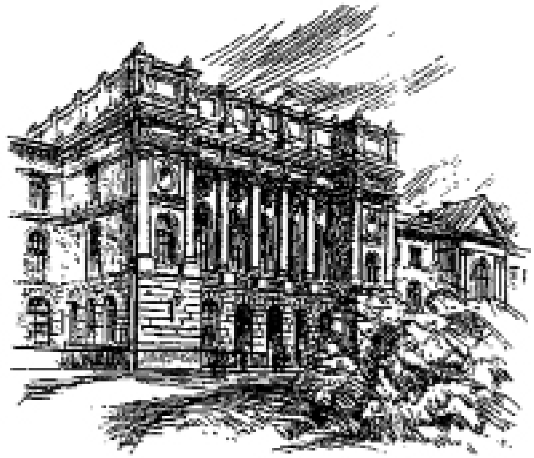
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации. Управление

5(205) 2014

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2014

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Подписной индекс **47517** в объединенном каталоге «Пресса России».

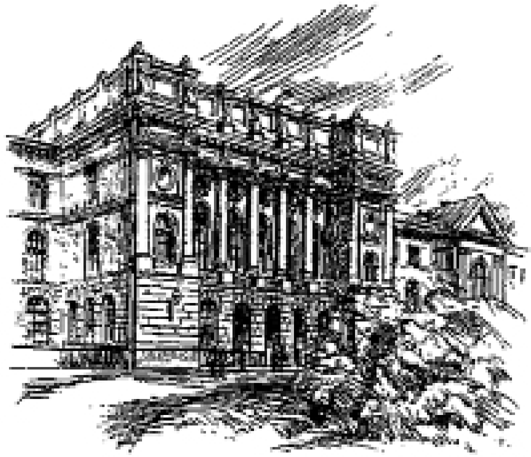
Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте http://www.elibrary.ru

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 552-62-16.

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

Computer Science. Telecommunications and Control Systems

5(205) 2014

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2014

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The publications are presented in the VINITI RAS Abstract Journal and Ulrich's Periodical Directory International Database.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

Subscription index **47517** in the «Press of Russia» Joint Catalogue.

The journal is on the Russian Science Citation Index (RSCI) database
© Scientific Electronic Library (http://elibrary.ru/).

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

Содержание

“SEMICON Россия 2014”

Интеллектуальные системы и технологии

Системный анализ и управление

Contents

Welcome to the Journal Special Section "SEMICON Russia 2014"

This Special Section is devoted to the publication of papers which topics are strongly correspond to the discussions being done during the international Conference "SEMICON Russia 2014", Moscow, May 2014. This Conference covers the following segments through its programs and exhibitions: Semiconductor, MEMS and Packaging. The published papers are mainly based on materials from the session "A market and technology outlook for MEMS manufacturing and applications in Russia", headed this time by me. Traditionally SEMICON offers market information, technical knowledge, and networking opportunities. The Conference provides a very effective platform for learning about the regional and global market, identifying promising areas for research and investment which is especially important in the area of Microelectromechanical systems (MEMS). This technology is very perspective in many applications because allows the designers to realize a wide spectrum of devices, such as sensors and actuators, with micro scale sizes. Some of these applications are considered in the Journal.

This year about 10 papers have been presented in the session including papers from Fraunhofer Institute, Germany, VTT, Finland, Leibniz University, Hannover, Germany, Russian MEMS Association, Moscow State Technical University, St. Petersburg State Polytechnic University, and others. The round table discussion, followed the session, has demonstrated a big interest of the participants to publish their materials. This situation determined our decision to organize a journal special section. As a conclusion, on behalf of Editorial board I would like to thank all authors for their valuable efforts in supporting this Special Section. Please, read the papers!

With kind regards,
Prof. Dr. *Alexander Korotkov*

UDC 621.3

T. Thieme

LBA DIFFERENTIAL PRESSURE SENSORS HIGH IMMUNITY TO DUST CONTAMINATION

In this paper First Sensors LBA differential pressure (ΔP) sensors are experimentally compared to other sensors which use the same (thermal-anemometer-based, non-membrane) sensing principle, where differential pressure is inferred from a gas flow through the sensor.

LBA; DIFFERENTIAL PRESSURE SENSORS; FIRST SENSORS; GAS FLOW THROUGH.

Т. Тиме

ВЫСОКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ СЕРИИ LBA К ПЫЛЕВОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ

В статье представлены результаты экспериментального сравнения дифференциальных сенсоров давления серии LBA компании First Sensors с иными сенсорами, в которых использован тот же принцип действия (термо-анемометрические, безмембранные): перепад давления определяется методом продувки газа через сенсор.

LBA; ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЕНСОРЫ ДАВЛЕНИЯ; FIRST SENSORS; МЕТОД ПРОДУВКИ ГАЗА.

