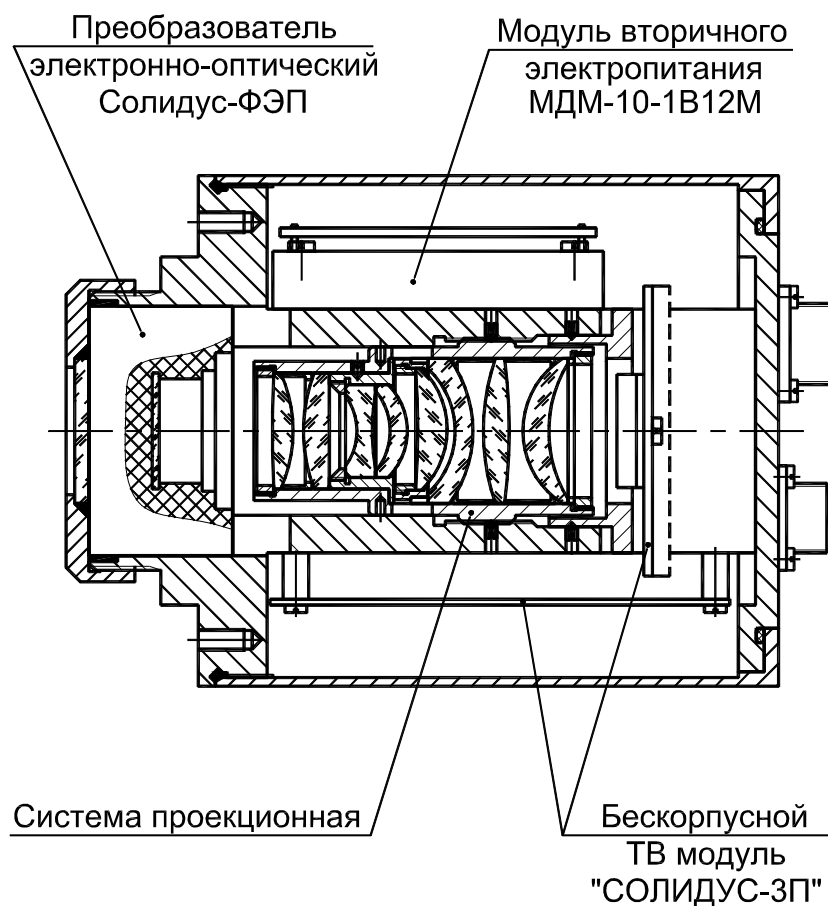


Рис. 1. Конструктивное исполнение УФ-ТВМ

По сравнению с гибридным исполнением такое построение обладает двумя существенными преимуществами:

1. Ремонтопригодностью, поскольку в отличие от гибридных приборов при выходе из строя ЭОП, ПЗС-матрицы или вторичного источника питания они могут быть оперативно заменены;
2. Возможностью модернизации уже изготовленных модулей, так как при появлении новых ЭОП или ПЗС-матриц с улучшенными параметрами они могут быть использованы взамен устаревших без существенного изменения конструкции модуля.

Опытные образцы ЭОП (вместе с конструкторской и технологической документацией) с фотокатодом на основе соединения Cs_2Te и входным окном из MgF_2 разработаны и изготовлены ЗАО «Экран-ФЭП» (г. Новосибирск). Конструкция унифицирована с конструкцией ЭОП 2⁺ и 3-го поколений по габаритным размерам и электропитанию.

Характеристики ЭОП следующие:

Диапазон спектральной чувствительности, нм	200 – 340
Диаметр фотокатода, мм	18 _{-0,2}
Квантовый выход на длине волны 240 нм, %, не менее	15
Диапазон рабочей облученности в плоскости фотокатода, Вт/м ²	$10^{-2} - 10^{-4}$
Пороговая облученность в плоскости фотокатода, Вт/м ² , не более	10^{-7}
Разрешение, штр./мм, не менее	45
Коэффициент преобразования, не менее	$2 \cdot 10^4$
Яркость темного фона, кд/м ² , не более	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Напряжение питания, В	2 – 4
Диаметр, мм	43
Длина, мм	25
Масса, г	70

Опытные образцы бескорпусного ТВ-модуля (с рабочей конструкторской и технологической документацией) на основе ПЗС-матрицы разработаны и изготовлены ФГУП НПП «Пульсар» (Москва). Технические характеристики модуля:

Формат кадра, элементов	752×568
Шаг элемента, мкм	9×9
Спектральный диапазон чувствительности (по уровню 0,1), мкм	0,4 – 0,95
Область максимальной чувствительности, мкм	$0,7 \pm 0,15$
Пороговая чувствительность, лк, не более	0,001
ТВ-разрешение, ТВЛ, не менее	550
Частота следования кадров, Гц	25

В итоге при габаритах $\varnothing 88 \times 134$ мм и массе около 1 кг экспериментально подтверждены следующие технические параметры УФ-ТВМ в целом:

Диапазон спектральной чувствительности (по уровню 0,1), нм	200 – 340
Пороговая облученность в плоскости фотокатода, Вт/м ²	$5 \cdot 10^{-7}$
Рабочая облученность в плоскости фотокатода, Вт/м ² , не более	$5 \cdot 10^{-4}$
ТВ-разрешение при рабочей облученности, ТВЛ	
В центре, не менее	400
В углах, не менее	300
Частота смены кадра, Гц	25
Время готовности к работе с момента включения, мин., не более 1	
Электропитание, В	27^{+4}_{-7}
Энергопотребление, Вт, не более	4
Диапазон рабочих температур, °С	± 50

Изготовлены 4 опытных образца УФ-ТВМ, успешно проведены их предварительные испытания; рабочей конструкторской и технологической документации присвоена литера «О».

В декабре 2006 г. один из модулей в составе ТВ-камеры был использован для оценки фоноцелевой обстановки при проведении натурных экспериментов с малоразмерным самоизлучающим объектом. Работы выполнялись при метеорологической дальности видимости 5 – 6 км, высоте облачности 580 м и температуре воздуха -1°C . По условиям обеспечения безопасности экспериментов аппаратура функционировала полностью в автономном режиме. На рис. 2 приведена часть раскадровки записи одного из пусков. Дистанция съемки – 3 000 м. На кадре 1 виден момент запуска объекта; кадр 3 – запуск его маршевого двигателя. Объект наблюдается очень отчетливо в отсутствие каких бы то ни было фонов.

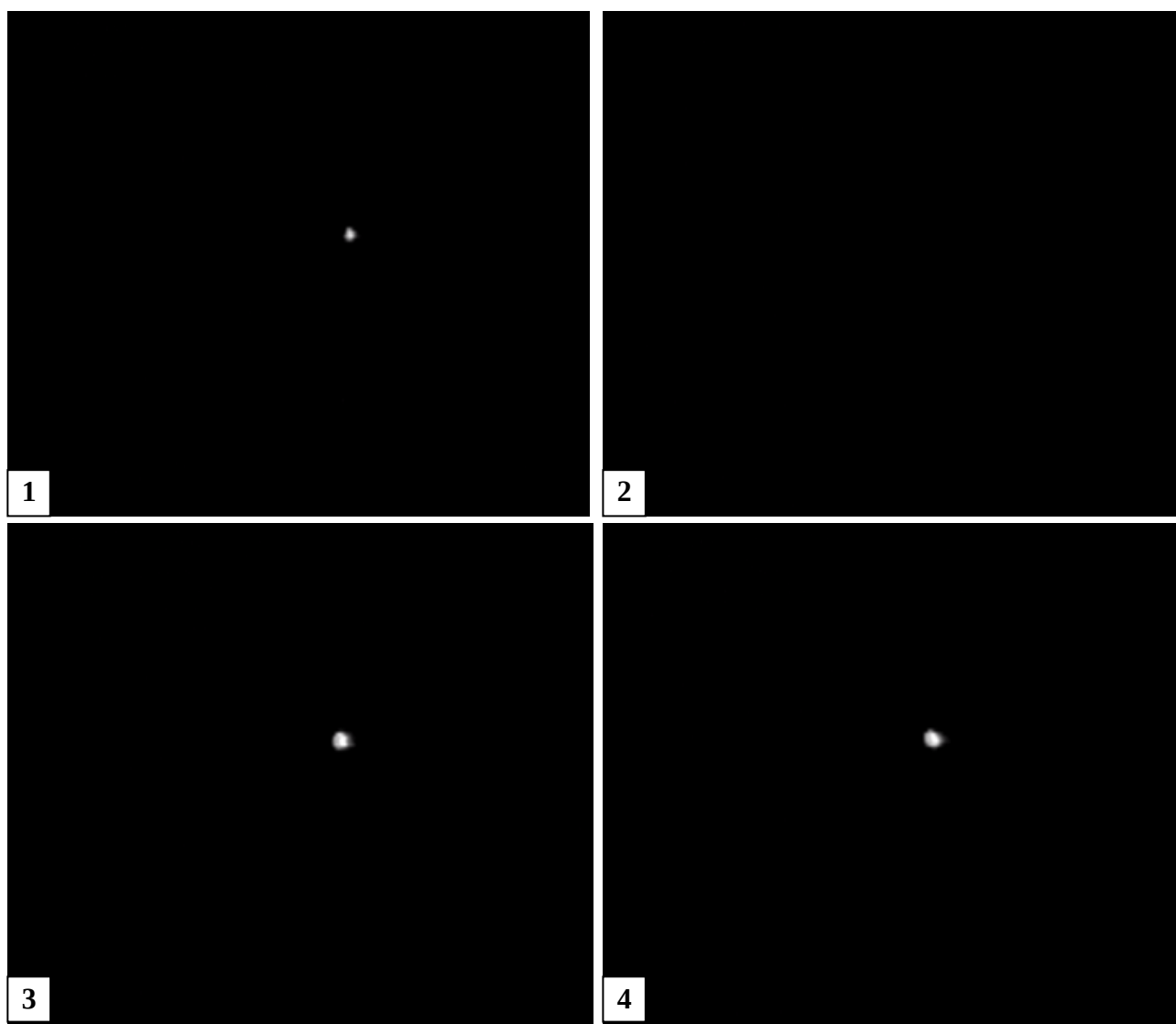


Рис. 2. Раскадровка УФ-записи начальной стадии одного из пусков малоразмерного самоизлучающего объекта

Прогнозируя пути дальнейшего совершенствования УФ-ТВМ, необходимо рассматривать, прежде всего, разработку ЭОП с фотокатодом большего диаметра (не менее 25 мм, а желательно и до 40 мм, поскольку данный параметр напрямую влияет на габариты, вес, сложность конструкции и изготовления входной оптики для ТВ-систем с большим угловым полем зрения) и новых матричных бескорпусных ТВ-камер с высокой частотой обновления видеoinформации (смены кадра). Именно на основе таких ЭОП и бескорпусных ТВ-камер с использованием ПЗС- или КМОП-матриц возможно создание высокочувствительных ТВ-модулей для УФ-систем различного назначения.

Отметим, что подобного рода модуль может быть эффективно использован в единой информационной системе совместно с инфракрасным (ИК) датчиком, когда с его помощью производится обнаружение факта появления и селекция объектов, после чего выдается целеуказание ИК-датчику на основе матричного фотоприемника, который осуществляет дальнейшее слежение за объектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоконев В.М., Крайлюк А.Д., Журавлев П.В. и др. Задачи и перспективы создания современной элементной базы для аппаратуры ультрафиолетового диапазона спектра // Материалы ЛIII Междунар. конф. «Современные проблемы геодезии и оптики». Ч. III – Новосибирск: СГГА, 2003. – С. 40–42.

2. Дегтярев Е.В., Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Проблемы и пути развития элементной базы для систем дистанционного зондирования в ультрафиолетовой области спектра // Сб. трудов VII Междунар. конф. «Прикладная оптика–2006». Т. 1. – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2006. – С. 164–167.

3. Бузук В.В., Вергилес С.А., Гусаченко А.В. и др. Унифицированный ряд низкоуровневых телевизионных камер // Оптический журнал. – 2001. – № 9. – С. 98–99.

4. Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Высокосветосильный растровый УФ телеспектрометр // Тез.докл. Совещ. «Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники» («Фотоника–2003»). – Новосибирск: ИФП СО РАН, 2003. – С. 86.

5. Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Краткие итоги разработки элементной базы и оптико-электронных модулей специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра // Сб. материалов Междунар. конгресса «ГЕО–СИБИРЬ–2006». Т. 4. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 31–34.

6. Марков А.В., Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. и др. Некоторые предварительные результаты натурных испытаний оптико-электронной аппаратуры специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра // Сб. материалов Междунар. конгресса «ГЕО–СИБИРЬ–2006». Т. 4. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 34–37.

© П.А. Алдохин, П.В. Журавлев, А.С. Рафаилович,
А.В. Турбин, С.М. Чурилов, В.Б. Шлишевский, 2008

УДК 635.317.6

В.С. Ефремов

СГГА, Новосибирск

МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ

V.S. Efremov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

MULTISPECTRAL OBJECTIVE

Results of calculation of a multispectral objective are offered. For the given objective the basic optical circuit and distribution of energy in an aberrational stain are resulted

Одной из основных задач по увеличению информационных возможностей оптико-электронных приборов является расширение их рабочего спектрального диапазона. Чередование спектральных диапазонов в процессе работы или получение одновременных изображений в нескольких рабочих диапазонах спектра повышает количество и оперативность получения информации.

Приборы данного типа могут найти применение для:

- Обнаружения скрытых объектов (оружие, наркотики и т.д.) под одеждой человека без дополнительной подсветки;
- Досмотра багажа на таможенных, погранпостах, в почтовых отделениях и т.д. с применением дополнительной подсветки;
- Визуализации взлетно-посадочных полос при тяжелых метеоусловиях и т.д.

В настоящее время появились неохлаждаемые матричные приемники электромагнитного излучения, работающие в диапазоне длин волн от 3мкм до 3000мкм. Они сочетают в себе преимущества тепловизионных приборов и приборов, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

Примером такого приемника может служить разработка НИИПФ (главный конструктор Шиляев А.А.) [1]. Особым элементом приемника является специально разработанная пленка, обеспечивающая почти 100% поглощение электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. Параметры приемника приведены в табл. 1.

Для проецирования излучения на приемники данного типа представляет интерес использование многоспектральных объективов.

Использование единой многоспектральной оптики позволяет снизить весогабаритные характеристики входного оптического устройства, т.е. повысить эксплуатационные возможности оптико-электронной аппаратуры в целом.

В качестве исходной схемы для разработки такого типа устройств, использована схема зеркально-линзового объектива, состоящая из зеркала Манжена и положительного компенсатора в параллельном пучке лучей, выполненных из одного оптического материала [2]. Такое расположение оптических элементов реализует известный принцип частичной взаимной компенсации хроматических aberrаций.

Таблица 1. Основные параметры приемника излучения

Диапазон длин волн	3-14мкм и 200-3000мкм (одновременно)
Удельная обнаружительная способность на 1 пиксель	$D^*=3 \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{1/2} \text{ см}^{-2}$
Частота модуляции	24Гц
$\Delta T_{\text{порог.}}$	0,1К
Число пикселей	128x128мм
Размер пикселя	1x1мм

Используя в качестве материала преломляющих оптических элементов фтористый кальций, прозрачного для оптического излучения от 3 мкм до 7 мкм и пропускающего излучение от 200мкм до 400мкм. Коррекция aberrаций и оценка качества проводилась по поддиапазнам спектра: тепловизионном – 3-5 мкм, субмиллиметровом – 200-400 мкм. Объектив имеет относительное отверстие 1:1.5 и поле зрения 10 градусов.

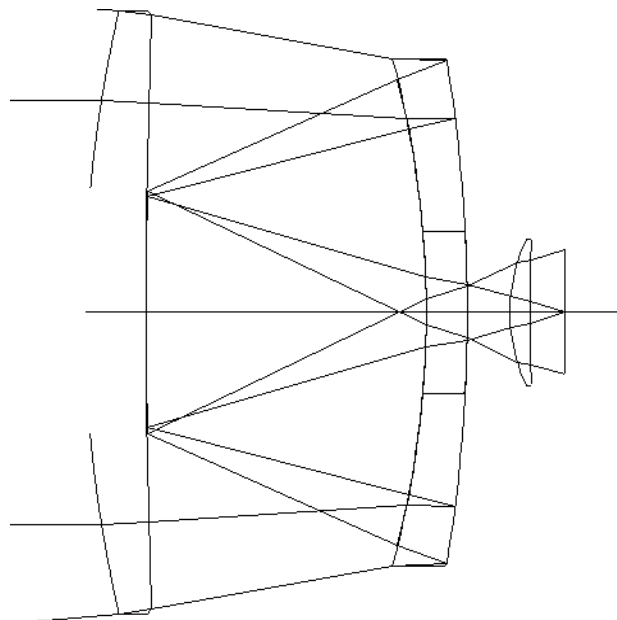
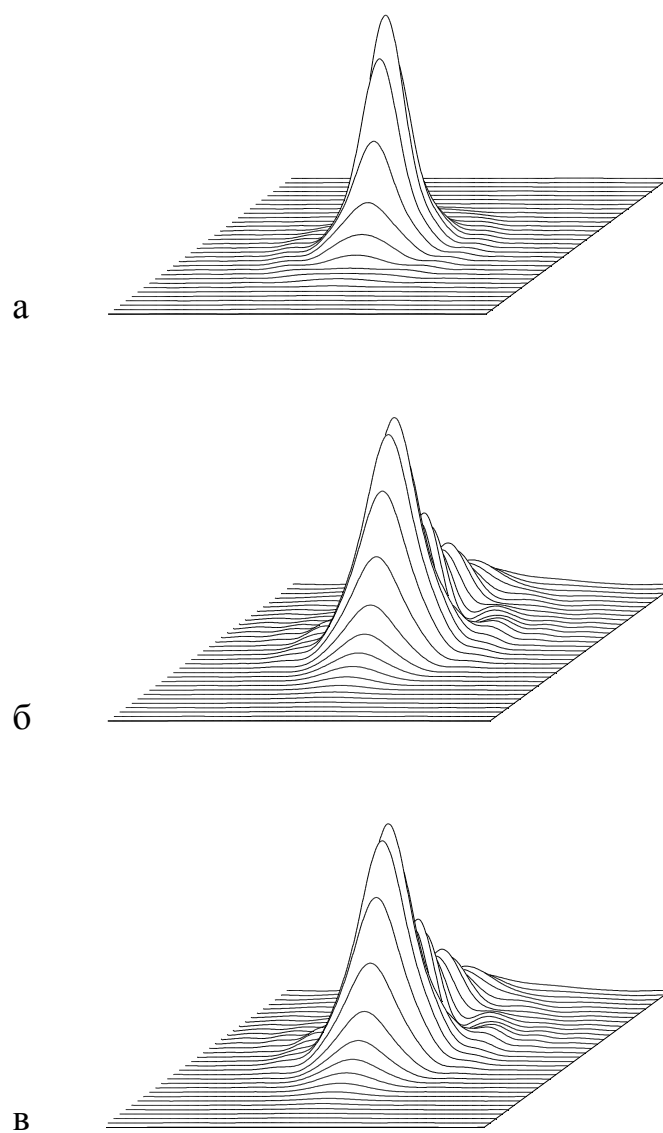


Рис. 1. Оптическая схема объектива

Ниже приведены качественные и количественные результаты расчета объектива для диапазона спектра от 3мкм до 5мкм.



а – на оси; б – на зоне; в – на краю поля.