With dust in the air flow, all other sensors having flow impedance 15 Pa/(ml/s) to 300 Pa/(ml/s) went out of calibration or failed entirely while the LBA sensors having flow impedance >10 kPa/(ml/s) kept their calibrated sensitivity. First Sensors LBA ΔP sensors require only very tiny flows through its body and therefore provide high immunity to dust-bearing air.

Introduction. The LBA series low-pressure sensors with ranges from 25 Pa (0.1 inH2O) full scale sense differential air or gas pressure, inferring differential pressure from nano-liters per second gas flow through an integrated air-flow channel having high flow impedance. The transducer is a MEMS-based thermo-anemometer on a monolithic silicon chip. Rejustor technology combined with CMOS circuitry provides on-chip-integrated analog-only compensation and conditioning electronics.

Flow-Through Leakage. Because of the sensing mechanism, there is nonzero air-flow leakage through the sensor itself during operation. This is true of all differential pressure sensors using the thermal-anemometer sensing principle, (as opposed to dead-end sensors such as piezo-resistive membrane-based sensors, whose sensing element does not leak). Still, thermal-anemometer-based ΔP sensors have considerable success in the marketplace, because they enable practical and cost-effective sensing of very low ΔP, such as a few hundred Pa full-scale and below.

In this context, the question arises, how much flow-through leakage is too much? The answer depends on details of the application, and on how the ΔP sensor is connected and used.

Being able to measure differential gas pressures below a few hundred Pa, with resolution better than 0.1 Pa, these sensors may be affected by other components of the measurement system such as connecting pipes/tubes and filters, and by the quality of the gas which may contain dust, humidity or liquid droplets.

Some manufacturers of thermal-anemometer-based ΔP sensors recommend the use of connection tubes having a particular length, in order to avoid distortion of the response of the manufacturer-calibrated sensors.

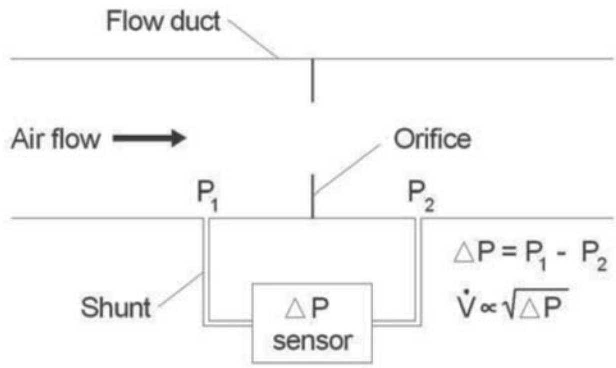


Fig. 1. Typical volumetric flow measurement set-up with differential pressure sensor

Manufacturers also may recommend the use of dust filters, or may use dust-segregation elements/mechanisms as part of their sensors. Note that these types of precautions are not needed for membrane-type sensors where the gas flow through the connection tubing is zero (in static mode).

In general, designers of a flow-measurement system using a thermal-anemometer-based differential pressure sensor must consider factors caused by nonzero gas flow through the sensor, in order to provide reliable long-term operation. Unfortunately, there are no standard test/certification procedures and detailed technical information to address these issues. The tests described below were performed with thermal-anemometer-based sensors from different manufacturers, to demonstrate the principal importance of the flow-through leakage (pneumatic impedance, or flow impedance) of the sensors, for reliable operation in practical applications.

Note: The pneumatic impedance Rpn of the sensor, measured in [kPa/(ml/s)], determines the gas flow through the sensor at a certain pressure drop, ΔPs across the sensor:

$$\textit{Flow-through leakage} = \frac{\Delta P}{Rpn}.$$

Flow Measurement Using Differential Pressure Sensors. Micro-flow-based differential pressure sensors are typically used to measure differential pressure generated by gas flow passing through an air-flow duct or "flow tube". Examples are respiratory flow measurement in medical ventilators as well as air flow measurement or filter control in HVAC applications.