Рис. 2. Пространственное распределение энергии в абберационном пятне по полю зрения

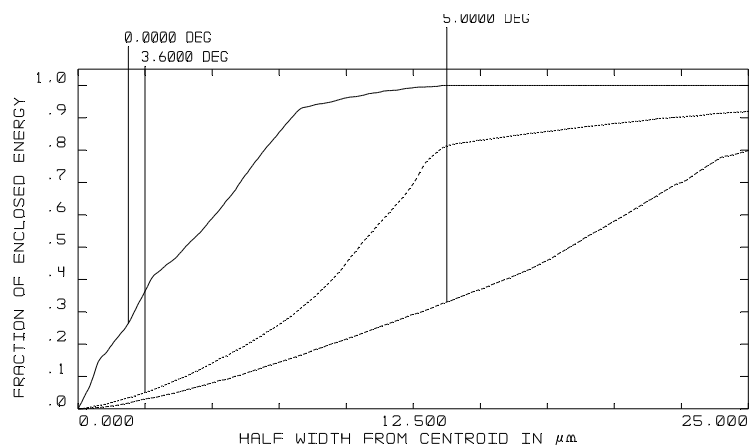
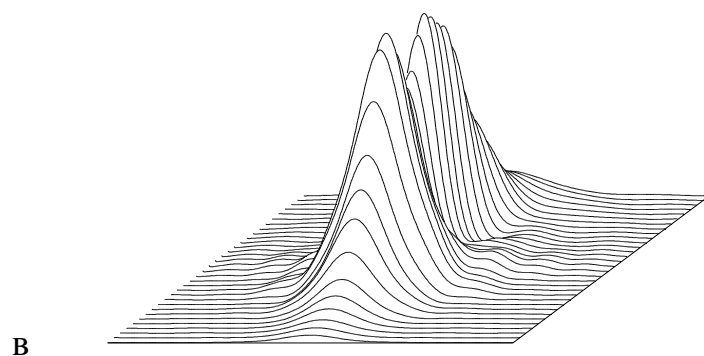
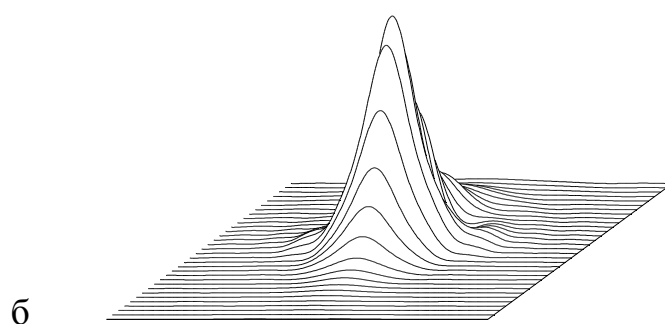
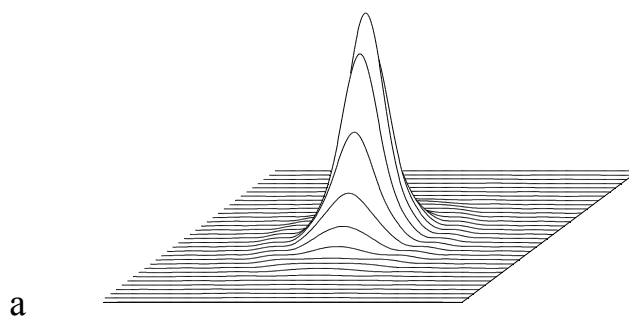


Рис. 3. Концентрация энергии в абберационном пятне

Ниже приведены качественные и количественные результаты расчета объектива для диапазона спектра от 200мкм до 400мкм.



а — на оси; б — на зоне; в — на краю поля.

Рис. 4. Пространственное распределение энергии в абберационном пятне по полю зрения

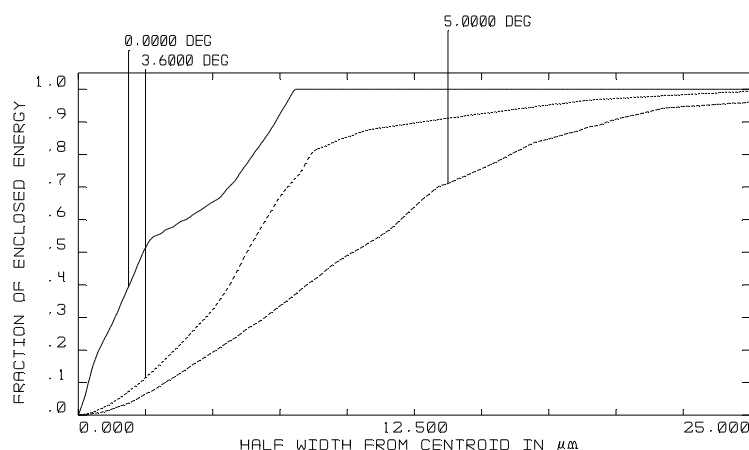


Рис. 5. Концентрация энергии в абберационном пятне

Результаты расчётов показывают принципиальную возможность разработки многоспектральных систем для нескольких диапазонов спектра. Размер абберационного кружка увеличивается от длины волны излучения, однако в каждом из поддиапазонов не превышает 50 мкм и при дальнейшей оптимизации может быть уменьшен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. НИИПФ. Матричный приемник. Применение классических мембран. Технологическая разработка отдела 30. Неохлаждаемый матричный приемник электромагнитного излучения в диапазоне 0,1-2 мм, на мембране. Режим доступа: http://www.niifp.ru/rus_ver/micromech/mat_reciever.html.
2. Ефремов В.С. О коррекции хроматизма зеркально линзовых объективов в широкой области спектра // Оптико-механические и оптико-электронные приборы: Межвуз. сб. – Новосибирск: НИИГАиК, 1985. – 144–149 с.

© В.С. Ефремов, 2008

УДК 621.383:623

Ю.Н. Коронин, В.В. Малинин, Г.Н. Попов

СГГА, ЦКБ «Точприбор», Новосибирск

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И УНИФИКАЦИИ СТРЕЛКОВЫХ ПРИЦЕЛОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ИЗДЕЛИЙ ЦКБ «ТОЧПРИБОР»

Yu.N. Koronin, V.V. Malinin, G.N. Popov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

HISTORY OF CREATION AND UNIFICATION OF THE SHOOTING NIGHT VISION SIGHTS BY THE EXAMPLE OF THE CENTRAL DESIGN DEPARTMENT BUREAU «TOCHPRIBOR» PRODUCTS

Lacks and ways of their elimination to series of night sights are considered.

Свойства первых ПНВ 1ПН24 - 1ПН27 - 1ПН28

В начале 1960-х годов в ОКБ Новосибирского приборостроительного завода были разработаны приборы ночного видения (ПНВ) для стрелкового оружия: 1ПН-27-НСПЗ для автомата, 1ПН28-ППН-3 для пулемета, 1ПН-24-ПГН-1 для гранатомета [1].

При испытаниях ПНВ были выявлены следующие недостатки:

- Появление темных пятен (прожоги) на экране ЭОП после воздействия на прицел холостых выстрелов пушки или танковых прожекторов;
- Отсутствие автоматической регулировки яркости экрана ЭОП;
- Слабая унификация элементов прицелов (что ни прицел, то свой аккумулятор, преобразователь напряжения и др.);
- Большая масса и габариты прицелов, превышающие задания по ТЗ;
- Небольшой диапазон работы: от сумерек до темного времени суток;
- Небольшое поле зрения;
- Блики объективов при попадании на них излучения от искусственных источников света;
- Наличие сцинтилляций.

Унифицированный пассивный ночной прицел 1ПН34

В 1967 г. была поставлена ОКР «Альфа» по созданию *унифицированного* ночного бесподсветного прицела НСПУ (шифр 1ПН34) для индивидуального стрелкового оружия.

Конструктивно прицел состоит из следующих узлов и механизмов: корпус, объектив, ЭОП в кожухе с делителем напряжения, окуляр, преобразователь напряжения, высоковольтный блок, механизм угла прицеливания, аккумуляторная батарея.

Основу прицела составляет трехкамерный ЭОП, работающий в видимой области спектра. Основными частями первой камеры являются: полупрозрачный мультищелочной фотокатод, электронно-оптическая система фокусировки электронов и люминесцентный экран. Сопряжение камер производится через тонкие прозрачные слюдяные перегородки толщиной в несколько микрон. На каждую из них со стороны фотокатода нанесен экран, а с обратной стороны – фотокатод последующей камеры. Комбинация экран-фотокатод называется каскадом усиления. В качестве экрана используется люминофор фиолетово-синего свечения, а в качестве фотокатода используется сурьмяноцезий. Спектральные характеристики излучения экрана и чувствительности фотокатода подобраны оптимально.

В третьей камере применен катодолюминесцентный экран, преобразующий энергию электронного пучка в световую энергию. Для визуального наблюдения изображения в выходном экране используется люминофор желто-зеленого свечения. Электроны, попадая на кристаллы люминофора, отдают свою энергию центрам свечения, которые излучают избыточную энергию в виде квантов свет. Для увеличения светоотдачи люминофора и чтобы свет не попадал обратно в камеру, на люминофоры камер наносят со стороны падения электронов тонкую зеркальную алюминиевую пленку.

ЭОП обладает хроматической аберрацией, т.е. искажение изображения из-за неодинаковых начальных скоростей электронов. При этом электроны собираются не в точку, а в кружок рассеяния. Серьезным дефектом изображения является кривизна поверхности электронного изображения, когда электроны, вылетающие из точек, отстоящих от центра фотокатода, образуют на краю экрана значительно больший кружок рассеяния, чем в центре экрана. В связи с этим *разрешающая способность ЭОП при удалении от центра экрана сильно снижается.*

Так как при сборке ЭОП экран установить точно в место сбора электронов в кружок наименьшего рассеяния трудно, то в электроно-оптическую систему *был введен подфокусирующий электрод.*

Изменение напряжения на подфокусирующем электроде относительно фотокатода в пределах ± 100 В, позволяет получить в центре экрана каждой камеры максимальную разрешающую способность.

Кроме кривизны поверхности изображения, дефектом изображения является астигматизм. При этом *разрешающая способность зависит от направления штрихов.*

При изготовлении входного фотокатода часть паров оседает на стенке между подфокусирующим электродом и фотокатодом. В результате этого *уменьшается сопротивление фотокатод-подфокусирующий электрод.* Для исключения этого явления в колбе *создана перетяжка.*

Защитные свойства прицела с ЭОП

При воздействии на прицел излучения от интенсивных источников света в камерах ЭОП возникают недопустимые плотности тока, которые вызывают местный разогрев люминофора и частичное испарение цезия с поверхности фотокатода. Утомляемость фотокатода наблюдается уже при плотностях

фототока порядка 1 мкА/см^2 , а наибольшая допустимая плотность тока фотокатода составляет 30 мкА/см^2 , выше которой наблюдается необратимое ухудшение его характеристик. В моменты засветки в камерах ЭОП возникают плотности тока в сотни раз больше допустимых. В результате появляются прожоги за счет испарения не только цезия, но и сурьмы. На экране ЭОП это проявляется в виде темного пятна.

Защиту ЭОП от внезапного воздействия интенсивного источника света можно осуществить *расфокусировкой потока электронов путем изменения потенциала подфокусирующего электрода в момент действия засветки.*

Первым защитным устройством, примененным в серийном изделии типа 1ПН27 была схема, работающая на принципе разряда конденсаторов в момент появления в поле зрения прицела яркого источника света. В результате разряда конденсаторов практически мгновенно расфокусируется изображение пламени выстрела пушки. При этом яркая точка, способная прожечь фотокатод или экран, превращается в большое пятно с допустимой для ЭОП яркостью изображения, вследствие чего прожог не происходит. Недостатки такого защитного устройства:

- Яркая вспышка в центре экрана, ослепляющая наблюдателя и лишаящая его возможности пользоваться прицелом в течение некоторого времени после исчезновения засветки;
- Защита ЭОП только от импульсной засветки.

В 1967 г. в НИИПФ была разработана схема защиты ЭОП от воздействия как импульсных, так и постоянных источников яркого света, попадающих в поле зрения прицела. В ней расфокусировка потока электронов происходит за счет падения напряжения на защитных резисторах от тока камер. При этом потенциал подфокусирующего электрода становится отрицательным относительно фотокатода, что приводит к расфокусировке электронного пятна.

Универсальный имитатор засветок

С целью определения защитных свойств ПНВ к воздействию источников света в лабораторных условиях был разработан универсальный имитатор засветки. Такой имитатор обеспечивал идентичность условий испытаний. При этом имитировалось воздействие на прицел (пассивный ПНВ) осветительных средств направленного действия на разных расстояниях с учетом прозрачности атмосферы. Кроме того, имитировались световые параметры холостых выстрелов танковой пушки Д10-Т и перемещение источника света относительно прицела.

Оператор последовательно регулировал значения подфокусирующих напряжений на каждой камере ЭОП пока не получалось четкое изображение элемента мира с разрешением не менее 30 штр/мм. Результирующие значения подфокусирующих напряжений заносились в паспорт ЭОП. Поскольку ток делителя был равен 1 мкА, то требуемое значение постоянного резистора соответствовало значению подфокусирующего напряжения. То есть, делитель, изготовленный для одного экземпляра ЭОП, не подходил для другого

экземпляра ЭОП. С переходом на переменные резисторы надобность в такой установке отпала. Делитель стал **унифицированным**.

Необходимость в **блоке регулировки** возникла после накопления опыта работы с ночными прицелами. В условиях естественного ночного освещения **яркость экрана ЭОП и контраст прицельной сетки изменяется в зависимости от освещенности**. Поэтому стрелок вынужден был вручную регулировать яркость подсветки сетки. Чтобы устранить это неудобство в пользовании прицелом, был разработан **блок регулировки яркости экрана ЭОП и подсветки прицельной сетки**.

Испытания прицела 1ПНЗ4 на полигоне и в лаборатории

Серийно прицел 1ПНЗ4 стал выпускаться с 1971 г. Для проверки качества изготовленного прицела потребовалась разработка коллиматора для бестрассовой проверки прицелов. Для этого в 1972 г. был проведен большой объем работ на полигоне ПО НПЗ по отбору партии прицелов, у которых дальность распознавания ростовой фигуры человека соответствовала не менее 300 м.

Дальность распознавания на местности проверялась тренированными наблюдателями ночью по реальной цели (ростовая фигура солдата в шинели) при ЕНО $(3..5)10^{-3}$ лк в отсутствие тумана и дождя. Освещенность измерялась по кольцу Ландольта, нанесенному на щит.

Прицелы, дальность распознавания которых соответствовала заданной, устанавливались на коллиматор 1Ю7-2, входящий в состав комплекта аппаратуры для полевых и стендовых испытаний ПНВ. Аппаратура обеспечивает проверку нормированной (рабочей) разрешающей способности ПНВ при яркости светлого поля тест-объекта отрицательного контраста $2,6 \cdot 10^{-4}$ кд/м², что соответствует имитируемой освещенности на местности $4 \cdot 10^{-3}$ лк со световой нагрузкой всего фотокатода ЭОП. Наблюдатели должны были определить тест-объект, в изображении которого они еще уверенно различали любое из четырех направлений штрихов. Таким образом, для каждого разработанного прицела были определены тест-объекты, разрешение которых на испытательной аппаратуре гарантировало дальность распознавания цели в полевых условиях.

Для проведения НИР по влиянию внешних условий и проведенных доработок ПНВ на дальность распознавания в 1974 году был разработан малогабаритный микрополигон.

Микрополигон позволяет имитировать условия, влияющие на дальность действия ПНВ:

– ЕНО в плоскости тест-объекта, лк	$5 \cdot 10^{-1} .. 5 \cdot 10^{-4}$
– Коэффициент пропускания атмосферы	0,7 .. 1,0
– Расстояние до объекта, м	100, 200 .. 2000
– Скорость перемещения танков, км/час	15 .. 40
– Скорость перемещения солдата, км/час	5 .. 8
– ИК-прожектор, кд	$5 \cdot 10^7$

- Дымку, накладываемую на наблюдаемую картину.

Микрополигон состоит из двух коллиматоров. Основной полигон состоит из шара диаметром 1500 мм и двух объективов диаметром 250 мм и фокусным расстоянием 3000 м. Коллиматор обеспечивает засветку ПНВ в пределах 15°. Два объектива позволяют вести одновременно исследование двух ПНВ.

Малобааритный прицел 1ПН58

В 1976 г. началась разработка прицела с источником питания ЭОП без делителя напряжения и с большим временем непрерывной работы (НИР «Время»). Затем был разработан **унифицированный** ночной прицел НСПУМ (1ПН58) для стрелкового оружия и противотанковых гранатометов (ОКР «Попадание»). Масса прицела не превышала 2 кг в боевом положении. Разработка такого прицела стала возможной после того, как был разработан ЭОП ЗЭП32М с разрешающей способностью 30 штр/мм при нулевых подфокусирующих потенциалах. Поэтому отпала необходимость в подфокусирующих делителях напряжения с переменными резисторами. После этого подфокусирующий электрод стал использоваться только для защиты ЭОП от засветок.

Модернизация прицела 1ПН58 позволила:

- Снизить ток потребления до 7 мА,
- Исключить делитель напряжения,
- Довести время непрерывной работы до 150 часов,
- Снизить массу,
- Применить секцию 5РЦ83Х для питания прицела.

Прицел 1ПН51 на основе инверсного ЭОП с МКП

В конце 1970-х годов в НИИПФ был разработан микроканальный ЭОП «Канал» со следующими параметрами:

- Герметизированная металлостеклянная конструкция;
- Микроканальная пластина (МКП) для усиления яркости;
- Встроенный умножитель напряжения;
- Мультищелочной (Sb-Na-K-Cs) фотокатод;
- выходной экран желто-зеленого цвета.

В этом ЭОП электростатическое поле между анодом и фотокатодом инвертирует изображение и ускоряет фотоэлектроны, обеспечивая дополнительное усиление по яркости. На входной торец МКП проецируется электронное изображение. Электронное изображение в МКП усиливается, а затем переносится на экран ЭОП.

Достоинства ЭОП с МКП:

- Оборачивание изображения в камере ЭОП;
- Большой диаметр фотокатода - 25 мм;
- Равномерное разрешение по полю: в центре – 25 штр/мм, на краю – 20 штр/мм;

- Коэффициент преобразования не уступает трехкамерному ЭОП;
- Небольшая длина: 80 мм.

На базе этого ЭОП с МКП в 1982 был разработан прицел 1ПН51. В прицеле использовался зеркально-линзовый объектив. При этом изображение цели малой яркости проецировалось объективом на фотокатод ЭОП совместно с изображением сетки.

При разработке электрической принципиальной схемы стабилизированного преобразователя напряжения и АРЯС ПНВ впервые были применены микросборки собственного производства, позволившие уменьшить габариты прицела.

В прицеле имеется автоматическая регулировка яркости экрана, которая при освещенности фотокатода $2 \cdot 10^{-2}$ лк начинает снижать напряжение на МКП, поддерживая ток экрана и его среднюю яркость постоянной. Если освещенность превысит несколько люкс, то напряжение на электродах снижается настолько, что экран гаснет. Кроме того, засветка помех до некоторой степени локализуется в ЭОП за счет насыщения соответствующих микроканалов в изображении источника световой помехи, не создавая ореола.

В режиме длительного наблюдения стрелок должен был гасить прицельные знаки поворотом маховичка, чтобы они не отпечатывались в поле зрения. В прицеле имеется кольцо фокусировки ЭОП, предназначенное для получения более четкого изображения цели на разных дальностях распознавания и для компенсации расфокусировки при изменении температуры от минус 50 до 50°C.

Благодаря применению ЭОП с МКП, удалось создать прицел с большим углом зрения и малой длиной. Однако масса прицела осталась на уровне массы прицела 1ПН34.

Прицел 1ПН93 на основе бипланарного ЭОП с МКП

В конце 1980-х годов началась промышленная разработка бипланарного микроканального ЭОП со встроенным высоковольтным источником питания (ВИП), многощелочным фотокатодом со спектральной чувствительностью от 0,2 до 0,4 мкм и экраном желто-зеленого свечения. В отличие от инверсного ЭОП, применяемого в прицеле 1ПН51, здесь используется прямой перенос изображения в плоскопараллельном поле.

Был разработан монолитный микроблок источника питания МБЗ в виде цилиндра, расположенного вокруг вакуумной части ЭОП, и представляющего собой пластмассовый каркас с нанесенной гибкой печатной платой. На печатную плату, изготовленную из фольгированного полиимида, устанавливались бескорпусные элементы и заливались полимерным компаундом. В 1990 г. были изготовлены первые образцы этого микроблока.

Усилиями ОАО «Катод», ФГУП «ЦКБ «Точприбор» и ПО «НПЗ» впервые были разработаны, изготовлены и испытаны промышленные образцы бипланарных ЭОП с МКП. Их параметры приведены в табл. 1.

Достоинства ЭОП – малая масса, малые габариты и низкая стоимость. Недостаток – отсутствие оборачивания изображения, что усложняет

оптическую схему прицела. В первых прицелах 1ПН93-1, -2, -3 изображение оборачивалось в зеркально-линзовом объективе.

Параметры серии прицелов с ЭОП приведены в табл. 2.

Таблица 1. Параметры бипланарных ЭОП с МКП

	ЭПМ-53Г, тема «Рассвет»	ЭПМ-42Г, тема «Калитка»
предел разрешения, штр/мм не менее	36	33
отношение сигнал/шум, отн.ед. не менее	40	
коэффициент преобразования, отн. ед. не менее	25 000	20 000
диапазон освещенности фотокатода, лк	0,4 .. 5*10 ⁻³	

Таблица 2. Параметры прицелов

Параметр	Номинальные значения параметров						
	1ПН34	1ПН58	1ПН51	1ПН93 -1	1ПН93 -2	1ПН93 -3	1ПН93 -4
Тип ЭОП	У-32 3-х кам.	ЗЭПЗМ 3-х кам.	ЭП-10 с МКП	ЭПМ42Г (ЭПМ53Г-8)			
Видимое увеличение, крат	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	5,0	3,7
Поле зрения, град	5°30'	5°	9°35'	8°	6°	6°	10°
Дальность распознавания РФС	300	300	300	300	400	500	500
Напряжение питания, В	2,5	6,25	6,25	1,5	1,5	1,5	1,5
Ток потребления, мА	270	7	40	100	100	100	100
Габариты, мм							
длина	445	450	276	207	220	226	275
высота	191	186	210	176	193	198	130
ширина	96	99	140	79	90	100	81
Масса в боевом положении, кг	2,2	2,0	2,1	1,0	1,3	1,5	1,5

УДК [621.9.06 – 52:658.527:681.3.06](035)

Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов, А.А. Марач

СГГА, Новосибирск

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

B.E. Shlishevsky, A.N. Sosnov, A.A. Maratch

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

COMPLEX AUTOMATION OF MECHANICAL PRODUCTION ON THE BASIS OF MULTIPURPOSE CNC MACHINE-TOOLS. SYSTEMS APPROACH

The authors consider main components of serial- production complex automation on the basis of multi-purpose and other machine tools with CNC in machine-building and instrument-making by means of systems- and- goal-oriented approach. The methods and spatial diagram for optimal decision-making are offered. Main subsystems (one of them, decoded) are also shown.

Система, подсистема, элементы, многоцелевые станки.

Современная наука всё более последовательно осуществляет системный подход к таким явлениям и процессам, которые прежде рассматривались как механические или аморфные совокупности. Накопленный за рубежом и в нашей стране опыт подтверждает, что системный подход позволяет в более полной мере выявить и оптимизировать многофакторные преимущества и параметры эффективности многоцелевых станков.

Одной из причин длительного освоения в эксплуатации многоцелевых станков с УЧПУ называемых за рубежом «Обрабатывающий центр» (ОЦ) и их недостаточной эффективности является то, что подготовительные работы должным образом не систематизируются и не выделяются в самостоятельный комплекс. В результате многие из них выполняются недостаточно организованно и не своевременно, а некоторые упускаются вообще. Системный подход это во многом исключает. Комплексную автоматизацию и механизацию серийного производства (КМ и АСП) на основе станков с УЧПУ и ОЦ можно рассмотреть, как организационно – техническую систему с множеством объектов различной природы с известными и упорядоченными связями. Эти объекты в определённых границах функционируют как целостная пространственно – временная система для достижения заданной конечной цели (обеспечение программы производства, снижение себестоимости и стабилизация качества продукции, облегчения условий и повышения привлекательности труда).

Для нормального функционирования организационно – технологических систем важными факторами являются: правильное задание (определение) цели, выбор правильных пороговых критериев эффективности, разработка оптимальной пространственной структуры и её элементов, выбор и способ реализации рациональных связей и условий эксплуатации системы. Систему КМ и АСП можно расчленить на подсистемы, пока не получим элементы системы (за элементы применяются объекты, которые в условиях данной задачи не подлежат расчленению на части). Свойства систем определяются не только свойствами отдельных элементов, но и характером взаимодействия между ними. Независимо от масштаба и сложности каждой отдельной системы КМ и АСП, её структуру (при использовании ОЦ) можно представить в обобщённом виде построенной из типовых подсистем, показанных в табл. 1.

Подсистема УТСКА (табл. 2) – универсальные и унифицированные (агрегатно – модульный принцип) технические средства комплексной автоматизации: многоцелевые станки – автоматы, станки с ЧПУ, промышленные манипуляторы, средства транспорта и механизации вспомогательных процессов.

Подсистема $P_{т и м.}$ – прогрессивные технологии и методы обработки, внедрение прогрессивных инструментов, позволяющих решать новый круг технологических задач: концентрацию операций, оптимизацию и форсирование режимов резания, автоматизацию контроля деталей и инструментов, повышение качества обработки.

Подсистема T_y – технологическая унификация и преемственность путём подбора и перевода обработки на ОЦ номенклатуры трудоёмких, сложных, точных, многомерных деталей с коэффициентом концентрации операции

$K_{к.о.} \geq 8 - 12$ и более, с внедрением типовых переходов, операций и технологических процессов, групповых методов обработки, обратной технологической оснастки; технологическое освоение станков.

Подсистема O_c – оптимальная специализация по цели производства, формирование на этой базе предметно – замкнутых, преимущественно, поточных подразделений группового производства или технологических ячеек (с количеством оборудования с ЧПУ и $\geq 10 - 15$ единиц); освоение производственной мощности оборудования.

Подсистема T_k – технологичность конструкции заготовок и деталей с целью максимального использования функциональных преимуществ и особенностей многоцелевых станков типа ОЦ и др. и других, оснащенных УЧПУ.

$\mathcal{E}_{оц, max}$ – максимальная экономическая эффективность автоматизации на основе ОЦ, что предполагает достижение проектной эффективности оборудования в процессе эксплуатации.

Заметим, что количество подсистем и их элементов в конкретных условиях может быть расширено, например, можно ввести подсистему обеспечения инструментом и оснасткой.

Системный подход основан на исследовании, изыскании и построении рациональных структур подсистем различных уровней и их элементов (это

базис) и призван обеспечить стабильное функционирование системы КМ и АСП по времени и в пространстве, для обеспечения заданных экономических и производственных показателей.

Ранжирование подсистем I уровня, содержание их элементов, связей и значимость уточняются к конкретным условиям. $\mathcal{E}_{\text{оц, max}}$ можно достигнуть, как показывает опыт предприятий Западной Сибири, путём совокупного использования, интенсивных и экстенсивных ресурсов технологического и организационного характера, присущих станкам с УЧПУ и ОЦ, которые можно выразить функциональной зависимостью (1).

Таблица 1

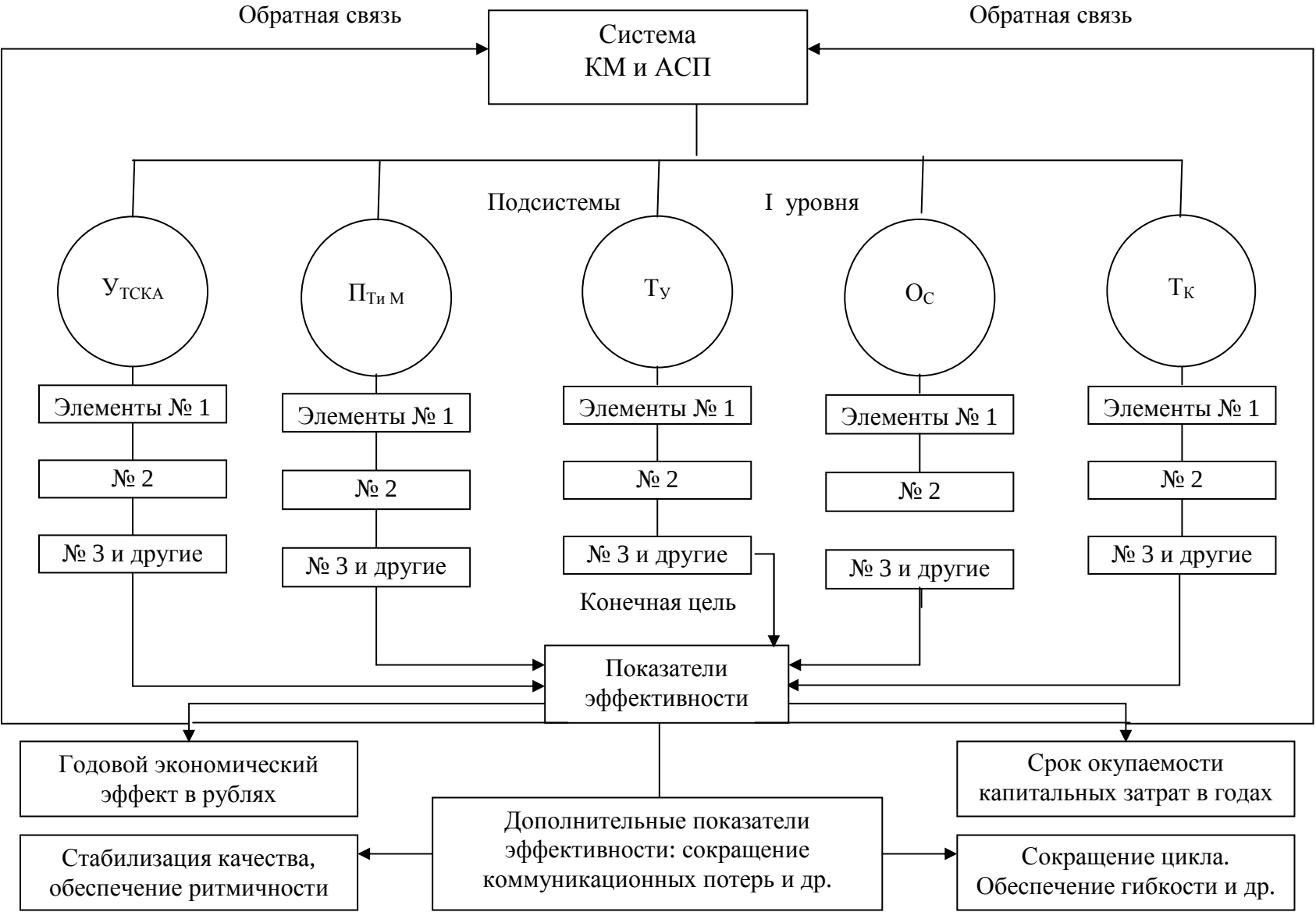
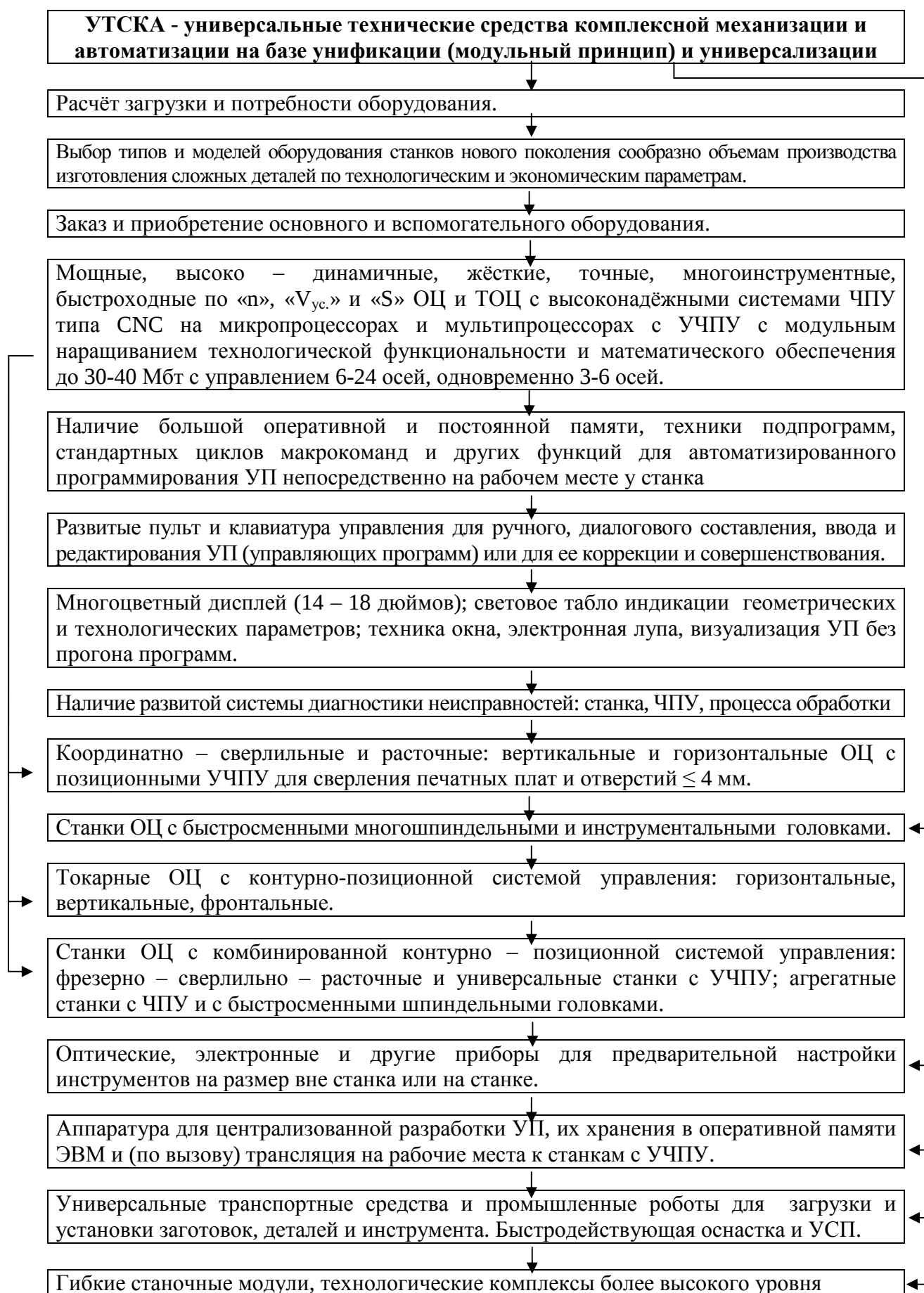


Таблица 2



Рассмотрим, для примера подсистему $Y_{\text{ТСКА}}$, основные элементы которой приведены в табл. 2.

$$\text{КМ и АСП} = (f) \begin{bmatrix} (Y_{\text{ТСКА}}) \\ (P_{\text{ТМ}}) \\ (T_y) \\ (O_c) \\ (T_k) \end{bmatrix} \rightarrow \Xi_{\text{оц.мах.}}$$

Ответственным моментом успешного применения ОЦ с ЧПУ является выбор и комплектование оборудованием. Необходимо приобретать надёжные, производительные, проверенные технологичные в эксплуатации скоростные, мобильные станки с высокими техническими характеристиками, показанные в работах [1; 2], с приемлемой стоимостью. Из зарубежных станков наиболее дешёвыми являются Японские станки, наиболее дорогими – производства Швейцарии и ФРГ (по данным 2004г). В то же время все производители из промышленно – развитых стран гарантируют высокое качество продукции. Это подтверждено многолетней практикой их эксплуатацией в СССР и в РФ [1, 2].

Из отечественных ОЦ сверлильно-фрезерно-расточной группы наивысшей репутацией пользуются все модели Ивановского ПО тяжёлых расточных станков, которые комплектуются приводами и УЧПУ зарубежных фирм: «Фанук», «Бош» и другими по заказу потребителей. Надёжные, отечественные токарные ОЦ в РФ к настоящему времени находятся в стадии освоения. За рубежом, в промышленно развитых странах, (Германии, Японии и др.) освоен большой спектр высоконадёжных и производительных станков подобного типа.

При выборе токарных ОЦ приоритет следует отдавать станкам, оснащённым двумя и тремя инструментальными головками, так как до 80% деталей типа тел вращения допускают параллельную обработку двумя инструментами и, в ряде случаев, изготовление и сборку двух – пяти деталей в самостоятельный узел.

ОЦ по технологическим возможностям и габаритам должны соответствовать техническим требованиям, предъявленным к намеченным для обработки деталей. В большинстве современных станков применяются УЧПУ с контурной позиционной системой управления ведущих мировых фирм, которые отличаются высокой надёжностью, универсальностью и многофункциональны – это УЧПУ фирмы Fanuk (Япония), Simens, Hajdenhajp, Boch (ФРГ) и др.

Производительность, надёжность и технологические возможности ОЦ и ТОЦ в решающей степени определяются их динамикой и качеством УЧПУ, автоматикой, связывающей приводы станка с УЧПУ. В результате внедрения вышеуказанных новаций надёжно обеспечиваются указанные в паспортах высокие технические параметры: по мощности, частоте вращения шпинделя, по высокой и сверхвысокой скорости холостых ходов, по надёжности.

За последние 10 – 15 лет создано новое поколение станков типа ОЦ и ТОЦ, в которых использовано множество инноваций, что повысило автономную производительность станка на 125 – 140 %.

Новые станки высоко динамичны, имеют повышенную жесткость, в их компоновке органически сочетаются механические, гидравлические, электронные и электрические узлы. Хорошо обозримые рабочие зоны, надежная безопасность и защита от шума плюс удачный внешний дизайн.

Термосимметричный шпиндельный узел и термосимметрия других рабочих узлов; минералокерамическая станина, а в шариковых подшипниках шпинделя минералокерамические тела вращения, обеспечивают долговременную точность.

Высокие скорости вращения безредукторного частотно - регулируемого шпинделя (до $30.000 - 40.000^{-1}$) при обработке деталей вписывающихся в куб со стороной 150 мм. По специальному заказу фирма Felman (Швейцария) поставляет станки ОЦ с $n=100.000\text{м}^{-1}$.

В станках ОЦ нового поколения достигается многократное сокращение времени смены инструмента (которое происходит непосредственно в рабочей зоне станка и составляет 0,2 – 0,3 сек.). Это в 3 – 12 раз меньше чем в действующих ОЦ. Поскольку за одну смену происходит более 1100 раз смена инструмента, то подобная инновация значительно экономит вспомогательное время. Отметим также, что скорость холостых ходов рабочих органов подачи инструмента и других органов станка увеличилось до 60 – 80 м/мин. (вместо 4 – 10 м. в действующих станках); ускорение перемещения рабочих органов, составляет 10 м^{-2} (это фактический предел). Такие высокие скорости вспомогательных ходов позволяют существенно - до 10 раз сократить время холостых ходов.

В станках нового поколения релейные коммандо - аппараты (часто, весьма ненадежные) заменены на широко функциональные и надежные электронные контроллеры, которые вмонтированы в устройства ЧПУ, четко обеспечивают переключение силовых электродвигателей станка по УП и выполняют еще много различных контрольных и других полезных функций.

Некоторые фирмы, в частности «Гильдемайстер» (ФРГ), используют сверхскоростной привод в виде прецизионного бесступенчатого частотно – регулируемого УЧПУ мотора шпинделя, таким образом, ликвидируются все промежуточные элементы (зубчатые зацепления, электромагнитные муфты, ременные передачи, и др.), что резко повышает жесткость системы СПИЗ и качество обработки. Этой же фирмой внедрен индуктивный линейный привод подач по оси z на токарных станках. Основой привода являются постоянные магниты из редкоземельных элементов и электромагнитные индуктивные катушки. Таким образом, ликвидированы дополнительные электродвигатели и шариковые винтовые пары, которые вносили ошибку в величину подачи и в то же время все больше усиливается жесткость системы СПИЗ, что позволяет обрабатывать детали до Ra 0,63 – 0,250 мкм. без дополнительной операции шлифования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шлишевский Б.Э. «Многоцелевые станки с ЧПУ для обработки корпусных деталей и пути повышения их эффективности». – М.: ВНИИТЕМР, 1985. – С. 64.
2. Шлишевский Б.Э. «Гибкая автоматизация многосторонней обработки деталей типа не центрированных тел вращения». – М.: ВНИИТЕМР, 1986. – С. 88.
3. Материалы симпозиума и каталоги фирмы «Гильдемайстер» 2004 г., г. Новосибирск.
4. Штаймхимлер Р. «Концепция технологии 90-х годов. Автоматика и робототехника». Издательство: Модерн Индустрии (Германия) и Ост Контакт (Швейцария) № 2. – 1990. – С. 12–18.
5. Шлишевский Б.Э., Соснов А.Н., Трифонов Е.Е. «Микропроцессорные устройства ЧПУ и Гибкая автоматизация оборудования в оптическом приборостроении». Новосибирск, НИИГАиК, 1989. – С. 143.
6. Каталоги и проспекты, материалы симпозиума фирм производителей УЧПУ за 2002–2006 год: Hajdenchajn, Siemens, Boch, Traub, Gildemejster (ФРГ); Fanuc, Jmazaki, Okuma (Япония); Facor (Испания), Num (Франция) 2008 г.

© Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов, А.А. Марач, 2008

УДК 528.517:681.783.25

А.В. Кошелев, А.К. Дмитриев, И.Д. Миценко, А.К. Синякин
СГГА, Новосибирск

АБСОЛЮТНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ДАЛЬНОМЕРА-РЕФРАКТОМЕТРА

A.V. Koshelev, A.K. Dmitriyev, I.D. Mitsenko, A.K. Sinyakin
Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)
10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

USE OF ABSOLUTE INTERFEROMETER WITH PHEMTOSECOND RANGE-FINDER REFRACTOMETER

The authors demonstrate the method of ambiguity resolution and determination of the mean-integral refractive index in laser interferometer using femtosecond light range-finder refractometer. The joint use of these devices allows to achieve ambiguity resolution without reflector rolling and to increase the efficiency of linear measurements.

Известно, что фемтосекундные лазеры являются весьма перспективными источниками излучения для лазерных дальномерных систем. У фемтосекундных лазеров, генерирующих периодическую последовательность импульсов в режиме синхронизации мод, наиболее важными являются следующие характеристики. Спектр излучения такого лазера составляет набор равноотстоящих частотных компонент (мод), заполняющих всю ширину спектра от радио- до ультра фиолетового диапазона спектра, а периодическая последовательность равноотстоящих, сверхкоротких импульсов может быть использована в качестве оптической линейки для измерения длины [1].

Высокие точностные возможности фемтосекундных лазерных дальномеров дают возможность создавать на их основе светодальнометры –рефрактометры для одновременного измерения расстояний и определения среднеинтегрального показателя преломления атмосферы [2].