Consider, for example, the sensor being used

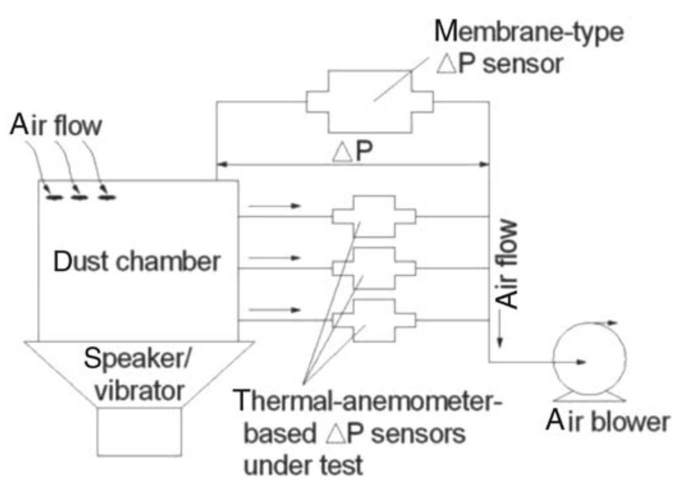


Fig. 2. Schematic diagram of horizontal configuration

in a shunt configuration, to sense differential pressure $\Delta P = P1 - P2$ across a flow-restrictive element in an air duct, thereby inferring measurement of air flow in the duct as shown in Fig. 1. Such conversion elements, designed for different applications, include orifices, baffles, Pitot tubes, Venturi tubes, calibrated diaphragms, and special flow-to-pressure converters used in respiration equipment such as Fleisch or Lilly tubes.

LBA differential pressure sensors feature very high flow-through impedance, greater than 10 kPa per (ml/s) for the most-sensitive models and up to hundreds of kPa/(ml/s) for higher full-scale ranges.

In principle, these sensors with high flow impedance need less parasitic flow in order to make a measurement, and thus cause less disturbance to the main flow than other sensors with lower flow impedance. This makes the sensor virtually equivalent to membrane-type (dead-end type) differential pressure sensors regarding this important aspect of performance for many applications.

Risk From Dust Contamination. In applications such as HVAC, where dust particles may be present in the main air flow, the question may naturally arise whether such dust presents a reliability hazard to thermal-anemometer-based sensors. Since normal function of the sensor involves air flow through the flow-channel, it is certainly plausible that such air flow may carry dust particles into the sensor's flow channel. Thus the hypothetical dangers from dust particles are that they could enter the sensor's flow-channel, causing:

• A change (increase) in the sensor's internal flow impedance and therefore a change (decrease) in the sensor's calibrated sensitivity. This would be seen as a reduction in the sensor's output voltage, for a given applied ΔP, and a loss of calibration;

• A complete blockage of the sensor's internal flow channel (functional failure);

• Dust may adhere on or near to the sensitive microstructures that make up the sensing element inside the channel, causing a change in calibration.

In general, the presence of dust may in principle present a reliability hazard, but the extent of the hazard is primarily determined by the flow-through impedance (pneumatic impedance) of the sensor.

Risk Factors Dust quantity and air velocity. The quantity of dust particles which the air flow brings to the input of the sensor depends on the volume of air passing through the sensor and depends on the velocity of air flow. The quantity of dust particles induced to travel into the sensor's air flow channel depends on the quantity of dust particles which are present at its input, and on the velocity of air flow into the channel. The velocity of air flow toward the sensor has another very important effect, beyond simple volume of air transported to and into the sensor. If the airflow velocity is slow enough that the dust does not remain airborne, this may further enhance the sensor's immunity to dust contamination, while if the air flow velocity toward the sensor is great enough that the dust remains in suspension, this may tend to degrade the sensor's immunity to dust contamination.

Note:

The sensor's flow-impedance directly affects the velocity of approaching airflow. Thus, high flow impedance in the sensor both reduces the volume of air passing through the sensor's channel, and reduces the velocity of the approaching air, potentially allowing airborne dust to settle out, as well as reducing the force on particles already present at the input of the sensor.

Type of dust. For example, big and heavy dust particles are less likely than small/light particles, to be transported through the tubing to the sensor. Also, the size of the dust particles affects whether the dust can physically block air flow into the sensor's flow channel, and whether the dust can physically enter the sensor's flow channel.

Concentration of dust particles in the main flow. The concentration of dust reaching the sensor depends on the concentration of dust in the main gas flow.

Connection of the sensor to main flow duct. Referring to Fig. 1, the larger the inner diameter of the connection tubing, the lower will be the linear velocity of the gas flow of dust-bearing air toward the sensor input. Also, the longer the connection tubing, the greater will be the flow impedance contributed by that connection tubing, and this may in turn affect the linear velocity of the gas flow of dust-bearing air toward the sensor input.

Also, the presence of dust collectors (such as gravity-traps) and dust filters, can provide a certain level of protection for the sensor against dust.

Note:

The goal of this experiment is to estimate and compare the immunity of the sensor itself to dust contamination. Improvements related to dust filtering and other additional protection of the sensors are outside the scope of the present investigations.

Experimental Investigation of Dust Contamination. In order to investigate the risk presented by dust, comparative experimental studies were conducted.

The experimental setup was designed and built to provide reproducible and controllable conditions for the tested sensors, and to allow fair comparative analysis of different sensors. With this target, sets of ΔP sensors using the thermal-anemometer sensing principle were subjected to common applied differential pressures.