Несмотря на потенциально высокую точность светодальномеров – рефрактометров с использованием фемтосекундных импульсов инструментальная погрешность их при измерении расстояний порядка сотен метров может составить величину порядка 0.1 мкм. В то время как лазерные интерферометры перемещений позволяют получать инструментальную погрешность на уровне 0.01 мкм. Однако интерферометры перемещений обладают существенным недостатком, поскольку требуют прокатки отражателя вдоль измеряемой линии. Это требует установки вдоль измеряемой линии виброустойчивых столбов с направляющими, что в значительной мере усложняет процесс измерений и делает его очень дорогостоящим.

В настоящей работе обсуждаются возможности использования фемтосекундных дальномеров – рефрактометров для разрешения неоднозначности в лазерных интерферометрах перемещений и повышения, тем самым, точности измерения расстояний. В этом случае более точно измеренная дробная часть половины длины волны позволяет существенно повысить точность измерения расстояний.

Расстояние, измеренное фемтосекундным дальномером [1] представим уравнением

$$D_d = \frac{\lambda_\phi}{2 \cdot \bar{n}} N_d + d_d,$$

где D_d - измеряемое расстояние; λ_ϕ - длина волны, соответствующая частоте следования фемтосекундных импульсов; N_d - целое число полувольт $\lambda_\phi/2$; d_d - показания дальномера по отсчетной шкале $0 < d_d \leq \lambda_\phi/2$; $\bar{n}$ - среднеинтегральный показатель преломления атмосферы.

Определение среднеинтегрального показателя преломления атмосферы $\bar{n}$, обеспечивающего учет воздействия неоднородной в пространстве и времени атмосферы, на результаты измерений может быть выполнен с помощью фемтосекундного рефрактометра. Принцип работы такого рефрактометра описан в работе [2] и в настоящей работе, в связи с повышенной точностью, схема дополнена индикатором нуля в виде разрезного (двухплощадного) фотоприемника.

Для пояснения работы рефрактометра воспользуемся схемой, представленной на рис.1. Основная задача рефрактометра заключается в точном измерении разности хода фемтосекундных импульсов с различными частотами ω_1 и ω_2 в атмосфере при прохождении измеряемой дистанции туда и обратно, с текущей регистрацией метеоэлементов на конечных пунктах измеряемой линии.

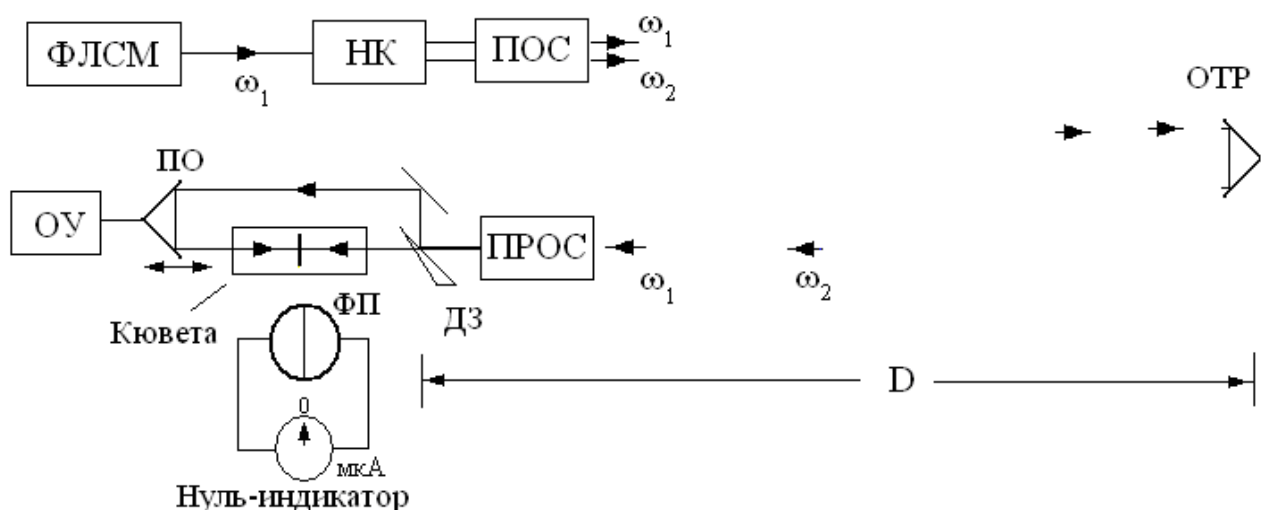


Рис. 1. Функциональная схема фемтосекундного рефрактометра

Фемтосекундный лазер с синхронизацией мод (ФЛСМ) излучает периодическую последовательность импульсов с оптической частотой ω_1 . Часть

излучения с частотой ω_1 в нелинейном кристалле НК преобразуется в излучение второй гармоники с частотой ω_2 . Излучения с частотами ω_1 и ω_2 передающей оптической системой (ПОС) направляются на отражатель (ОТР), установленный на другом конце измеряемой линии. Отраженное излучение с помощью приемной оптической системы (ПРОС) направляется на дихроичное зеркало (ДЗ) и разделяется на два пучка с частотами ω_1 и ω_2 и они направляются в кювету с красителем навстречу друг другу. В месте встречи импульсов за счет двухфотонной люминесценции возникает световое пятно, ширина которого для импульса в 1 фс составит 0.3 мкм. Вращая микрометрический винт подвижного отражателя (ПО) с отсчетным устройством ОУ, путем перемещения светового пятна устанавливаем стрелку нуль-индикатора двухплощадного фотоприемника в нуль. Отсчет по ОУ дает возможность точно измерить разность хода фемтосекундных импульсов с погрешностью не хуже 0.1 мкм. Это, в свою очередь, позволяет вычислить значение среднеинтегрального показателя преломления $\bar{n}$ или исправленное за него расстояние.

Конкретной задачей дальномера – рефрактометра сводится к определению целого числа фазовых циклов N и среднеинтегрального показателя преломления $\bar{n}$, которые входят в уравнении расстояния D измеряемого интерферометром:

$$D = \frac{\lambda_{BAK}}{2 \bar{n}} N + d, \quad (1)$$

где λ_{BAK} - длина волны лазера интерферометра в вакууме, N - целое число длин полуволн, d - показания интерферометра.

Известно, что для уверенного получения правильного значения числа N необходимо выполнять измерения с погрешностью порядка $\lambda/4$, что для $\lambda \approx 1$ мкм составит 0.25 мкм. Следует отметить, что контроль за правильностью определения N из результатов измерений, искаженных погрешностями измерений, может осуществляться автоматически за счет округления вычисленных значений числа N до целого числа. Тогда искомое значение N определяется по формуле как округленное до ближайшего целого число

$$N = \text{enter} \left[\frac{(D_d - d)}{\frac{\lambda_{BAK}}{2 \bar{n}}} \right].$$

При необходимости уточнение среднеинтегрального показателя преломления $\bar{n}$ может быть выполнено двухчастотным интерферометрическим методом [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. High Precision Pulsing Laser Ranger. A.V. Koshelev, I.V. Lesnykh, V.A. Seredovich, A.K. Sinjakin, A.P. Karpik. PRECEEDINGS OF SPIE. Seventh International Metrology Aplied to Science, Industry, Everyday Life. Novosibirsk. 2002. s. 534-538.

2. Рефрактометр. А. с. СССР, Кл. 01 21/46, 01 1/100, Кошелев А.В., №655199, заявл, 31.01.78.

3. Голубев А.Н., Ханов В.А. Лазерная интерферометрия больших расстояний. – М., «Недра». 1991, с. 133.

© А.В. Кошелев, А.К. Дмитриев, И.Д. Миценко, А.К. Синякин, 2008

ТРЕХВОЛНОВЫЙ АБСОЛЮТНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

A.V. Koshelev, I.D. Mitsenko, A.K. Sinyakin, V.N. Matusko
Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)
10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THREE-WAVE ABSOLUTE INTERFEROMETER

The article deals with high-precision method for mean-integral atmosphere refractive index determination without measuring meteorological elements at the ends of line being measured. It is recommended to use femtosecond light range-finder refractometer to achieve ambiguity resolution of interferometer measurements.

Важным направлением в области лазерной дальнометрии является создание многоволновых лазерных интерферометров перемещений, позволяющих с одновременным измерением расстояний и определением среднеинтегрального показателя преломления атмосферы. Однако такие интерферометры обладают существенным недостатком, поскольку требуют перемещений отражателя вдоль измеряемой дистанции и точно выверенных направляющих. Это в значительной мере усложняет процесс измерений и делает его очень дорогостоящим.

В предыдущей статье [1] мы рассмотрели возможность использования фемтосекундных дальномеров рефрактометров для разрешения неоднозначности в абсолютных интерферометрах. Дальнейшее повышение точности может быть достигнуто в трехволновых интерферометрах [2]. Это позволяет достичь более высокой точности линейных измерений без определения метеоэлементов на концах определяемой линии.

В настоящей работе обсуждаются возможности использования фемтосекундных дальномеров – рефрактометров для разрешения неоднозначности в трехволновых интерферометрах-рефрактометрах. Определенная таким образом длина может быть использована для расчета порядка интерференции в трехволновом интерференционном методе. Идея реализация такого интерферометра представлена в работе [1].

Принцип работы трехволнового интерферометра заключается в следующем. На трех оптических длинах волн λ_1, λ_2 и λ_3 определяются оптические пути D_1, D_2 и D_3 , по методике, описанной в статье [1].

Основное уравнение трехволнового рефрактометра представлено в работе [2] и имеет вид:

$$D = D_1 - A(D_2 - D_1) - B(D_3 - D_1),$$

где А и В - коэффициенты коррекции:

$$A = \frac{(n_{01}-1)(\mu_{01}-\mu_{02})-(n_{01}-n_{02})(\mu_{01}-1)}{(n_{01}-n_{02})(\mu_{01}-\mu_{03})-(n_{01}-n_{03})(\mu_{01}-\mu_{02})},$$

$$B = \frac{(\mu_{01}-1)(n_{01}-n_{02})-(n_{01}-1)(\mu_{01}-\mu_{02})}{(n_{01}-n_{02})(\mu_{01}-\mu_{02})-(n_{01}-n_{03})(\mu_{01}-\mu_{02})},$$

Здесь n_{01} и n_{02} - фазовые показатели преломления сухого воздуха; μ_{01} и μ_{02} паров воды в стандартных условиях. Учитывая, что $D_i = \lambda_i N'_i / 2$, где λ_i - значения длин волн в вакууме ($i=1,2,3$), $N'_i = N_i + \Delta N_i$ соответствующие им порядки интерференции, N_i - целое число полуволен на i -ой длине волны, а ΔN_i - дробная часть полуволны на i -ой длине волны.

Таким образом, для получения скорректированного значения расстояния достаточно располагать точными значениями длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и измерить на каждой из них порядки интерференции N'_i . Оптимальный выбор длин волн выполнен в работе [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абсолютный интерферометр с использованием фемтосекундного дальномера-рефрактометра. А.В. Кошелев, А.К. Дмитриев, И.Д. Миценко, А.К. Синякин См. настоящий сборник.
2. Gjlubev A.N., Chekhovsky A.M. Three-colour ranger finder. Appl. Opt., 1994, N 31, pp. 7511-7517.

© А.В. Кошелев, И.Д. Миценко, А.К. Синякин, В.Н. Матуско, 2008

УДК 681.783

С.А. Шойдин, В.Ю. Кондаков

СГГА, Новосибирск

ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АДРЕСНОЙ РЕКЛАМЫ

S.A. Shoydin, V.Ju. Kondakov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

In the report the hologram developed for address advertising consisting of three holographic lattices is presented, each of which carries out strictly the function, creating the image having specific properties of storing. Patent Russia № 21460.

Декоративное голографическое устройство для адресной рекламы, согласно свидетельству № 21460 содержит две или более отражательных голограмм, представляющих одну художественную композицию, записанных на одном и том же голографическом носителе с максимальными значениями дифракционной эффективности по полю голограмм не менее 80% , выполненных в разном стиле, так, что часть голограмм представляют собой трехмерные изображения фирменного, товарного, или другого знака с максимальной глубиной не более 5 мм, а остальные представляют плоские изображения, в том числе рекламные тексты, часть из которых может восстанавливаться указанными голограммами вне плоскости голограммы, а также корпус, в виде декоративной рамки из багета с приспособлениями для установки на стол и вывешивания на стену.

Известны средства осуществления рекламной компании, содержащие в себе голограммы, при освещении которых белым светом, проявляется записанное на них голографическое изображение [1, 2]. Голограмма при этом представляет собой одну отражательную голограмму с записанным на нее изображением рекламируемого товара, голограмма выполняется на гибкой основе, которая в свою очередь закрепляется на лицевой поверхности средства осуществления рекламной компании.

Наиболее близким аналогом является торговая карточка для осуществления рекламной компании [2], которая представляет собой голограмму с изображением рекламируемого товара, нанесенную на гибкую полимерную основу. Сама голограмма прикреплена к плоской поверхности жесткой торговой карточки.

Работает указанное декоративное устройство следующим образом. Голограмма устанавливается на стол, или помещается на стену. Под действием естественного, или искусственного, в том числе и рассеянного, освещения голограммы восстанавливают два или более изображения. Первое в широком поле зрения (50°) формируется объемное изображение фирменного знака, символа, товара, или иного рекламируемого объекта. На втором изображении -

графический, текстовый, или тексто-графический рекламный слоган. Отдельно, в виде третьего изображения, или в виде части второго изображения, для наблюдателя формируется плоское ортоскопическое изображение, вынесенное перед голограммой.

Основой рекламного эффекта указанного изделия является привлекательность мнимого объема, выполненного на заведомо плоской поверхности. Наблюдатель видит противоречие. Его органы чувств дают ему противоречивую информацию. Осязание подсказывает, что наблюдаемого объекта нет, а зрение дает информацию о том, что объект есть. Это типичная психологическая дилемма «преграда и проход» или «польза или вред» [3]. В случае предлагаемого устройства внимание наблюдателя приковывает противоречие возникающее при наблюдении глубокого объемного изображения фирменного знака, которое возникает на плоской поверхности голографического носителя. Плоскостность голографического носителя подчеркивается наличием на его поверхности отражающих свет плоских изображений, в частности, текстовых, графических или тексто-графических рекламных слоганов. Указанное противоречие усиливается присутствием изображения, вынесенного вперед относительно поверхности голографического носителя. Наблюдатель испытывает рефлекторную тягу изучить и понять видимое противоречие. В нем срабатывает один из самых сильных инстинктов - инстинкт самосохранения, когда он видит реальный объект (в т.ч. висящий в воздухе, перед голограммой), осознает возможность столкновения с ним, но оно не наступает. Завершение локомоторного акта вступает в противоречие с жизненным опытом.

Таким образом, на уровне воздействия на основные инстинкты привлекается внимание наблюдателя к рекламируемому объекту, и достигается сильный рекламный эффект.

Технически реализация указанной адресной рекламы требует голограмм, обеспечивающих высокую дифракционную эффективность и, одновременно, высокую повторяемость записи. Для этого в качестве базового процесса была выбрана технология записи голограмм на БХЖ [4]. В качестве нововведения, обеспечивающего стабильную повторяемость результатов записи и обработки была использована 4⁰-я добавка формальдегида в первую спиртовую ванну.

Одновременно, для обеспечения доступности восстановления рекламного изображения при его восстановлении под воздействием неспециализированных источников света с большими угловыми размерами, например, под воздействием света люминесцентных ламп, глубина изображения записанного на голограмму рекламного изображения должна быть не больше, чем величина h , определяемая следующим выражением:

$$h = 0.5 \cdot \Delta x / \operatorname{tg}(\alpha / 2), \quad (1)$$

где Δx - минимальный разрешимый размер изображения,
 α -угловой размер источника излучения.

Минимальный разрешимый размер восстанавливаемого изображения для наибольшей глубины объекта в большинстве практических случаев должен быть равным величине порядка 1 мм. При восстановлении изображения с

голограммы источником с наибольшим угловым размером, равным 11° , что соответствует люминесцентной лампе длиной 1 м, установленной на расстоянии 5 м, наибольшая глубина объекта, рассчитанная по формуле (1), составляет величину, приближенно равную 5 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. США № 4,429,947, МКИG03H 1/22, G02B 27/2. Reflection mount for transmission holograms / Benton S.A. (Аналог).
2. Пат. РФ № 2052209, МКИG03H1/22, В44С5/04. Декоративное устройство для показа голограмм / Зайцев А.Д., Лазарец В.Ф., Барабаш Н.А. – № 4941208/12; заявл. 30.09.91; опубл. 10.01.96
3. Гиббсон, Дж. Когнитивная психология/Дж. Гиббсон. – М.: Наука, 1977. – 325с.
4. Пластинки высокоразрешающие для голографии ПФГ-04, ТУ 6-43-1426-87, 34 с.

© С.А. Шойдин, В.Ю. Кондаков, 2008

УДК 621.383:623

Ю.А. Синицын, В.В. Малинин, Г.Н. Попов

СГГА, ЦКБ «Точприбор», Новосибирск

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ (НАБЛЮДЕНИЯ) НА ПРИМЕРЕ ИЗДЕЛИЙ ЦКБ «ТОЧПРИБОР»

Yu.A. Sinitsyn, V.V. Malinin, G.N. Popov

Siberian State Geodetic Academy (SSGA)

10 Plakhotny St., Novosibirsk, 630108, RF

HISTORY OF THE NIGHT VISION (SUPERVISION) DEVICES CREATION BY EXAMPLE OF THE CENTRAL DESIGN BUREAU «TOCHPRIBOR» PRODUCTS

Annotation. Principles of ordering are given and the history of development of devices for night supervision is chronologically stated.

Принципы систематизации приборов ночного видения (наблюдения)

Задачи, решаемые с помощью приборов:

- Разведка – поиск и определение координат цели;
- Скрытное наблюдение – определение перемещения цели в пространстве;
- Сопровождение спецгрузов при перевозке в ночное время;
- Вождение бронетанковой техники (БТТ);
- Обеспечение скрытности войсковых операций;
- Командирское управление.

Физические принципы действия:

- Пассивное электронно-оптическое преобразование;
- Активно-импульсное электронно-оптическое преобразование;
- Низкоуровневое телевидение;
- Тепловидение;
- Комбинация перечисленных принципов действия.

Виды назначения:

- Приборы наблюдения командира противотанкового орудия;
- Приборы наблюдения командира БТТ;
- Приборы наблюдения механика-водителя БТТ;
- Приборы наблюдения оператора-разведчика БТТ.

Виды конструктивного оформления:

- Очки ночного видения,
- Монокуляры ночного видения,
- Бинокли ночного видения;
- Перископические ПНВ;
- Специальные ПНВ для БТТ.

История развития приборов ночного видения

В **1957** г. в конструкторском отделе 40 НПЗ (ныне ФГУП «ЦКБ «Точприбор»)) были разработаны ночные прицелы с ИК подсветкой:

- «Старт» для АК-74;
- «Старт-1» для ПКМ;
- ПВРК - панорамный прибор наблюдения для подводного вождения машины поиска переправы;
- АПНБ (1ПН17) – артиллерийский прицел ночной.

Прицел 1ПН17 является первым ПНВ, успешно прошедшим испытания генерального заказчика. Он был разработан на основе охлаждаемого трехкамерного ЭОП типа ЗЭП72У. Холодильник к нему изготавливался в г. Рига.

Первые ночные приборы применялись, в основном, как наблюдательные. В них применялись однокамерные ЭОП первого поколения с низкой чувствительностью. Такие приборы требовали дополнительной подсветки местности для работы в условиях низкой естественной ночной освещенности.

В **1958** г. прицел 1ПН17 был модернизирован: холодильник стал термоэлектрическим, а окуляр был заменен биолупой. Модернизированному прибору был присвоен индекс АПН4.

В **1960 .. 1964** гг. в рамках ОКР «Калина» был разработан артиллерийский прицел ночной АПН5 (1ПН21А) на базе неохлаждаемого ЭОП. С тех пор во всех ПНВ стали применять ЭОП с мультищелочными фотокатодами.

До конца 1960-х годов была разработана гамма ПНВ. Среди них очень удачной разработкой признан первый пассивный дневно-ночной прибор наблюдения НПП-1 (1ПН29), разработанный в период **1964..1971** в рамках ОКР «ВАЛ». Дневная и ночная ветви прибора были объединены бинокулярной системой и обеспечивали круглосуточное наблюдение комплекса ПРП-3 (см. таблицу).

Прибор имел большие габариты и массу даже относительно бронемашин. Однако громоздкость первых ПНВ определялась не только размерами самого ЭОП, но и необходимостью обеспечивать его герметичность и электроизоляцию от высокого питающего напряжения (до 36 кВ). Эта проблема была решена в герметизированном ЭОП типа У51МГ, который был применен в ОКР «Тополь-65». В рамках этих ОКР в период **1965 .. 1972** годов был разработан ПНВ 1ПН32 или ННП-21, который превосходил по тактико-техническим параметрам все отечественные и зарубежные приборы подобного вида.

Электронной промышленностью были разработаны ЭОП типов ЭП10 (ОКР «Канал») и ЭП16 (ОКР «Шторка»). ЭОП типа ЭП16 был трехмодульным двухкаскадным с применением ВОП в герметичном корпусе и со встроенным умножителем высоковольтного напряжения. Он позволил значительно уменьшить краевую абберацию и поднять увеличение до $1,25^x$. В ЭОП типа ЭП10 впервые была применена микроканальная пластина (МКП). Эти два типа ЭОП были использованы в ряде ОКР («Казуар», «Позумент», «Фурьер», «Резчик») в период **1975 .. 1981** гг. В рамках этих ОКР впервые для ПНВ были разработаны зеркально-линзовые объективы с участием ГОИ им. С.И. Вавилова. Это потребовало специальной технологической подготовки и оснащения производства.

В **1981** г. в рамках ОКР «Резчик» был разработан прибор дальнего наблюдения 1ПН54 (ННП-23), который заменил ранее разработанный прибор 1ПН32 (ННП-21).

ЭОП типа ЭП16 по своим оптическим и светотехническим параметрам оказался очень удобным для применения в приборах дальнего наблюдения. После добавления к нему затвора (исполнение ЭП16-1) в **1984** г. был разработан первый активно-импульсный прибор разведки 1ПН61 для ПРП с большой дальностью действия. Затем была разработана модернизированная версия 1ПН61М (**1984..1991**).

В 1980-х годах усилия разработчиков были направлены на совершенствование тактико-технических параметров ПНВ в рамках ОКР «Невидимка» (**1984..1992**) и ОКР «Козерог» (**1984..1989**). В рамках ОКР «Ларец» были изготовлены первые образцы ЭОП третьего поколения. В рамках ОКР «Козерог» был разработан ПНВ 1ПН70, который по дальности распознавания в 1,3 превышал возможности 1ПН54 и в 2,0 раза превышал возможности 1ПН32.

В обеспечение перспективных ОКР был проведен ряд НИР: «Радуга», «Окунь», «Агарец», «Марс», «Штурм», «Амарант», «Модельер», «Барельеф», «Задание-1», «Плавик-1», «Светолечение», «Куприт». При этом были исследованы следующие проблемы:

- Новые физические принципы формирования, обработки и передачи на расстояние изображений;
- Помехоустойчивость изображения;
- Комплексирование и совмещение изображений в едином поле;
- Низкоуровневое телевидение в условиях плохой видимости;
- Формирование цветного изображения в ПНВ;
- Обнаружение удаленных и замаскированных оптико-электронных средств;
- Постановка световых помех.

Для контроля параметров ЭОП и ПНВ были разработаны специальные контрольно-юстировочные комплексы: УКП, УИЗ, 1Ю6, 1Ю7-1, 1Ю7-2, ЮЮ10, 10ЮЮМ, 1И23, Квинта, Септима, УКП-2, КМВ. Сложность этих комплексов превышала сложность разработки проверяемых ПНВ.

В первой половине 1990-х годов увеличилось отставание отечественного ночного приборостроения от зарубежного по техническому уровню. Усилия специалистов ЦКБ «Точприбор» при участии сотрудников других сибирских предприятий и НИИ были направлены на разработку ЭОП поколений 2 и 2+, а также серии приборов на их основе. В том числе были разработаны приборы наблюдения 1ПН91-2 и 1ПН92-2. Работы по созданию ПНВ с ЭОП поколений 2 и 2+ были удостоены премии Правительства РФ 2001 года в области науки и техники.

Особым направлением среди приборов наблюдения являются ***приборы наблюдения для БТТ***:

- Приборы командира: ТКН-З (1973 г.), ТКН-ЗМ (1975 г.), ТКН-ЗМК (1998 г.), ТКН-АИ (2007 г.), ТКН-1СМ (2008 г.);
- Приборы механика-водителя: ТВК-1 (2005 г.), ТВК-2 (2003 г.), ТВК-3 (2003 г.).

© Ю.А. Синицын, В.В. Малинин, Г.Н. Попов, 2008

УДК 621.383:623

И.Б. Южик, В.В. Малинин, Г.Н. Попов
СГГА, ЦКБ «Точприбор», Новосибирск

ПРИБОРЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

I.B. Yuzhyk, V.V. Malinin, G.N. Popov
Siberian State Geodetic Academy (SSGA)
10 Plakhotny St., Novosibirsk, 630108, RF

DEVICES FOR DETECTION AND SUPPRESSION OF THE OPTICAL AND ELECTRO-OPTICAL MEANS

Annotation. Definitions of terms of оптико-electronic struggle are given, and also principles of construction of devices of detection and suppression of оптико-electronic means are described.

Термины оптико-электронной борьбы

Оптико-электронная борьба: совокупность организационно-технических мер, направленных на выявление оптических устройств противника и их подавление в интересах обеспечения успешных боевых действий своих подразделений.

Объекты оптико-электронной борьбы:

- Штатные оптические средства наблюдения и разведки: монокуляры, бинокли, стереотрубы и др.;
- Оптические прицелы стрелкового оружия;
- Снайперские прицелы;
- Оптические и электронно-оптические прицелы установок ПТУР, тяжелых пулеметов и ПЗРК;
- Оптические приборы и прицелы бронетехники;
- Оптические приборы и прицелы комплексов дальнометрирования и целеуказания;
- Тепловизионные устройства всех типов, отдельные, или входящие в состав комплексов;
- Оптические и электронно-оптические элементы систем управления навигацией вооружением вертолетов и беспилотных летательных аппаратов.

Неотъемлемой частью оптико–электронной борьбы является превентивное обнаружение оптических устройств противника, определение их координат и уничтожение.

ПНВ обладают высокой чувствительностью и могут работать в пассивном режиме до освещенностей порядка $10^{-3}..10^{-4}$ лк.

Пассивные ПНВ обладают рядом недостатков:

- Отсутствие возможности определения дистанции до объекта, что усугубляется эффектом маскировки целей при наблюдении плоского изображения на выходе ЭОП;
- Ограничение точного прицеливания стрелкового оружия в ночное время.

Принципы построения активной системы обнаружения и подавления ОЭС

В *активных ПНВ* используется лазерная подсветка. При облучении оптических и оптико-электронных средств лазерным излучением, соответствующим рабочему спектральному диапазону ОЭС, возникает *эффект световозвращения*, который проявляется в том, что независимо от угла подсветки ОЭС зондирующим излучением отраженное излучение распространяется в направлении, близком к направлению его падения. Само ОЭС является при этом световозвращателем. Такой характер отражения связан с автоколлимационным ходом лучей в типичной оптической схеме ОЭС, в фокальной плоскости которого находится, как правило, какой-либо отражающий элемент (прицельная сетка, фотокатод ЭОП, фотоприемник и т.д.). В результате, после прохождения выходного зрачка ОЭС формируется индикатриса отраженного излучения, угловые размеры которой не превышают несколько мрад, а форма определяется конструкцией оптической системы и ее аберрационными характеристиками.

Эффект световозвращения проявляется практически всегда при засветке входного зрачка ОЭС лазерным излучением в соответствующем диапазоне длин волн, однако характер его проявления весьма специфичен и зависит от свойств ОЭС. Так, интенсивность отраженного излучения при равной освещенности входного зрачка может меняться для различных ОЭС на 5..6 порядков. В то же время и для конкретного ОЭС интенсивность отраженного излучения значительно изменяется при изменении длины волны зондирующего излучения.

Для сравнительной оценки световозвращательной способности различных ОЭС используются следующие основные характеристики:

- **Показатель световозвращения (ПСВ):** отношение силы света отраженного излучения в выбранном направлении к освещенности входного зрачка ОЭС ($\text{м}^2/\text{стерад}$);
- **Индикатриса отражения:** совокупность ПСВ по всем направлениям составляет пространственную индикатрису отражения световозвращателя;
- **Пеленгационная характеристика световозвращения:** зависимость ПСВ от угла пеленга (угла между оптической осью ОЭС и направлением на источник зондирующего излучения).

Существует еще ряд отражательных характеристик (поляризационных, спектральных, пространственно-частотных и т.д.), определяющих способность ОЭС изменять состояние излучения подсветки.

В последнее время наблюдается тенденция к снижению бликующей способности ОЭС. За последние несколько лет минимальный уровень ПСВ отечественных ОЭС снизился практически на порядок от 5..10 м²/стерад до 0,5..1,0 м²/стерад. В одних случаях задача уменьшения ПСВ непосредственно стоит перед разработчиками, в других низкий уровень ПСВ обусловлен спецификой оптических характеристик самого прибора. Соответственно уменьшается дальность достоверного обнаружения ОЭС.

Частотно-импульсный режим подсветки синхронизирован с таким же режимом питания ЭОП типа "шторка" с электронным затвором.

Испытания и эксплуатация таких приборов показали его новые эксплуатационно-тактические возможности:

- Снижение влияния атмосферных помех за счет "отсечки" паразитных засветок путем открытия затвора ЭОП только в момент прихода сигнала, отраженного от цели;
- Возможность измерения дальности до наблюдаемого объекта путем калиброванного временного стробирования импульсов подсветки;
- Значительное увеличение дальности обнаружения объектов со световозвращающими элементами конструкции (оптические приборы).

Последующие исследования и разработки показали возможности дальнейшего расширения круга эксплуатационных задач путем комбинации различных частотных режимов работы ЭОП и осветителя.

Частотно-импульсный режим питания ЭОП с плавно изменяющейся скважностью дает возможность применения ПНВ в пассивном режиме при больших значениях освещенностей (до $5 \cdot 10^4$ лк) и, таким образом, перекрывать значительную часть дневного диапазона, что невозможно при обычном режиме. Регулировка скважности может осуществляться как вручную, так и автоматически – от датчика освещенности. Такой режим очень ценен при условиях, когда необходимо непрерывное наблюдение в условиях изменяющейся освещенности.

Режим импульсного питания ЭОП и осветителя обеспечивает возможность уверенного обнаружения ОЭС в дневных и ночных условиях по признаку "мерцания" объекта. При этом изображение с экрана ЭОП может быть выведено на телемонитор, либо на координатно-чувствительный фотоприемник для автоматического определения угловых координат обнаруженного ОЭС в момент "засечки".

Для учета баллистики оружия при стрельбе на расстояния больше дальности прямого выстрела необходимо измерение дальности до ОЭС и последующего введения поправок.

Ввиду того, что ЭОП в режиме обнаружения ОЭС работает аналогично активно-импульсному ночному прибору, измерение дальности до ОЭС проводится по моменту исчезновения блика, при движении строба, с дальнейшим выводом информации о дальности. Недостатком такой схемы (ручной) является большая длительность определения дальности и

последующего ввода угла прицеливания в прибор 10..15 с, что в условиях противоборства двух снайперов может иметь решающее значение.

На сегодняшний день основной задачей является автоматизация процесса измерения дальности с целью уменьшения времени измерения и ввода углов прицеливания до 1..3 с.

Особым преимуществом подобного способа является измерение дальности и корректировка угла прицеливания в автоматическом режиме.

Оптико-электронные обнаружители с использованием ЭОП позволяют эффективно обнаруживать замаскированные позиции ПТУР, бронетехнику, наблюдательные пункты, засады - словом, вести активную разведку оптических устройств противника и использовать, при необходимости, комплекс мер по их подавлению и выводу из строя. В настоящее время испытан прототип изделия, выявляющий оптические устройства уже на дальности более 2000 м.

Оптико-электронные обнаружители оптических систем могут легко сопрягаться с другими системами: акустическими, сейсмическими, радиолокационными, вертолетными и танковыми комплексами, а также могут служить базой для создания мощных антиснайперских и разведывательных стрелковых комплексов специального назначения, например, при объединении их с новыми крупнокалиберными винтовками.

Из истории разработки приборов обнаружения и подавления ОЭС

В ФГУП «ЦКБ «Точприбор» разработана серия приборов, например, 1ПН106, 1ПН120, 1ПН123, 1ПН121, 1ПН119, предназначенных для оптико-электронной борьбы.

В **2000 г.** была поставлена ОКР «Карьера» по созданию оптико-электронного обнаружителя оптических систем.

Изделие обеспечивает обнаружение ОЭС с отображением в поле зрения:

- Световой индикации положения ОЭС,
- Цифрового значения измеренной дальности до ОЭС,
- Точечной индикации количества обнаруженных ОЭС.

Продолжительность отображения в поле зрения цифрового значения измеренной дальности и точечной индикации количества ОЭС составляет 3..9 с с дальнейшим сбросом информации.

Точное наведение на цель сопровождается звуковой сигнализацией высокого тона в головных телефонах.

Дальность распознавания зависит от естественной освещенности, прозрачности атмосферы и контраста между целью и фоном.

Принцип действия изделия основан на лазерной локации местности и обработке возвращенного, отраженного от обнаруженного ОЭС, лазерного излучения.

Для обеспечения работы изделия в заданных условиях эксплуатации предусмотрены пять электронно-оптических каналов.

Отраженное от ОЭС излучение зондирующего канала поступает в приемный канал.

Сигналы от приемного канала поступают на блок обработки, который формирует сигналы световой индикации и звуковой сигнализации.

Недостатки обнаружителя оптических систем:

- Много оптических каналов;
- Узкое поле обнаружения;
- Большие габариты и масса;
- Визуализация ОС производится косвенно.

В рамках темы «Магнус» в **2001 г.** была поставлена ОКР по созданию целого ряда оптико-электронных обнаружителей, с использованием электронно-оптических преобразователей.

Излучение лазера направляется через формирующую оптическую систему на цель. При подсветке лазерным излучением оптических и оптико-электронных средств противника часть энергии подсветки отражается от этих средств, возвращаясь в сторону излучателя и регистрируется приемной системой.

В качестве приемника излучения используется ЭОП третьего поколения, работающий в импульсном режиме. Применение в качестве источника подсветки импульсного излучателя и синхронизированного с ним импульсного ЭОП позволяет осуществить отсечку большей части помех. Использование одновременно импульсного стробирования и узкополосной спектральной фильтрации значительно ослабляет уровень помехи от солнечной засветки, расширяя тем самым световой диапазон работы системы.

Для защиты ЭОП от световых перегрузок выше 1,5 лк и для выверки прицела днем или в сумерки в приборе имеется автоматическая электронная защита.

Электропитание прибора производится от малогабаритных аккумуляторов НЛЦ-09 напряжением 1,15 В.

Достоинства обнаружителя ОЭС:

- Малое число оптических каналов;
- Минимальное энергопотребление;
- Малая масса;
- Малые габариты;
- Низкая стоимость;
- Изделие обеспечивает обнаружение ОЭС, имеющих ПСВ менее 20 м²/ср днем и ночью с отображением в поле зрения ОС и информации о дальности.

© И.Б. Южик, В.В. Малинин, Г.Н. Попов, 2008

УДК 620:191.33:681.7.624.012

Н.Р. Рахимов, А.Н. Серьезнов, Б.Н. Рахимов

СГГА, СибНИА им. С.А. Чаплыгина, Новосибирск

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

N.R. Rakhimov, A.N. Seryoznov, B.N. Rakhimov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR MONITORING FOR COMPOSITE CONSTRUCTION THE STATES OF FLYING VEHICLES

The paper tells about the structure of the optical fiber, about the movement of light along the optical fiber and designing the optoelectronic system.

В настоящее время процесс контроля состояния композитных конструкций летательных аппаратов, работающих в условиях высоких нагрузок, основывается, главным образом, на регулярных визуальных технических осмотрах и личном опыте специалиста, проводящего осмотр. При проведении осмотра также могут применяться вспомогательные методы, например: ультразвуковое зондирование, рентгенография, акустическая эмиссия. Однако эти методы ориентированы на разные задачи контроля, являются довольно трудоемкими и требуют высокой квалификации персонала для интерпретации результатов измерений.

По причинам, указанным выше, в мире растет интерес к методам, которые позволяют осуществлять, постоянно или непрерывно, мониторинг целостности конструкции или, другими словами, - контроль “состояния” или “здоровья” механической конструкции или инженерного сооружения гражданского назначения [1], в процессе изготовления, установки и эксплуатации. В этой связи представляет значительный интерес возможность использования оптоволоконных датчиков [2] в качестве средства контроля, поскольку эти устройства являются совместимыми - операционной и механически – с композиционным материалом и функциональной спецификацией системы.

Сигнал, проходящий по оптическому волокну, в высшей степени нечувствителен к вредным электромагнитным воздействиям. Соответственно, отпадает необходимость применения дорогостоящего и громоздкого электромагнитного экранирования даже в тех местах, где имеются источники сильного электромагнитного излучения (например, в силовых установках). Оптические волокна имеют достаточно широкую полосу пропускания сигнала, что позволяет использовать их в большом количестве приложений. Они также могут одновременно выполнять функции датчика и проводника сигнала

измерений (оптоволоконные каналы передачи данных). Применяя метод мультиплексирования, можно размещать несколько датчиков в одном оптическом волокне.

На практике задача мониторинга механического поведения конструкции или силового элемента влечет за собой необходимость непрерывного наблюдения отдельных или всех её (его, элемента) свойств. Этот процесс может включать поиск возможных повреждений или измерение механических, физических или химических характеристик материала - таких, как деформация, давление, вибрация, температура, коррозия, влажность и др.

Экспериментальные работы по разработке систем мониторинга макрообъектов с применением волоконно-оптических датчиков были разбиты на следующие циклы испытаний:

- Испытания оптоэлектронной системы с применением волоконно-оптических датчиков для контроля усилия (давления).
- Испытания волоконно-оптического световода на поперечные нагрузки в плоскости.
- Испытания волоконно-оптического датчика деформаций на базе многомодового и одномодового волоконно-оптического световода.
- Испытания волоконно-оптического датчика предразрушения.
- Испытания оптоэлектронной системы для определения предразрушения конструкций летательных аппаратов с помощью волоконных световодов.

С точки зрения контролируемых параметров экспериментальные исследования были направлены на создание систем, позволяющих контролировать следующие параметры объекта:

- Деформации (растяжение, сжатие);
- Перемещения;
- Трещинообразование;
- Предразрушения.

На данный момент в арсенале лаборатории ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» присутствуют волоконно-оптический датчик деформаций амплитудного типа, датчик предразрушений а также волоконно-оптический датчик влажности.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования механических характеристик оптоволокна, с целью использования его в качестве чувствительного элемента датчика для обнаружения, регистрации зарождения и распространения усталостных трещин элементов композитных конструкций летательных аппаратов

В основном исследованы кварцевые волокна, уровень затухания в которых при длине волны 0,85 мкм составляет 3 дБ/км.

Также, исследовались полимерные волокна. Они имеют малый удельный вес, большую гибкость при относительно большом диаметре, механическую

прочность, высокую технологичность. Достигнутое минимальное затухание при длине волны 0,66 мкм – 20 дБ/км [3].

Задачей исследования является повышение достоверности и обеспечение возможности определения скорости распространения трещины в композитных конструкциях летательных аппаратов.

Поставленная задача решается [4] использованием полимерного световода, намотанного в виде катушки (соленоида), намотанной на многоугольную твердую основу и жестко приклеенной к поверхности перпендикулярно ожидаемому направлению распространения трещины. При раскрытии трещины сила натяжения, действующая на виток оптоволоконной катушки, деформирует его, вызывая изменение изгибных потерь проходящего света. Изменение сигнала фиксируется оптическим тестером.

Поставленная задача решается использованием полимерного световода, намотанного в виде катушки (рис. 1), намотанной на многоугольную твердую основу и жестко приклеенной к поверхности перпендикулярно ожидаемому направлению распространения трещины, как указано в рис. 1 (1) со следующими условными обозначениями: 1 – испытываемая конструкция, к которой появилась трещина, 2 – катушка, намотанной на треугольную твердую основу, 3 – намотанный полимерный световод, 4 – место закрепления световода, 5 – светоизлучающий диод (СИД), 6 – Оптический тестер.