In each experiment, typically two or more sensor samples, often having different flow impedances, were connected in parallel such that a common differential pressure was present across all sensors.

Type of Test Dust. At the pressure port receiving the higher applied pressure, a source of airborne dust was connected.

The dust was purchased from a supplier of test dust. The test dust product was, specifically "ISO 12103-1, A2 Fine Test Dust" having particle size distributed between less than 1 μm (less than 3.5 % volume) and approximately 100 μm, with roughly uniform volume-distribution between ~5 μm and ~40 μm.

The chemical composition of the test dust was

SiO_2	68-76 %
Al_2O_3	10-15 %
Fe_2O_3	2-5 %
Na_2O_3	2-4 %
CaO	2-5 %
MgO	1-2 %
K_2O	2-5 %
TiO_2	0,5-1 %

Experimental setup. In the first configuration (Fig. 2), the sensors under test were arranged horizontally, at the same level as the dust chamber and all at the same level to each other.

In the second configuration (Fig. 3), the sensors under test were arranged vertically, such that the dust-bearing air had to flow upward from the dust chamber toward the sensors. In this configuration, it is expected that the effect of

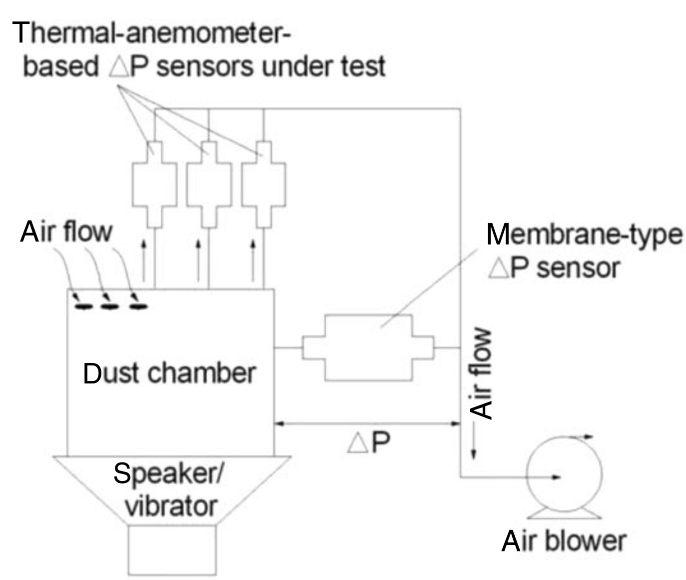


Fig. 3. Schematic diagram of vertical configuration

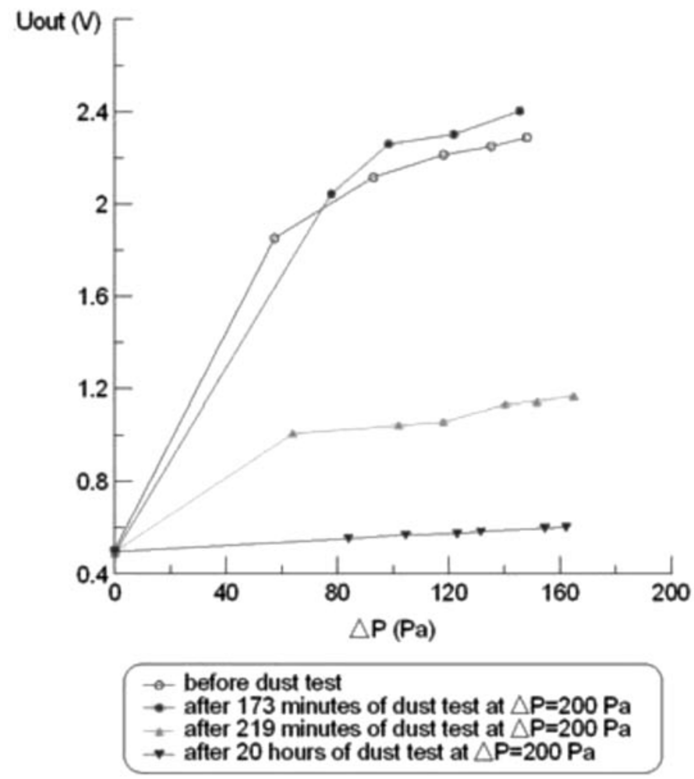


Fig. 4. Test #1 results for Sensor 2-1 (horizontal orientation of the sensor)

gravity will be to delay and reduce particle flow toward the sensors under test, thus offering to the sensors some amount of "protection" from dust contamination. It was attempted to avoid turbulent flow patterns which could artificially distort the spatial distribution of dust.

Test conditions. In each configuration, several sensors under test were connected in parallel with a commercially calibrated membrane-type ΔP sensor (unaffected by dust). Note that the common ΔP is necessarily applied to each sensor under test plus a small length (~5 inches) of connection tubing for each sensor. The connection tubing was 1/8" ID. With the goal of generating a reproducible concentration of dust in the air, a quantity of dust (~10 cm^3) was placed in a chamber having a volume of a few hundred cm^3.

The chamber was agitated continually at 20 Hz using triangular-shaped mechanical pulses with an amplitude of ~1 mm, using a common low-frequency audio speaker (subwoofer). The chamber has ventilation holes, to allow air flow at atmospheric pressure into and through the chamber toward one port of the sensors under test.

A regulated air blower generated a constant vacuum pressure applied to the other port of each sensor under test. This vacuum pressure "pulled" air from the dust chamber through all the connected sensors simultaneously. The magnitude of this air flow, through each individual sensor, is inversely proportional to the flow impedance of each individual sensor.

Sensors under test. Several commercially-available sensors from several different manufacturers were comparatively examined:

• First Sensors LBA sensors with measurement range 0...250 Pa (1 inH2O full-scale), flow impedance ~80 kPa/(ml/s), and integrated analog conditioner with 0.5...4.5 V output.

Sample ID: LBAS250UF6S (# 1)

Sample ID: LBAS250UF6S (# 2)

• First Sensors LBA sensors with measurement range 0...50 Pa (0.2 inH2O full-scale), flow impedance ~30 kPa/(ml/s), and integrated analog conditioner with 0.5...4.5 V output.

Sample ID: LBAS050UF6S (# 1)

- Manufacturer #1 sensors with measurement range 0...±20 Pa (±0.8 inH2O full-scale), flow impedance ~15 Pa/(ml/s), and unamplified analog output ±70 mV.

Sample ID: Sensor 1-1
Sample ID: Sensor 1-2

- Manufacturer #2 sensors with measurement range 0...200 Pa (0.8 inH2O full-scale), flow impedance ~15 Pa/(ml/s), and amplified analog output 0.5...4.5 V. These sensors have a micro-apparatus for dust separation, internal to the sensors flow channel.

Sample ID: Sensor 2-1
Sample ID: Sensor 2-2
Sample ID: Sensor 2-3

- Manufacturer #3 sensors with measurement range -20...+500 Pa (2 inH2O full-scale), flow impedance ~300 Pa/(ml/s), and integrated conditioner with 0.25...4.25 V output.

Sample ID: Sensor 3-1
Sample ID: Sensor 3-2

Test procedure. The sensors were compared in subgroups of 2 to 4, subjected to a common ΔP. The common ΔP was typically near the full-scale of the sensor having the greatest full-scale of the sub-group. While the pump was pulling dust-bearing air through the sensors, several voltage signals were monitored continually and stored:

- The voltage output from the membrane-based ΔP sensor (as a control);
- The voltage output from each sensor under test.

Note:

In cases where the full-scale ranges of the sensors were not the same, and where the applied ΔP was set near to the full-scale of the sensor with greater full-scale, the sensor with lower full-scale has saturated output voltage and cannot be effectively monitored without interrupting the test to reduce the flow. Thus there were typically several interruptions, at intervals during each test.

For each sensor under test, the output voltage vs. applied differential pressure was coarsely

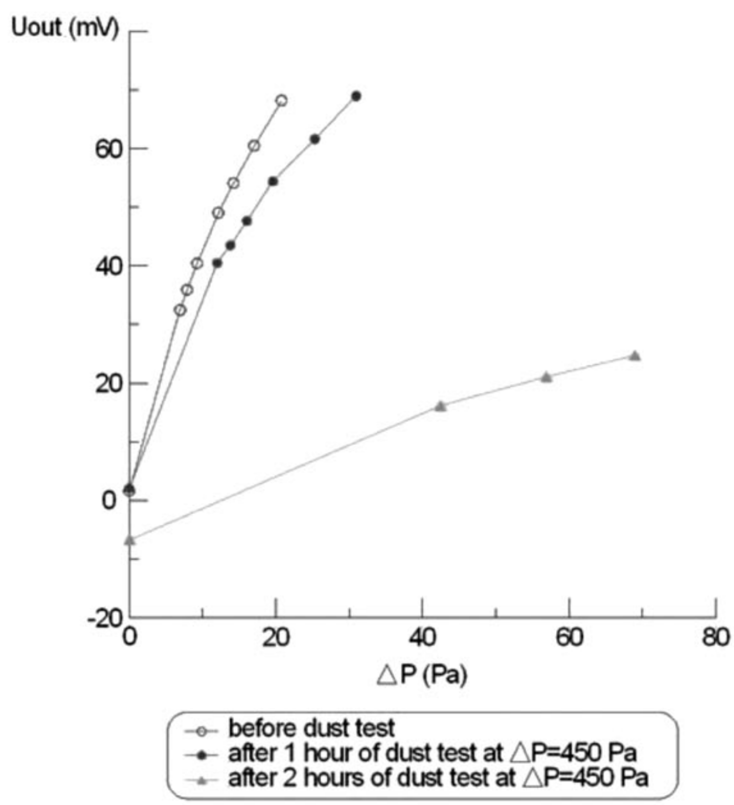


Fig. 5. Test #2 results for Sensor 1-1 (horizontal orientation of the sensor)