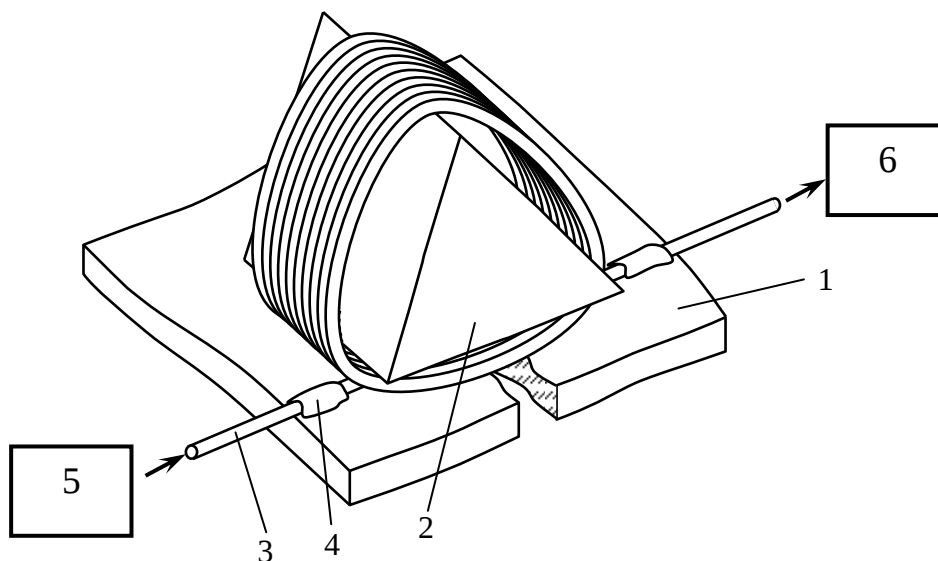


Рис. 1. Световод в виде катушки намотанной на многоугольную твердую основу и жестко приклеенной к поверхности перпендикулярно ожидаемому направлению распространения трещины

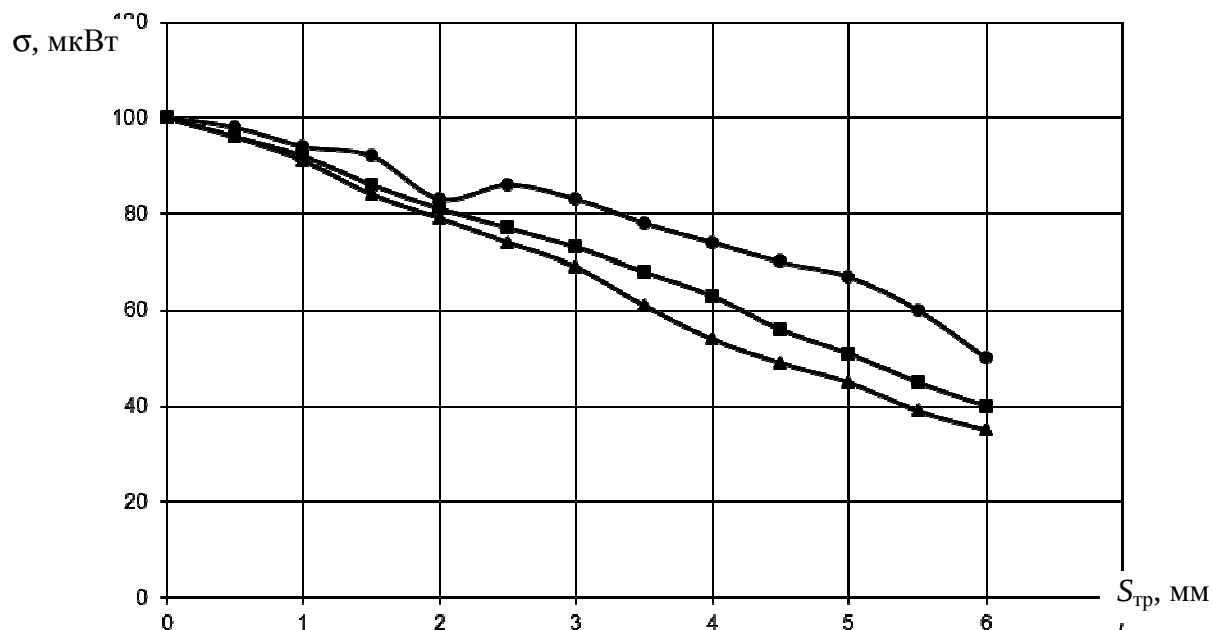


Рис. 2. Зависимость мощности излучения от прямого развития трещин:

◆ – в треугольных; ■ – четырехугольных; ▲ – пятиугольных основах витки

На основе обсуждения, приведенного выше, должно быть понятно, что (инструментальный) контроль состояния должен стать ключевой компонентой процесса проектирования конструкции любого назначения. Главный выигрыш от внедрения систем реального времени для контроля (мониторинга) состояния конструкций можно кратко сформулировать как улучшение эффективности, снижение затрат и повышение безопасности эксплуатации конструкций.

Успешное внедрение методов контроля (мониторинга) применительно к композитным конструкциям поможет созданию нового поколения воздушных судов, которые будут более безопасными, более легкими, более эффективными и более приспособленными к техническому обслуживанию и летной эксплуатации.

В области космической техники это позволит создавать космические платформы, которые будут самостоятельно осуществлять контроль на наличие утечек избыточного давления воздуха, нежелательных вибраций, ненормального роста температурных отклонений и отклонений от заданной геометрической формы. В области ветроэнергетики это позволит проектировать лопасти ветряных турбин, имеющих меньший вес, большие размеры и более высокий к.п.д. Таким образом, новые методы позволят устранить чрезмерные инженерные допуски при проектировании и одновременно повысить экономическую ценность конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. J. Dakin, and B. Culshaw, "Оптоволоконные датчики: применение, анализ и тенденции развития", Vol. 4, Artech House, 1997.

2. R.M. Measures, “Мониторинг состояния конструкций с помощью оптоволоконной технологии”, Academic Press, 2001.

3. Рахимов Н.Р. Применение оптического волокна в системе оценки усталостной повреждаемости элементов конструкций / Изв. вузов. Приборостроение, 2005. Т. 48, № 1. – С. 39–43.

4. Пат. 28(034466) РФ. Способ определения мест предразрушения конструкций / Рахимов Н.Р., Серьезнов А.Н. Оpubл. 20.10.2003 г.

© Н.Р. Рахимов, А.Н. Серьезнов, Б.Н. Рахимов, 2008

УДК 681.586.5:621.384.3

Н.Р. Рахимов, А.А. Лохов

СГГА, Новосибирск

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СРЕД

N.R. Rakhimov, A.A. Lokhov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

MULTIFUNCTIONAL OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR EXPRESS- ANALYSIS OF OILY CONTAIN MEDIUM

In this work the solution of physical, technical and technological tasks to create a new multifunctional test-system on a base of semi conductive optrone of an open channel.

Современный уровень развития нефтяной промышленности требует применения высокочувствительных методов экспресс-анализа. Для этого на наш взгляд весьма перспективным представляется использование метода спектрометрии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) для решения проблемы автоматического анализа структурно-группового состава нефти и нефтесодержащих сред путем измерения их оптических характеристик (показателей преломления n и поглощения χ) в области характеристических полос поглощения [1].

Известные к настоящему времени наиболее перспективные оптические однофункциональные методы [1-4] и средства анализа не обеспечивают высокую точность измерения из-за широкой области спектра поглощения от иных веществ, присутствующих в нефтесодержащих средах.

В однофункциональных оптоэлектронных контрольно-измерительных системах процесс преобразования измеряемой величины x_1 в информативный параметр электрического сигнала теоретически должен описываться как

$$Y = F(x_1) \quad (1)$$

А в практических случаях этот сигнал имеет вид

$$Y = f(x_1, y_1, y_2 \dots y_k) \quad (2)$$

где y_1, y_2, y_k – ряд изменяющихся физических величин, изменения которых существенно влияют на величину Y .

Введение коррекции по одному из y , например, y_j требует использования второго преобразования, описываемого как [2]

$$Y_j = f_j(y_i) \quad (3)$$

Исходя из этого, для извлечения из многомерного сигнала, описываемого выражением (2), информации о величине x необходимо получить сигналы описываемые уравнением (3), что очень трудно осуществить на практике.

Многофункциональные оптоэлектронные методы позволяют определять физико-химические величины за счет использования набора многомерных сигналов, т.е. зависящих от многих x_i , расширяют возможности оптоэлектронного метода измерения неэлектрических величин. Метод основан на том, что если на основе специального элемента НПВО (в наших случаях полуцилиндрического) можно получить n многомерных сигналов, информативные параметры которых зависят от n физических величин таким образом, что описывающие эти зависимости уравнения образуют систему n независимых уравнений:

$$\begin{aligned} Y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ Y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ Y_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (4)$$

то в целом ряде случаев оказывается возможным с помощью значений информативных параметров $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ определять значения отдельных или всех n физико-химических величин x_i , поддающихся оптическому контролю.

Определяемые параметры $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, называемые первичными сигналами, измеряются последовательно один за другим, запоминаются и лишь затем применяется спектр измерений для определения параметров x_i , или все они измеряются одновременно и совместно используются для формирования выходных сигналов, пропорциональных подлежащим измерению x_i .

Использование многофункциональных систем с применением НПВО определяющих одновременно несколько параметров, даёт возможность одновременно контролировать как физико-химические показатели (в том числе их изменение во времени, т.е. их динамическое состояние), так и физические процессы, сопровождаемые одновременным и неодновременным изменением во времени ряд физико-химических величин. Кроме того, применение многофункциональных оптоэлектронных систем не только повышает информативность измерений, но и позволяет уменьшить погрешности от влияния внешних факторов, как температура, влажность и уровень вибрации могут учитываться при автоматической коррекции погрешностей.

В данной работе на основе использования эффекта НПВО[5], взаимодействующих с контролируемой средой, рассматриваются вопросы разработки нового принципа построения оптоэлектронных систем для мониторинга нефтесодержащих сред. Предлагаемая идея состоит в одновременном применении n источников излучения и установленные по ходу излучения элемента НПВО, в виде цилиндра и n измерительных приемников оптического излучения (ПОИ), компенсационной (опорной) ПОИ, оптически связанный непосредственно с опорным источником излучения.

Приборы на основе элемента НПВО могут непосредственно интегрироваться в исследуемый процесс [1], практически не воздействуя на него, т.е. исключается возможное искажение.

Определение наличия эмульсионной воды косвенными методами сопровождается погрешностью до 5% даже при больших величинах, и кроме того, при микроскопическом анализе эмульсий нельзя избежать ошибок, вследствие испарения жидкости в тонком слое, а также деформации частиц.

Предлагаемая авторами оптоэлектронная система [3] для одновременного определения содержания эмульсионной воды, серы, парафина и т.п. в нефти и нефтепродуктах (рис. 1) включает цилиндр 1 с полостью в виде прямоугольного паза 2, проходящей через его центр, задающий генератор (источник импульсного питания) 17, триггер 18 со счетным входом, излучающие диоды 3-8 и компенсационный СИД 15, измерительные 9-14 и компенсационный 16 ФОИ, сумматор 19, блок обработки фотоэлектрического сигнала 20 и регистрирующий прибор или ЭВМ 21.

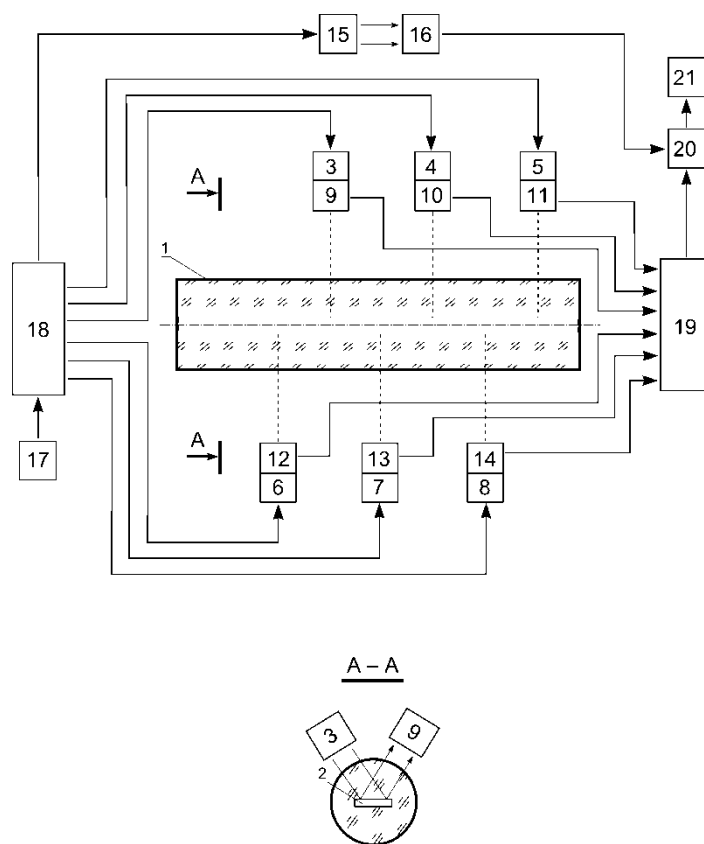


Рис.1. Блок-схема multifunctionальной оптоэлектронной системы

Система работает следующим образом. При включении задающего генератора 17 вырабатываемые им прямоугольные импульсы с частотой 8-10 кГц подаются на вход триггера 18. Разделенные импульсы поступают на СИД 3-8 измерительных каналов и СИД 15 опорного канала. Поток излучения светоизлучающих диодов фокусируется на измерительных поверхностях и подается на фотоприемники 9-14. Далее сигналы с фотоприемников суммируются в сумматоре 19. Излучение компенсационного светоизлучающего диода через световод попадает на компенсационный фотоприемник 16. Затем сигнал с компенсационного фотоприемника поступает в блок обработки

фотоэлектрического сигнала 20, где измеряется отношение компенсационного и измерительного сигналов. Сигнал отношения, пропорциональный содержанию одного параметра, например, эмульсионной воды, подается на регистрирующий прибор или ЭВМ 21, по показанию которого судят о содержании воды в контролируемой среде.

Недостатком известных датчиков является наличие погрешностей, обусловленных неравномерностью распределения влаги в объеме исследуемой жидкости. Предлагаемое устройство повышает точность за счет многократного объемного измерения, суммирования и осреднения фотоэлектрического сигнала. Кроме этого, с его помощью можно определить содержание нефтепродуктов в эмульсионной воде.

Применение ЭВМ в построении оптоэлектронных многофункциональных автоматических контрольно-измерительных систем (ОМАКИС) для решения конкретных задач анализа состава и свойств нефтесодержащих сред является этапом дальнейшего более совершенного развития структуры оптических приборов.

ЭВМ обеспечивают выполнение аналого-цифровых измерительных преобразований, вычислительных процедур, выдачу полученной информации, формирование командной и другой служебной информации, необходимой для функционирования ОМАКИС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов Н.Р. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве // Фергана, «Техника», 2004. – 91 с.
2. Мухитдинов М., Мусаев Э.С. Оптические методы и устройства контроля влажности. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
3. Рахимов Н.Р., Сайдахмедов Ш.М. и др. Оптический метод определения содержания воды в нефтепродуктах. Узбекский журнал нефти и газа, 2001 г., № 1. – С. 40–42.
4. Рахимов Н.Р. Оптоэлектронное устройство на основе элемента НПВО для определения содержания серы в нефти и нефтепродуктах. Узбекский журнал нефти и газа № 2, 2004. – С. 40–41.
5. Харрик Н. Дж. Спектроскопия внутреннего отражения. – М.: Недра. – 305 с.
6. Абдуллаев А.А и др. Контроль в процессах транспорта и хранения нефтепродуктов. – М., Недра, 1990. – С. 194–195.

© Н.Р. Рахимов, А.А. Лохов, 2008

УДК 535.4

Л.В. Тымкул, И.В. Валиахметов

СГГА, Новосибирск

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ И НЕПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

L.V. Tymkul, I.R. Valiakhmetov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

COMPUTER SIMULATION OF NIGHT-VISION DEVICES OPERATION IN POLARIZED AND NON-POLARIZED LIGHT

The work deals with methods, algorithm, and the structure of computer simulation of night-vision devices (passive type) operation in polarized and non-polarized light.

Интерес к анализу возможностей и моделированию работы поляризационных приборов ночного видения (ПНВ) вызван, в основном, двумя факторами, которые сформулированы в работе [1]. Согласно этой работе, первый фактор связан с возможностью повышения наблюдаемого контраста в поляризованном свете за счет подавления поляризационным фильтром уровня излучения фона. Это позволяет увеличить дальность действия и распознавания ПНВ. Однако, имеет место и другой, противоположный фактор, который заключается в потере энергии оптического излучения при прохождении через поляризационный фильтр в виде линейных поляризаторов и фазовых пластинок. Этот фактор может привести к уменьшению дальности действия и распознавания. Очевидно, что сопоставление этих двух противоположных факторов и формирует суммарный положительный или отрицательный эффект функционирования поляризационных ПНВ.

В основу компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в произвольно поляризованном свете заложены теория и математические модели работы этих приборов в поляризованном и неполяризованном свете [1-3].

Согласно этим работам, математические модели работы ПНВ пассивного типа содержат следующие информационные соотношения:

- Выражения для модуля пространственно-частотного спектра (ПЧС) яркости изображения объекта $L_o(\nu, \mu)$ и фона $L_\phi(\nu, \mu)$ на экране ПНВ в произвольно поляризованном свете;

- Выражения для модуля ПЧС абсолютного $\Delta L(\nu, \mu)$ и относительного $K(\nu, \mu)$ контрастов в изображении объектов на экране ПНВ в произвольно поляризованном свете;

- Составляющие модуля ПЧС яркости изображения объекта, формирующегося за счет подсветки излучением неба $L_{он}(\nu, \mu)$ и Луны $L_{ол}(\nu, \mu)$;
- Составляющие модуля ПЧС яркости изображения фона, формирующегося за счет подсветки излучением неба $L_{фн}(\nu, \mu)$ и Луны $L_{фл}(\nu, \mu)$;
- Выражение для модуля ПЧС яркости рассеянного излучения слоя атмосферы $L_c(\nu, \mu)$ между объектом и прибором;
- Выражения для частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) оптической системы ПНВ $h_o(\nu, \mu)$ и электронно-оптического преобразователя (ЭОП) $h_э(\nu, \mu)$;
- Выражение для модуля ПЧС яркости темнового свечения экрана $L_э(\nu, \mu)$ как внутренней помехи;
- Выражения, связывающие пространственные частоты ν и μ разрешаемых элементов в пространстве изображений по координатам x и y с критическими размерами объекта a_x и a_y , фокусным расстоянием объектива ПНВ f' , линейным увеличением ЭОПа $V_э$, дальностью решения поставленной задачи l и числом периодов N_p пространственной миры, разрешаемых вдоль критического размера объекта.

На основе работ [1-3] указанные соотношения в математических моделях имеют следующий вид:

$$L_o(\nu, \mu) = \left\{ \left[L_{он}(\nu, \mu) + L_{ол}(\nu, \mu) \right] \cdot \left[1 + P_o \cos 2(t_o - \alpha) \right] + \right. \\ \left. + L_c(\nu, \mu) \cdot \left[1 + P_\phi \cos 2(t_\phi - \alpha) \right] \right\} \cdot \tau_n \cdot h_o(\nu, \mu) \times \\ \times h_э(\nu, \mu) + L_э(\nu, \mu); \quad (1)$$

$$L_\phi(\nu, \mu) = \left\{ \left[L_{фн}(\nu, \mu) + L_{фл}(\nu, \mu) \right] \cdot \left[1 + P_\phi \cos 2(t_\phi - \alpha) \right] + \right. \\ \left. + L_c(\nu, \mu) \cdot \left[1 + P_\phi \cos 2(t_\phi - \alpha) \right] \right\} \cdot \tau_n \cdot h_o(\nu, \mu) \times \\ \times h_э(\nu, \mu) + L_э(\nu, \mu); \quad (2)$$

$$\Delta L(\nu, \mu) = \left| L_o(\nu, \mu) - L_\phi(\nu, \mu) \right|; \quad (3)$$

$$K(\nu, \mu) = \left| \left[L_o(\nu, \mu) - L_\phi(\nu, \mu) \right] / \left[L_o(\nu, \mu) + L_\phi(\nu, \mu) \right] \right|; \quad (4)$$

$$h_o(\nu, \mu) = e^{-2\delta_o^2(\nu^2 + \mu^2)} \quad (5)$$

$$h_\phi(\nu, \mu) = e^{-2\delta_\phi^2(\nu^2 + \mu^2)} \quad (6)$$

$$\nu = N_p \cdot l / a_x \cdot f' \cdot V \quad (7)$$

$$\mu = N_p \cdot l / a_y \cdot f' \cdot V \quad (8)$$

В выражениях (1) – (8), кроме указанных выше, приняты следующие обозначения:

(P_o, t_o) , (P_ϕ, t_ϕ) - степень и азимут поляризации излучения объекта и фона соответственно;

δ_o , δ_ϕ - диаметр пятна рассеяния объектива и ЭОПа ПНВ соответственно;

α - азимут поляризации линейного поляризатора, установленного перед объективом ПНВ;

τ_n - коэффициент пропускания поляризатора.

Алгоритм компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в поляризованном и неполяризованном свете содержит следующую структуру:

1. Ввод исходных данных для следующих информационных модулей:

1.1 Параметры ПНВ и его составных звеньев;

1.2 Условия естественного освещения и метеорологическое состояние атмосферы;

1.3 Параметры объектно-фоновой обстановки и условия наблюдения;

1.4 Поляризационные характеристики объекта и фона;

2. Формирование операторов расчета модулей ПЧС яркости изображения объекта и фона согласно соотношениям (1) и (2).

3. Представление соотношений (3) и (4) в виде:

$$\Delta L(\nu, \mu) = |L_o(\nu, \mu) - L_\phi(\nu, \mu)| \geq m \cdot L_\phi(\nu, \mu); \quad (9)$$

$$K(\nu, \mu) = \left| \frac{L_o(\nu, \mu) - L_\phi(\nu, \mu)}{L_o(\nu, \mu) + L_\phi(\nu, \mu)} \right| \geq K_n, \quad (10)$$

где m - отношение сигнал/шум в изображении объекта на экране ПНВ;

K_n - пороговый контраст глаза оператора-наблюдателя.