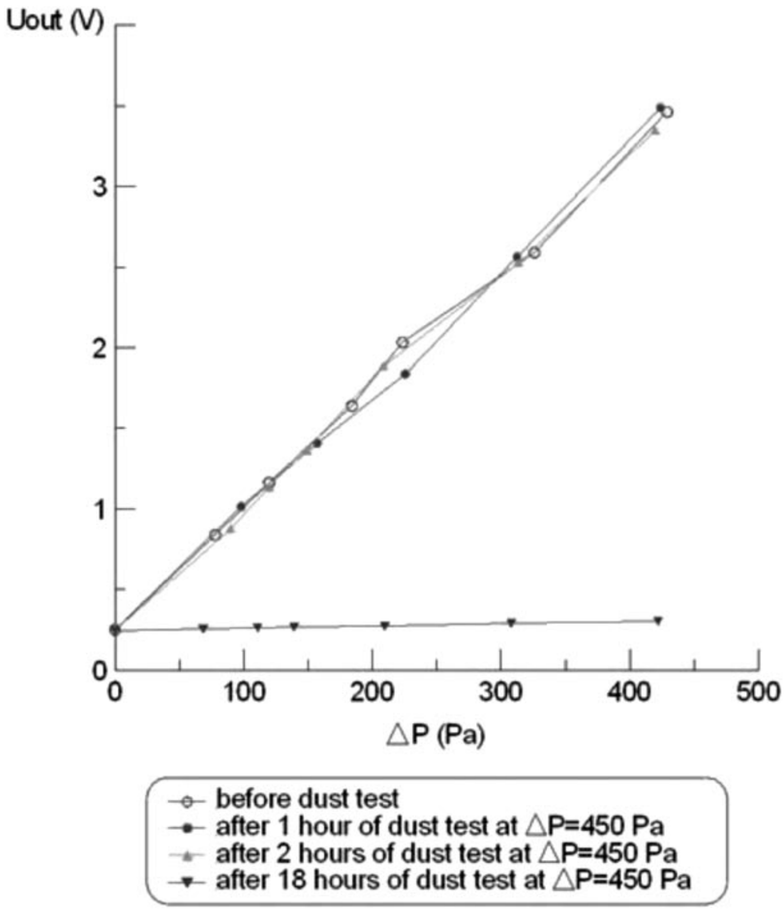


Fig. 6. Test #2 results for Sensor 3-1 (horizontal orientation of the sensor)

characterized using the above-described setup, by changing the pump settings to pull varying amounts of pressure across the sensors. This coarse-characterization was done before the dust test began, at various intervals throughout the dust-test, and then after the end of the dust test. Additionally, for each LBA sensor under test, the output voltage was measured as a function of accurately measured applied pressure, before the dust test began, and again after the end of the dust test, to confirm the coarse-characterization results, and to show the effect of the accumulated dust exposure on sensor samples whose output voltage was saturated during the actual dust exposure.

Test #1. In the first test, sensors LBAS250UF6S (# 2), LBAS050UF6S, and Sensor 2-1 were connected in parallel to the dust chamber, in the first configuration shown in Fig. 2 (with the sensors arranged horizontally at the same level as the dust chamber).

The test was run for 20 hours at a constant differential pressure ΔP = 200 Pa (0.8 inH2O). The coarse-characterization results for Sensor 2-1 are shown in the graph in Fig. 4. The before-and-after fine-characterization results for the two.

LBA sensors are shown later in Figs. 11, 12. It is clear from the results in Fig. 4 that Sensor 2-1 has dramatically changed its calibration (output dropped by more than 50 %), after 219 min, and has effectively completely failed by the end of the 20 hours of dust exposure. It is also clear (see Figs. 11, 12), that both LBA sensors' response curves are unchanged after 20 hours at 200 Pa.