4. Формирование операторов расчета абсолютного $\Delta L(\nu, \mu)$ и относительного $K(\nu, \mu)$ контрастов на экране ПНВ при заданном числе периодов N_p .

5. Организация цикла по дальности l до выполнения условий:

$$\Delta L(\nu, \mu) = m \cdot L_\phi(\nu, \mu); \quad K(\nu, \mu) = K_n. \quad (11)$$

6. Выдача значения дальности решения поставленной задачи l_p , которое соответствует условию (11):

$$I_p = I(N_p) \Big|_{\Delta L(\nu, \mu) = m \cdot L_{\vartheta}(\nu, \mu); K(\nu, \mu) = K_n} \quad (12)$$

На основании указанного алгоритма была разработана программа моделирования работы ПНВ в среде Borland Delphi 7.

Для подтверждения достоверности предлагаемой методики компьютерного моделирования работы ПНВ в поляризованном и неполяризованном свете, в работе проведены исследования зависимости дальности обнаружения, распознавания и идентификации ПНВ МПН-8КМ от наблюдаемого контраста K_n , метеорологической дальности видимости S_m .

Получено, что дальность обнаружения, распознавания и идентификации в поляризованном свете больше, чем в неполяризованном приблизительно в полтора раза. При этом параметры поляризации отражения объекта и фона следующие: $P_o = 0,4$; $P_{\phi} = 0,5$; $t = 0$; $t_{\phi} = 90^\circ$. Коэффициент пропускания поляризатора $\tau_n = 0,85$; азимут поляризации линейного поляризатора $\alpha = 0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тымкул, Л. В. Математическая модель работы приборов ночного видения в поляризованном свете [Текст] // Сб. материалов III Междунар. науч. конгр. "ГЕО-Сибирь-2007", 25-27 апр. 2007 г., г. Новосибирск. Т.4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника Ч.2. / Л. В. Тымкул. – Новосибирск: СГГА, 2007 г. – С. 14-18.
2. Тымкул, Л. В. Оптико-математическая модель приборов ночного видения пассивного типа [Текст] // Сб.тез. докл. Междунар. конф. "Прикладная оптика–2000" / Л. В. Тымкул, В. М. Тымкул - СПб, 2000. – С. 216.
3. Тымкул, В. М. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета [Текст]: учеб.пособие / В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 215 с.

© Л.В. Тымкул, И.В. Валиахметов, 2008

УДК 681.586.5:621.384.3

О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, П.В. Петров

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

O.K. Ushakov, N.R. Rakhimov, P.V. Petrov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

DEVELOPMENT OF OPTOELECTRONIC MEASURE CONTROL SYSTEM OF OUTWARD TOTAL INSIDE REFLECTION EFFECT ON THEIR BASIS

In this work the optoelectronic test-systems on the base of semiconductive option of an open channel have been constructed and worked out for the first time. The systems on a base of optron of an open channel and DFIE elements were calculated.

Развитие системы автоматического управления производственными процессами характеризуется непрерывным совершенствованием ее элементной базы – первичных измерительных преобразователей (ПИП) и, в частности, оптоэлектронных ПИП.

В последнее время оптоэлектронные методы контроля с успехом применяются для количественного и качественного анализа веществ. Высокая точность и чувствительность, экономичность являются их преимуществами по сравнению с другими физико-техническими методами анализа.

Суть оптоэлектронного метода анализа состоит в том, что любое вещество отражает или поглощает, или излучает свет. При этом в зависимости от химического состава вещества и количественного соотношения составляющих его элементов изменяется интенсивность светопоглощения, угол отражения и другие характеристики взаимодействия светового излучения и вещества.

Оптоэлектронные ПИП автоматических устройств, используемые в нефтеперерабатывающей промышленности, должны контролировать основные технологические параметры, определяющие оптимальный ход технологического процесса, такие как влажность, оптическая плотность, цвет, содержание одного вещества в другом и др. характеристики, подвергающиеся оптическому контролю [1].

Нисколько не уступая другим физико-химическим методам в точности и удобстве определения оптических параметров метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) превосходит их в экспрессности, обеспечивая в то же время неразрушающий контроль.

В основе метода НПВО (рис. 1) лежит явление проникновения световой волны в оптически менее плотную среду n_2 , когда световой поток $\Phi_{0\lambda_1}$ распространяется из оптически более плотной среды n_1 в менее плотную n_2 под углом Θ .

Физический смысл заключается в следующем. Используются два световых потока с разными длинами волн, например, $\lambda_1 = 1,93$ мкм (измерительный) и $\lambda_2 = 1,7$ мкм (опорный), соответствующим максимальному и минимальному поглощению воды. Световой поток $\Phi_{0\lambda}$ распространяется из оптически плотной среды с показателем преломления n_1 , в менее плотную с n_2 под углом Θ , превышающим предельный (критический) угол полного внутреннего отражения Θ_k . Световой поток $\Phi_{0\lambda_1}$ частично проникает в среду n_2 ; на глубину порядка длины волны падающего излучения [2]:

$$d_p = \frac{\lambda_1}{2\pi(\sin^2 \Theta - n_{21})^{1/2}} \quad (1)$$

где λ_1 – длина волны излучения в оптически плотной среде с показателем преломления n_1 ; $n_{21} = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления. Если угол излучения равен или превышает критический $\Theta_k = \arcsin n_1/n_2$, то наблюдается полное внутреннее отражение (метод ПВО). Поскольку менее плотная среда с комплексным показателем преломления $\tilde{n} = n_2 - j\chi_2$ обладает поглощением, отражение не будет полным, т.е. условия для этого нарушаются и коэффициент отражения ($R = \Phi_{\lambda_1} / \Phi_{0\lambda_1}$) станет меньше 1. Степень ослабления R пропорциональна показателю поглощения. Таким образом, чем выше поглощение, тем сильнее нарушается отражение. Это называется эффект НПВО.

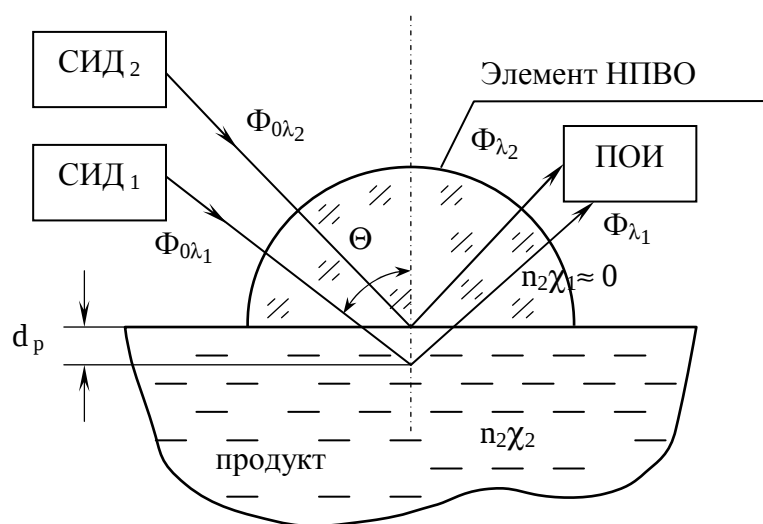


Рис. 1. Физические основы метода НПВО

В ИК-области спектра для достижения условия $n_1 > n_2$ используются измерительные элементы НПВО из высокопреломляющих оптических материалов, прозрачных в соответствующем диапазоне.

Нефть характеризуется значениями оптического поглощения $0,01 < \chi < 0,2$. Достичь условий, при которых ее оптическая плотность не выходила бы за пределы рабочего интервала, обеспечивающего удовлетворительную точность фотометрических измерений ($0,2 < D < 0,8$), можно путем изменения концентрации поглощающего вещества (например, его разбавление растворителем). Недостатком этого способа является возможность случайных погрешностей и нарушение структуры анализируемого вещества.

На основе применения эффекта НРВО авторами разработано устройство для мониторинга жидких сред. Блок-схема устройства приведена на рис. 2.

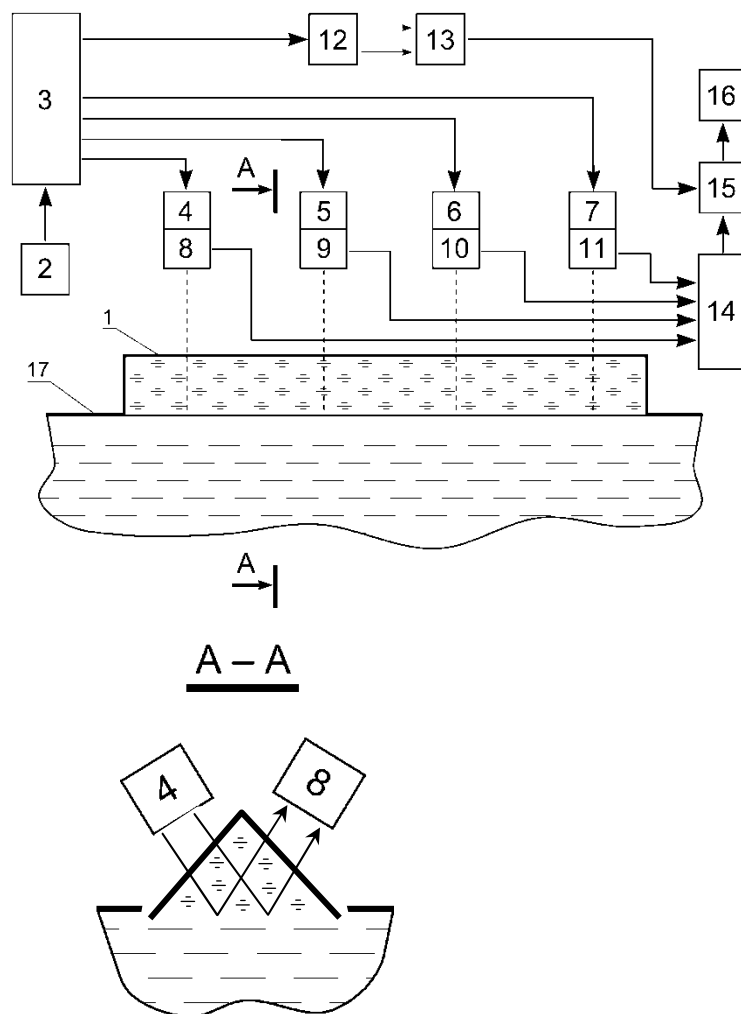


Рис. 2. Блок-схема оптоэлектронного устройства для мониторинга жидких сред

Устройство для мониторинга жидких сред (см. рис.2) включает датчик нарушенного полного внутреннего отражения, выполненный в виде треугольной призмы 1. Вокруг призмы 1 и вдоль ее длины расположены источники излучения 4-7, оптически связанные с измерительными фотоприемниками 8-11. Устройство также включает компенсационный источник излучения 12 и фотоприемник 13, оптически связанные между собой, задающий генератор 2, соединенный с коммутатором 3, один выход которого

соединен с компенсационным источником излучения 12, а другие выходы - с источниками излучения 4-7, выход каждого измерительного фотоприемника 8-11 соединен с одним из входов сумматора 14, выход которого соединен с первым входом блока обработки фотоэлектрического сигнала 15, второй вход которого соединен с компенсационным фотоприемником 13, а выход - с регистрирующим прибором 16. Каждый источник излучения 4-7 оптически связан через измерительный гран треугольной призмы 1 с соответствующим измерительным фотоприемником 8-11. Вместо регистрирующего прибора 16 может быть использована ЭВМ. В качестве источников излучения 4-7 и компенсирующего источника излучения 12 могут быть использованы светодиоды.

Устройство работает следующим образом.

Задающий генератор 2 вырабатывает прямоугольные импульсы с частотой следования 8-10 кГц, поступающие на вход коммутатора 3, который делит их на две части. Одна часть импульсов поступает на источники излучения 4-7, а другая часть - на компенсирующий источник излучения 12. Потоки излучения от источников излучения 4-7 фокусируются на измерительном грани призмы 1, отражаются и поступают на измерительные фотоприемники 8-11, где оптический сигнал преобразуется в электрический, который поступает на входы сумматора 14 и суммируется в нем. Оптическое излучение от компенсационного источника излучения 12 поступает на компенсационный фотоприемник 13.

Электрические сигналы с выхода сумматора 14 и компенсационного фотоприемника 13 поступают в блок обработки фотоэлектрического сигнала 15, где определяется отношение электрических сигналов, соответствующих компенсационному и измерительным потокам излучения, которое пропорционально оптическому параметру жидкой среды. Электрический сигнал с выхода блока обработки фотоэлектрического сигнала 15 поступает на регистрирующий прибор 16 (или ЭВМ), по показанию которого судят об оптических параметрах жидкой среды.

Предлагаемое устройство повышает точность измерения за счет многократного объемного измерения параметров контролируемой жидкости, суммирования электрических сигналов от n фотоприемников. Кроме того, с помощью данного устройства можно также определить содержание нефтепродуктов в эмульсионной воде. Также, при установке элемента НПВО в вертикальном положении, можно определять уровень жидкой среды, при этом оптроны устанавливаются на определенных участках элемента НПВО.

При измерениях методом НПВО, по сравнению с методом пропускания, требуется дополнительная оснастка, необходим продуманный выбор показателя преломления элемента НПВО и угла падения света. Следует учитывать возможное коррозионное воздействие образца на элемент НПВО и необходимость периодической замены последнего из-за повреждения в эксплуатации. Элементы НПВО зачастую дороги, требуется высокое качество их поверхностной обработки. Поскольку достижимая эффективная толщина даже при числе отражений выше 100 не превышает долей миллиметра, метод НПВО не следует применять для очень слабо поглощающих образцов. Это

относится к исследованию газов, опытам по титрованию растворов и т.д., где для спектрального исследования требуется образец толщиной в несколько миллиметров.

Метод НПВО обычно непригоден для исследования материалов с сильно меняющимся показателем преломления (например, кварца). В этих случаях не удастся поддерживать угол падения выше критического во всем интервале длин волн.

При отсутствии достаточно хорошего контакта между образцом и элементом НПВО получаемые значения относительной интенсивности полос нельзя считать надежными.

В определенных случаях метод НПВО следует применять осторожно. Так например, при анализе смесей веществ относительная концентрация компонентов вблизи поверхности элемента НПВО может оказаться иной из-за различия потенциалов у поверхности. В этом случае спектр НПВО не будет характеризовать смесь в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов Н.Р. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве // Фергана, «Техника», 2004. – 91 с.
2. Харрик Н. Дж. Спектроскопия внутреннего отражения. – М.: Недра. – 305 с.
3. Абдуллаев А.А и др. Контроль в процессах транспорта и хранения нефтепродуктов. – М., Недра, 1990. – С. 194–195.

© О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, П.В. Петров, 2008

УДК 681.785.5

В.Б. Шлишевский

СГГА, Новосибирск

РАБОТЫ КАФЕДРЫ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ СГГАВ ОБЛАСТИ РАСТРОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

V.B. Shlishevsky

SSGA, Novosibirsk

SCANNING SPECTROSCOPY DEVELOPMENTS OF THE INSTRUMENT- MAKING DEPARTMENT (SSGA)

Brief review of the works and achievements of the instrument-making department is presented, as concerns raster spectroscopy theory, techniques and devices development.

Растровая спектроскопия – одно из трех так называемых «новых» направлений спектрального приборостроения, сформировавшихся в начале 60-х годов прошлого столетия, в первую очередь, во Франции. Вскоре аналогичные поисковые работы были начаты и в СССР – вначале в Ленинградском институте точной механики и оптики (в настоящее время – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики)) научной группой (К.Н. Чиков, В.В. Гуд, В.М. Красавцев и др.) под руководством профессора К.И. Тарасова, и несколько позже в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И. Вавилова автором, выполнявшим кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и исследование растровых монохроматоров для спектрометров с квантовыми приемниками» под руководством тогда еще кандидата технических наук Б.А. Киселева.

Кафедра оптических приборов Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (НИИГАиК) подключилась к указанной проблематике в 1976 г., когда автору после защиты кандидатской диссертации было предложено в ее развитие поставить и выполнить хоздоговорную НИР «Модернизация двойного растрового монохроматора». Затем было еще 10 хоздоговорных НИР по заказам предприятий Миноборонпрома (прежде всего, ГОИ им. С.И. Вавилова) и 8 госбюджетных НИР по комплексным отраслевым программам Минвуза и Академии наук. Как, наверное, и в большинстве вузов, хоздоговорная тематика носила, в основном, прикладной характер, а в рамках проводимых параллельно госбюджетных НИР решались теоретические и научно-методические задачи. В данном случае такое разделение теории и практики оказалось в целом оправданным, свидетельством чему могут служить, в частности, более 100 опубликованных научных трудов и 19 авторских свидетельств и патентов на изобретения, защищающих новые

принципиальные, схемные и технические решения. Основные достижения отражены в наиболее значимых, на наш взгляд, научных статьях [1 – 22], препринтах [23 – 24], патентах на изобретения [25 – 31], а также в диссертациях [32 – 34]. Итоги исследований обобщены в монографии [35]; там же приведена и соответствующая подробная библиография.

В связи с ограничениями, предъявляемыми к объему публикуемого материала доклада, кратко сформулируем здесь только главные научные и практические результаты:

1. Предложен критерий оценки спектроэнергетической эффективности светосильных растровых спектрометров, базирующийся на комплексных взаимосвязях основных характеристик, определяющих потенциальные мерительные возможности аппаратуры [6]. Критерий охватывает случаи регистрации спектров излучения и поглощения при «широких» и «узких» щелях с квантовыми и тепловыми приемниками излучения и показывает, что растровые спектрометры обладают значительными преимуществами перед однощелевыми практически во всем оптическом диапазоне вплоть до его субмиллиметровой границы. Для отдельных частных случаев при оценке эффективности удалось учесть и влияние аберраций оптической системы [1].

2. Предложена и теоретически обоснована обобщенная математическая модель бинарного апертурного кодирования, сохраняющего тождественность формы аппаратных функций растрового и однощелевого приборов [21]; необходимым условием этого является ортогональность базисных функций. Рассмотрены характерные частные решения для одномерных и двумерных структур, ординарных и двойных монохроматоров.

3. Исходя из построенной теоретической модели, разработаны методы пространственно-спектральной растровой фильтрации светового потока, при которой повышение светосилы происходит за счет статических наборов щелей, упорядоченных так, что вся нежелательная радиация блокируется непрозрачными промежутками между ними [5, 10]. Найдены законы распределения щелей и оптимальные сочетания схемообразующих параметров в ординарных и двойных (с произвольным взаимным направлением действия дисперсий) монохроматорах. Установлено, что наиболее эффективно принципы такой фильтрации реализуются в двойных растровых монохроматорах (ДРМ) со сложением дисперсий; раскрыты и проанализированы их спектроэнергетические возможности с квантовыми и тепловыми приемниками излучения [4, 8]. На сегодняшний день этот тип аппаратуры является единственным из дисперсионной, открывающим реальные перспективы и возможности существенного повышения информативности спектрометрии с квантовыми приемниками, т. е. в ультрафиолетовой, видимой и самой ближней инфракрасной областях спектра.

4. Рассмотрены теоретические основы построения растровых спектрометров с селективной амплитудной модуляцией потока излучения. Уточнены формулы для расчета корреляционных функций растров с построчно-хаотическим распределением элементов [9], дана количественная оценка неизбежно свойственных им побочных максимумов [3]. Изучено влияние

фоновой засветки приемника излучения и побочных максимумов в контуре аппаратной функции на отношение сигнал/шум в регистрируемом спектре и выяснено, что в ряде случаев указанные факторы могут привести к полной потере всех преимуществ растровых спектрометров [35]. Показано, что с квантовыми приемниками излучения спектрометры с селективной модуляцией по своей эффективности, как правило, заметно уступают ДРМ, а с тепловыми – потенциально превосходят их. Предложен способ устранения влияния внутренних тепловых фоновых засветок приемника излучения [31].

5. Предложены и всесторонне исследованы новые типы растров с большой полезной площадью, обеспечивающие в модельном представлении полное отсутствие побочных максимумов у аппаратных функций и максимальный выигрыш в чувствительности и отношении сигнал/шум для спектрометров с тепловыми приемниками излучения: выявлены принципиальные предпосылки существования, найдены отвечающие этим предпосылкам одномерные [14, 25, 28] и двумерные [7, 11, 12, 22 – 24, 26] структуры, определены условия их построения и практической реализации; получены формулы, описывающие поведение корреляционных функций различных растровых модификаций и их комбинаций; продемонстрированы широкие возможности топологической коррекции и оптимизации подобных распределений в зависимости от требований эксперимента и своеобразия решаемой задачи [15, 16, 19, 20, 31]; показана возможность сравнительно простой перестройки серийных однощелевых инфракрасных спектрометров в растровые.