The dramatic difference between Sensor 2-1 and the LBA sensors is not surprising, since the difference in flow impedance is a factor of at least 1000x, meaning over thousand times

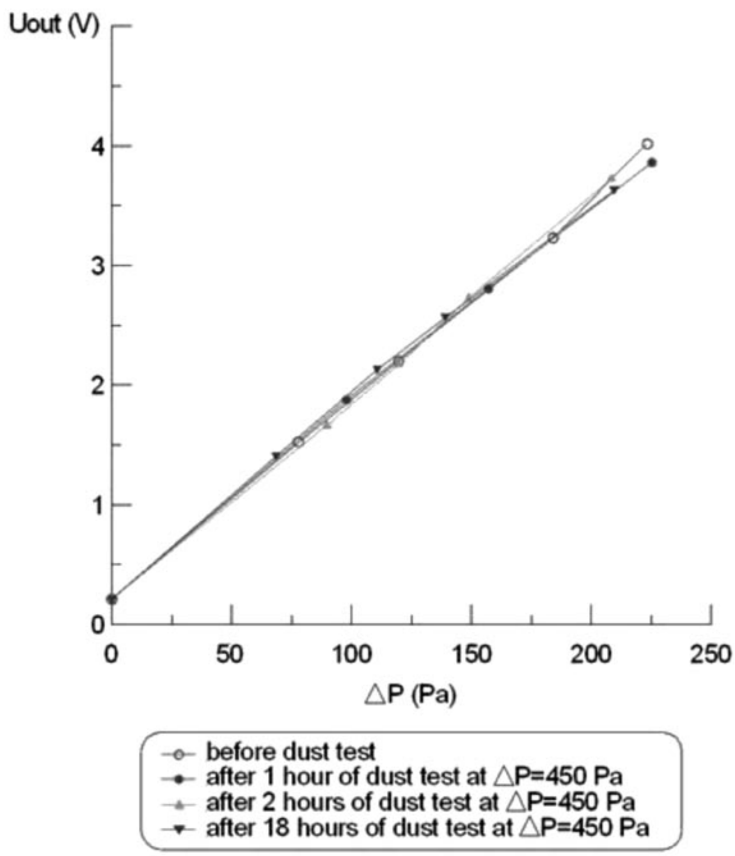


Fig. 7. Test #2 results for LBAS250UF6S (# 1) (horizontal orientation of the sensor)

more air volume went through Sensor 2-1, and also meaning that the flow velocity of dust-bearing air toward Sensor 2-1 was also >1000 times faster.

Note also that the few inches of transparent connection hoses to Sensor 2-1 had substantial visible dust residue within them, while far less dust residue was visible within the connection hoses to the LBA sensors.

Auxiliary Test #1a. As verification of this type of test, a separate 20-hour test was run on Sensor 2-3, along with another LBAS250UF6S sample, same type as the one used in Test#1.

The graphical results were very similar to those described above as shown in Figs. 4, 11. Sensor 2-3's output was drastically reduced after a few hours, and had dropped close to zero after 20 hours of dust exposure. Again, the LBA sample's output was effectively unchanged after the full 20 hours.

After this 20-hour test, the two samples were opened up (dissected) to find the failure mechanism in Sensor 2-3. An abundance of agglomerated dust particles were found within the housing of Sensor 2-3, including a substantial quantity just inside the air inlet point. The tested LBA sensor housing was also opened up, and no dust was evident at the input port through which the air flowed before reaching the sensing element.

Test #2. In the second test, sensors LBAS250UF6S (# 1), and the same sensor LBAS050UF6S, Sensor 1-1 and Sensor 3-1 were connected in parallel to the dust chamber, in the first configuration shown in Fig. 2 (with the sensors arranged horizontally at the same level as the dust chamber). The test was run for 18 hours at a constant differential pressure ΔP = 450 Pa (1.6 inH2O). This applied pressure was close to the full-scale of Sensor 3-1, and above the full-scale of all of the other three sensors in the test, such that their output voltage was saturated during the test.