6. Проанализированы возможные схемы построения монохроматоров с точки зрения получения наилучшего качества изображения по большому выходному полю; сформулированы общие требования к исправлению aberrаций коллиматорного и фокусирующего объективов [35]. Показано, что в растровых спектрометрах первостепенное значение приобретают специфические дисторсия и хроматизм увеличения, вносимые в изображение работающей в параллельных пучках диспергирующей системой. Выведены формулы для расчета составляющих этих aberrаций для дифракционных и призмных диспергирующих систем [17]. Разработаны методики, выполнены расчеты, выявлены закономерности и количественные соотношения, определяющие характер и степень искажений аппаратной функции прибора под влиянием aberrаций диспергирующей системы. Обоснованы и установлены численные допуски на aberrационные составляющие в различных схемных построениях ДРМ [2] и спектрометров с селективной модуляцией [18]. Рассмотрены известные варианты схем сканирования спектра и их применимость в дифракционных растровых спектрометрах. Предложено 10 новых способов и устройств спектральной развертки (с однократной и двукратной дифракцией пучков), позволяющих минимизировать составляющие aberrаций решетки в широком интервале длин волн [35] (особо можно выделить идею полной коррекции дисторсии диспергирующей системы [27] и способ минимизации ее хроматизма в установках с двукратной дифракцией пучков на решетке [13, 29]).

Тем самым почти «с нуля» создана стройная теория aberrаций оптических систем монохроматоров растровых спектрометров.

7. Разработанные теоретические положения, выполненные расчеты и найденные схемные решения послужили основой для построения новой высокосветосильной спектральной аппаратуры [36]:

- Полевого прибора для регистрации и изучения эмиссионных спектров и фонов рассеянного излучения ночной и сумеречной атмосферы в видимом диапазоне с рекордной пороговой чувствительностью (до $\approx 1,3 \cdot 10^{-14}$ Вт·см⁻²·ср⁻¹ и $\approx 4 \cdot 10^{-11}$ Вт·см⁻²·ср⁻¹·мкм⁻¹) при спектральном разрешении $\approx 0,45$ нм;

- Полевого ДРМ со сложением дисперсий для исследования спектров слабых свечений (рэлеевского рассеяния, люминесценции, комбинационного рассеяния) в составе передвижного лидарного комплекса Крымской научной экспедиции Института оптики атмосферы СО РАН;

- Бортового ДРМ со сложением дисперсий для исследования верхних слоев атмосферы в ближней инфракрасной области спектра (до 3,5 мкм);

- Макета спектрометра с одномерными растрами на основе псевдослучайных кодовых последовательностей, не требующего селективной модуляции потока излучения;

- Макета спектрометра с двумерными растрами на основе *H*-матриц с аппаратной функций без побочных максимумов;

- Монохроматора спектрометра для средней и дальней (вплоть до 200 мкм) инфракрасной областей спектра с растрами с чересстрочной позитивно-негативной структурой;

- Монохроматора спектрометра для средней и дальней инфракрасной областей спектра с растрами с построчной позитивно-негативной структурой;

Одновременно были отработаны технологические приемы изготовления растров, оптимизирующие их параметры для всех указанных выше спектральных диапазонов.

Растровые монохроматоры для контроля загрязнений окружающей среды по итогам II Всесоюзного конкурса «Экотехника-82» отмечены Почетным дипломом Всесоюзного совета научно-технических обществ. В 1984 г. цикл работ автора «Разработка и развитие методов и приборов растровой спектроскопии для научных исследований» удостоен Медали академии наук СССР с премией для молодых ученых.

Все исследования проводились преимущественно силами штатных преподавателей и сотрудников кафедры оптических приборов (ответственным исполнителем большинства хоздоговорных тем была кандидат технических наук Н.Ф. Чайка), однако с привлечением при необходимости специалистов смежных кафедр и в тесном творческом содружестве с учеными ведущих вузов и научно-исследовательских институтов страны оптического профиля. Нельзя не отметить постоянный интерес к работам и их действенную поддержку со стороны ректората академии, а также активную творческую позицию студентов старших курсов оптического факультета, без участия которых некоторые

важные этапы работ вообще не могли бы быть выполнены. Студенты (их фамилии подчеркнуты) являются полноправными соавторами докладов на Всесоюзных и Российских конференциях [37 – 39], научных статей в центральных журналах [20, 40 – 42] и изобретения [43].

Пользуясь возможностью, автор поздравляет с замечательным юбилеем своих коллег и всех участников совместных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шлишевский В.Б. Учет влияния аберраций при оценке эффективности растровых спектрометров // Оптико-механическая промышленность. – 1977. – № 8. – С. 68.
2. Шлишевский В.Б. Выбор и анализ оптических схем для ДРМ // Межвуз. сб. научн. трудов «Оптика и спектроскопия». – Новосибирск: НИИГАиК, 1978. – Т. 3. – С. 5–24.
3. Бухонин Ю.С., Шлишевский В.Б. Отношение сигнал–шум в спектрометрах с хаотическими растрами // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44, вып. 6. – С. 1180–1185.
4. Бухонин Ю.С., Шлишевский В.Б. Об одном способе кодирования некогерентных оптических сигналов // Автометрия. – 1979. – № 2. – С. 31–40.
5. Шлишевский В.Б. Теория двойного растрового монохроматора // Журнал прикладной спектроскопии. – 1979. – Т. 30, вып. 3. – С. 537–545.
6. Бухонин Ю.С., Шлишевский В.Б. Эффективность растровых спектрометров // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1980. – № 4. – С. 75–78.
7. Шлишевский В.Б. Растры на основе матриц Адамара для растровых спектрометров с селективной модуляцией // Оптико-механическая промышленность. – 1982. – № 4. – С. 55–56.
8. Бухонин Ю.С., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Светосильная растровая спектроскопия // В кн.: Новые методы спектроскопии. – Новосибирск: Наука (СО), 1982. – С. 3–77.
9. Шлишевский В.Б. Некоторые особенности формирования аппаратных функций в спектрометрах с хаотическими растрами // Межвуз. сб. научн. трудов «Оптические и оптико-электронные приборы». – Новосибирск: НИИГАиК, 1982. – Т. 15 (55). – С. 97–103.
10. Шлишевский В.Б. Новый метод растровой фильтрации светового потока и его критическая оценка // Журнал прикладной спектроскопии. – 1984. – Т. 41, вып. 2. – С. 263–267.
11. Шлишевский В.Б. Элементарная теория растров с автокорреляционными функциями без побочных максимумов // Оптика и спектроскопия. – 1985. – Т. 59, вып. 3. – С. 649–654.
12. Mursin F.A., Mursina T.S., Shlishevsky V.B. New grilles for Girard spectrometers // Applied Optics. – 1985. – V. 24, No 21. – P. 3625–3630.
13. Афанасьев В.В., Шлишевский В.Б. Принципы построения диспергирующих систем растровых спектрометров с постоянным масштабом изображения // Деп. ВИНТИ. – 1987. – № 6790–В87. – 12 с.

14. Чайка Н.Ф., Шлишевский В.Б. Одномерные растры с автокорреляционными функциями без побочных максимумов для растровых спектрометров // Оптико-механическая промышленность. – 1987. – № 10. – С. 9–12.

15. Афанасьев В.В., Шлишевский В.Б. Растры на основе матриц Адамара для режима осцилляции // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1990. – № 12. – С. 74–77.

16. Афанасьев В.В., Ушаков О.К., Шлишевский В.Б. Методика построения новых двумерных растров // Оптический журнал. – 1998. – № 9. – С. 32–35.

17. Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Расчет искажений, вносимых в изображение диспергирующими элементами растровых монохроматоров // Вестник СГГА. – 1999. – № 4. – С. 82–91.

18. Шлишевский В.Б. Влияние аберраций дифракционной решетки на вид аппаратных функций растровых спектрометров, построенных по горизонтальным схемам с постоянным углом отклонения // Вестник СГГА. – 1999. – № 4. – С. 92–99.

19. Мурзина Т.С., Шлишевский В.Б. Некоторые результаты исследования растровых систем на основе матриц Адамара для режима осцилляции // Вестник СГГА. – 2000. – № 5. – С. 129–134.

20. Корабельщиков Д.Г., Шлишевский В.Б. Разработка программы построения растровых структур для режима осцилляции // Оптический журнал. – 2001. – № 4. – С. 91–92.

21. Шлишевский В.Б. Методы светосильной растровой спектроскопии // Оптический журнал. – 2002. – № 5. – С. 56–69.

22. Шлишевский В.Б. С-матрицы как основа построения растров спектрометров с селективной модуляцией // Оптический журнал. – 2002. – № 11. – С. 74–75.

23. Мурзин Ф.А., Мурзина Т.С., Чайка Н.Ф., Шлишевский В.Б. Светосильная растровая спектроскопия на основе матриц Адамара // Препринт ИТПМ СО АН СССР. – 1984. – № 17. – 52 с.

24. Мурзина Т.С., Шлишевский В.Б. Растровые структуры на основе матриц Адамара // Препринт СибГУТИ. – 2000. – № 1. – 15 с.

25. Бухонин Ю.С., Шлишевский В.Б. Растровый спектрометр с селективной модуляцией // Патент РФ № 798 505. – Бюл. изобр. – 1981. – № 3.

26. Бухонин Ю.С., Шлишевский В.Б. Растровый спектрометр с селективной модуляцией // Патент РФ № 968 629. – Бюл. изобр. – 1982. – № 39.

27. Шлишевский В.Б. Растровый спектрометр // Патент РФ № 1 154 549. – Бюл. изобр. – 1985. – № 15.

28. Чайка Н.Ф., Шлишевский В.Б. Растровый спектрометр с селективной модуляцией // Патент РФ № 1 331 224, 1987.

29. Афанасьев В.В., Шлишевский В.Б. Способ сканирования спектра в растровом спектрометре // Патент РФ № 1 368 662. Бюл. изобр. – 1988, № 3.

30. Афанасьев В.В., Шлишевский В.Б. Растровый спектрометр с селективной модуляцией // Патент РФ № 1 655 192, 1991.

31. Шлишевский В.Б. Способ регистрации спектрального сигнала в растровом спектрометре // Патент РФ № 1 368 662. – Бюл. изобр. – 1991. – № 38.
32. Чайка Н.Ф. Разработка и исследование растровых монохроматоров с аппаратными функциями без побочных максимумов: Автореф. канд. дис. – Новосибирск: НИИГАиК, 1990. – 26 с.
33. Мурзина Т.С. Исследование светосильных растровых структур на основе матриц Адамара: Автореф. канд. дис. – Новосибирск: СибГУТИ, 2000. – 17 с.
34. Шлишевский В.Б. Теория, методы и приборы светосильной растровой спектроскопии: Автореф. докт. дис. – СПб., ГИТМО (ТУ), 1997. – 45 с.
35. Шлишевский В.Б. Теория и практика светосильной растровой спектроскопии. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 264 с.
36. Горбунов Г.Г. Оригинальные отечественные разработки в области растровой спектроскопии // Оптический журнал. – 2000. – № 12. – С. 63–66.
37. Быков В.В., Чайка Н.Ф., Шлишевский В.Б. Метод растровой фильтрации светового потока и его спектроэнергетические возможности // Тез.докл. Всесоюзн. конф. «Приборы и методы спектроскопии». – Новосибирск, 1979. – С. 101–103.
38. Афанасьев В.В., Бегман Н.М., Прилепских В.Д. и др. Перестройка монохроматора спектрометра ИКС–31 в растровый вариант // Материалы Всесоюзн. научно-технической школы–семинара «Лазерное оптическое и спектральное приборостроение». – Минск: ИФ АН БССР, 1986. – С. 250–252.
39. Корабельщиков Д.Г., Мурзин Ф.А., Мурзина Т.С., Шлишевский В.Б. Разработка алгоритмов и программ поиска оптимальных растровых структур // Тез.докл. IV Сибирского конгресса по прикладной и промышленной математике. Ч. IV. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 2000. – С. 65–66.
40. Афанасьев В.В., Глебова Н.И., Шлишевский В.Б. Диспергирующие системы с постоянным меридиональным увеличением в пределах большого углового поля // Оптико-механическая промышленность. – 1985. – № 12. – С. 13–14.
41. Афанасьев В.В., Бегман Н.М., Прилепских В.Д. и др. Перестройка монохроматора спектрометра ИКС–31 в растровый вариант // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1987. – № 8. – С. 66–67.
42. Каулькин Д.А., Чайка Н.Ф., Шлишевский В.Б. Экспериментальная проверка одномерной растровой системы, не требующей селективной модуляции потока излучения // Деп. ВИНТИ. – 1990. – № 2527–В90. – 6 с.
43. Афанасьев В.В., Попова Г.А., Уварова М.А., Шлишевский В.Б. Диспергирующая система // Авт. свид. СССР № 1 122 900. – Бюл. изобр. – 1984. – № 41.

УДК 621.383:623

Г.Н. Попов

ЦКБ «Точприбор», Новосибирск

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПРИЦЕЛИВАНИЯ, НАВЕДЕНИЯ, РАЗВЕДКИ И НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ СУХОПУТНЫХ ВОЙСК РФ (НА ПРИМЕРЕ ИЗДЕЛИЙ ЦКБ «ТОЧПРИБОР»)

G.N. Popov

Central Design Bureau «Tochpribor», Novosibirsk

ORDERING OF THE AIMING, PROMPTING, INVESTIGATION AND SUPERVISION ELECTRO-OPTICAL DEVICES FOR THE LAND FORCES OF RF (BY EXAMPLE OF THE CENTRAL DESIGN BUREAU «TOCHPRIBOR» PRODUCTS)

Principles of ordering of electrooptical devices are formulated. The table of ordering of an aiming and supervision electrooptical devices is developed on the basis of this principles.

Оптико-электронные системы (ОЭС), реализующие оптические методы и получающие информацию о пространственных, яркостных, контрастных, спектральных, временных и электромагнитных параметрах объектов наблюдения являются доминантными в современных и будущих средствах вооружения и военной техники. Поскольку все существующие виды ОЭС представляют собой совокупность сложных, внутренне разветвленных и дифференцированных объектов, то возникает задача их систематизации. Эта задача тесно связана с оценкой состояния и перспектив развития ОЭС. Укрупненная и развернутая систематизации оптико-электронных систем в вооружении и военной технике приведены в табл. 1 и 2 соответственно [1, 2]. В табл. 2 [2] курсивом отмечены виды приборов, входящие в номенклатуру ФГУП «ЦКБ «Точприбор». Рассмотрим более подробную систематизацию этих приборов.

Принципы систематизации

Для предприятия, которое разрабатывает оптико-электронные приборы разного назначения и с разными тактико-техническими параметрами важно:

- Выработать критерии систематизации изделий;
- Четко систематизировать всю номенклатуру изделий по этим критериям;
- Выработать единую терминологию, позволяющую быстро и точно понимать суть обсуждаемой проблемы, как исполнителями, так и заказчиками;

– Продуманная таблица систематизации поможет решать задачи, связанные с разработкой новых и усовершенствованием старых приборов.

Предлагаются следующие принципы систематизации:

- **Назначение** (прицеливание, наблюдение);
- **Вид цели**(ростовая фигура солдата, лобовая проекция танка, бортовая проекция танка, разные объекты ближней и дальней разведки, оптико-электронные средства, окружающая обстановка для вождения бронетанковой техники);
- **Вид объекта установки** (стрелковое оружие, артиллерийское оружие, бронетанковая техника);
- **Подвид объекта установки по способу передвижения** (носимые, возимые, самоходные виды оружия);
- **Подвид объекта установки по тактико-техническим параметрам** (снайперские винтовки, оружие ближнего боя, оружие дальнего боя);
- **Рабочее время суток** (дневные, ночные, дневно-ночные, круглосуточные);
- **Тип объекта установки:**
 - Снайперские винтовки (ВСС, СВД, СВДС, СВДК, АСВК, СВ-98, ПКМН);
 - Стрелковое оружие ближнего боя (автомат: АК-74М, АН-94, АС; пулемет: НСВС-12,7, ПКМН «Печенег»; гранатомет: АГС-17, АГС-30, РМГ, РПГ-7ВЗ, РПГ одноразовый, РПГ26, РПГ27, РПГ28, РПГ29, РШГ-1, РШГ-2, СПГ-9Н, СПГ-9ДН);
 - Тренога с лимбом;
 - Артиллерия (противотанковая пушка 2А-29, зенитная установка ZU-23М);
 - Автомобили (1В152, ПРП-4А);
 - Бронетанковая техника (БМП-1, БМП-2, БМП-3, БТР-Т, Т-80У, ТОС-1, Т-72, Т-90С, Т-55).

На основе этих принципов разработана таблица систематизации оптико-электронных приборов прицеливания и наблюдения (табл. 3). Причем эта таблица является только шапкой глобальной таблицы, в которой систематизированы 35 типов изделий ФГУП «ЦКБ «Точприбор» и представлены значения 27 основных тактико-технических параметров. Названия этих параметров приведены в табл. 4.

Таблица 1. Укрупненная систематизация оптико-электронных систем в вооружении и военной технике

Приборы наблюдения и визирования	Оптические и оптико-электронные прицелы и прицельные комплексы	Оптико-электронные средства управления и наведения оружия
Приборы наблюдения бронетанкового вооружения и техники	Прицелы бронетанкового вооружения и техники	Приборы систем управления оружием
Визеры и перископы	Прицелы для ракетно-артиллерийских систем, минометов и гранатометов	
Средства оптико-электронной разведки и противодействия	Прицелы для малокалиберного оружия	
Приборы ночного видения	Прицелы для охотничьего и спортивного оружия	
Тепловизионные приборы и тепlopеленгаторы	Прицелы коллиматорные для стрелкового оружия	
Телевизионные приборы наблюдения		

Таблица 2. Развернутая систематизация оптико-электронных систем в вооружении и военной технике

Наблюдательные и прицельно-дальномерные приборы (кроме лазерных)	Навигационные, топогеодезические, углоизмерительные приборы и системы	Аппаратура фотографическая и киносъемочная	Приборы и системы обнаружения, слежения и наведения средств поражения на цель	Лазерные приборы и системы	Аппаратура передачи, хранения, обработки и представления информации
бинокли	секстанты	аэрофотоаппараты	теплопеленгаторы	<i>лазерные дальномеры</i>	волоконно-оптические линии связи
визеры	буссоли	кинотеодолиты	аппаратура обнаружения кильватерного следа подводных лодок	<i>лазерные системы подсветки целей</i>	оптические вычислительные машины
зрительные трубы	прицельно-пилотажные устройства	баллистические камеры	тепловые головки самонаведения управляемых реактивных снарядов	лазерные локаторы	оптоэлектронные устройства отображения информации
<i>оптические прицелы</i>	приборы и системы ориентации и астроориентации	бортовые (стендовые) кино-, фотокамеры		лидары	
стереотрубы	светодальномеры			лазерные системы связи	
перископы	системы прицеливания баллистических ракет			лазерные гироскопы	
<i>приборы ночного видения</i>					
<i>приборы тепловидения</i>					

Таблица 3. Систематизации оптико-электронных приборов прицеливания и наблюдения

Назначение	Прицелы								Приборы наблюдения										
Вид цели	РФС						ЛПТ, БПТ		Разные объекты ближней и дальней разведки					ОЭС			Окружающая обстановка для вождения БТТ		
Вид объекта установки	Стрелковые						Артиллерийские		Тренога с лимбом			Транспорт		Стрелковые			Транспорт		
Подвид объекта установки по тактико-техническим параметрам	Снайперские			Автоматическое оружие и оружие ближнего боя			Зенитное орудие	Артиллерия и минометы				ПРП	БТТ	Без противодействия	С противодействием	БТТ			
Подвид объекта установки по способу передвижения	Носимые			Носимые			Возимые	Самоходные	Носимые			Возимые			Носимые			Возимые	
Рабочее время суток	Н	ДН	ВС	Н	ДН	В С			Н	ДН	ВС	Н	Д Н	ВС			ДН		

Таблица 4. Набор основных тактико-технических параметров приборов прицеливания и наблюдения

Дальность распознавания, м			
По бортовой проекции танка		По ростовой фигуре солдата	
Пассив	Актив	Пассив	Актив
Увеличение, крат.			
Угол поля зрения, град.			
Фокусное расстояние объектива, мм			
Относительное отверстие объектива			
Размерность и тип применяемых фотоприемников			
Электронно-оптический преобразователь	Линейка фотоприемников	Матрица фотоприемников	
Диаметр фотокатода электронно-оптического преобразователя, мм			
Режимы работы электронно-оптического преобразователя			
Дальность обнаружения прицела типа ПСО-1С в активно-импульсном режиме, м			
Диапазон измерения дальности в активно-импульсном режиме, м			
Погрешность измерения дальности в активно-импульсном режиме, м			
Угловое поле излучающего канала, град.			
Вид окуляра			
Фокусное расстояние окуляра, мм			
Угол поля зрения окуляра, град.			
Удаление выходного зрачка, мм			
Диаметр выходного зрачка, мм			
Перископичность, мм			
Масса, кг.			
Габаритные размеры, мм			

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптико-электронные системы и лазерная техника / Энциклопедия XXI век. Оружие и технологии России. – М.: Оружие и технологии, 2005.
2. Васильев В. Состояние и перспективы развития «военной оптики». – В кн.: Оптико-электронные системы и лазерная техника / Энциклопедия XXI век. Оружие и технологии России. – М.: Оружие и технологии, 2005.

© Г.Н. Попов, 2008