The coarse-characterization results are show

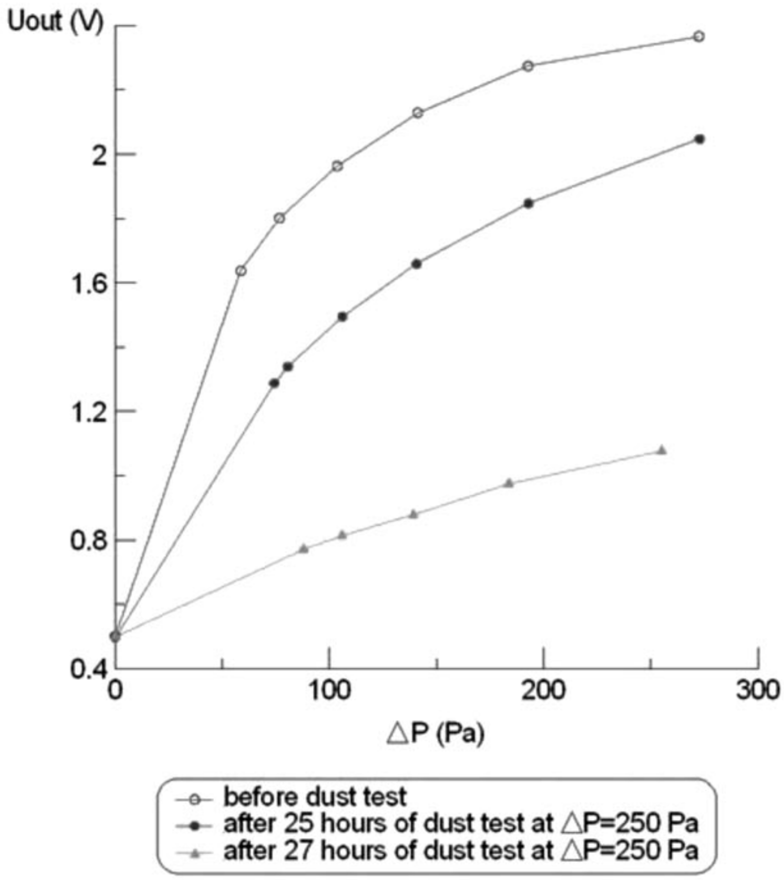


Fig. 8. Test #3 results for Sensor 2-2 (vertical orientation of the sensor)

in Figs. 5 to 7. The before-and-after fine characterization results for LBA samples are shown in Figs. 10 and 12. It is clear from the results in Fig. 5 that Sensor 1-1 has already significantly changed its calibration after 1 hour, and that its output has dropped by more than 50 % after 2 hours of exposure to dust-bearing air.

Note also that after 2 hours the zero-offset has also changed.

It is clear from the results in Fig. 6 that Sensor 3-1 has effectively completely failed between 2 hours and 18 hours of dust exposure.

Fig. 7 shows that the LBAS250UF6S (#1) sensor's coarse response curve is relatively unchanged after 1 hour, 2 hours, and 18 hours. Furthermore, the characterized before-and-after comparison in Fig. 10 confirms that indeed this sensor's response is unchanged after the full 18 hours of dust exposure.

Fig. 12 shows results for the LBAS050UF6S sensor, which is the same sample that was used in the first comparison test described in TEST #1 earlier in this report. Again, the before-and-after measurements confirm that indeed this sensor's response is unchanged after the 18 hours plus previous 20 hours of dust exposure.

The dramatic difference between Sensors 1-1 and 3-1 and the LBA sensors is not surprising, since again the difference in flow impedance is two orders of magnitude or more. Again far more air volume went through Sensors 1-1 and 3-1, and again the flow velocity of dust-bearing air toward Sensors 1-1 and 3-1 was also many times faster.

Again, the few inches of transparent connection hoses to Sensors 1-1 and 3-1 had visible dust residue within them, while far less dust residue was visible within the connection hoses to the LBA sensors.

Test #3. In the third test, two LBA sensors

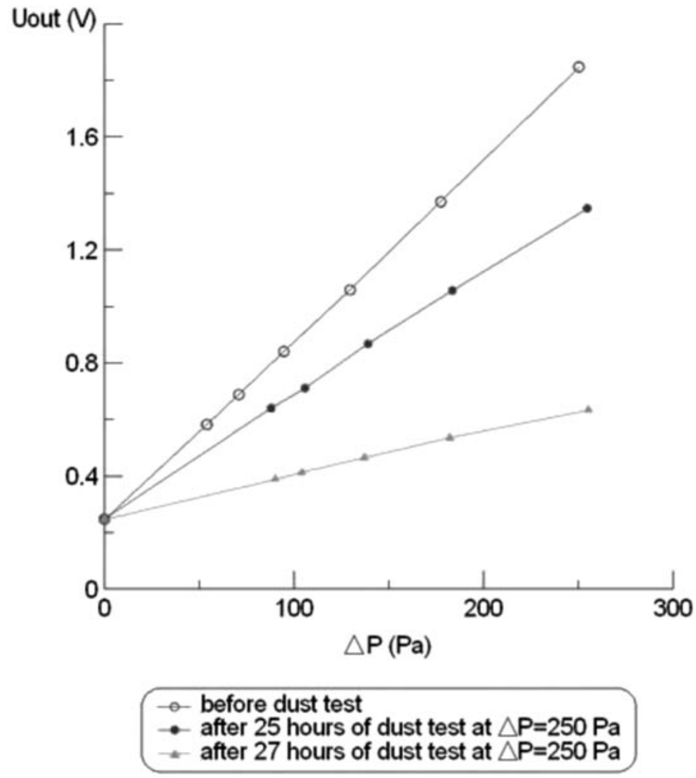


Fig. 9. Test #3 results for Sensor 3-2 (vertical orientation of the sensor)

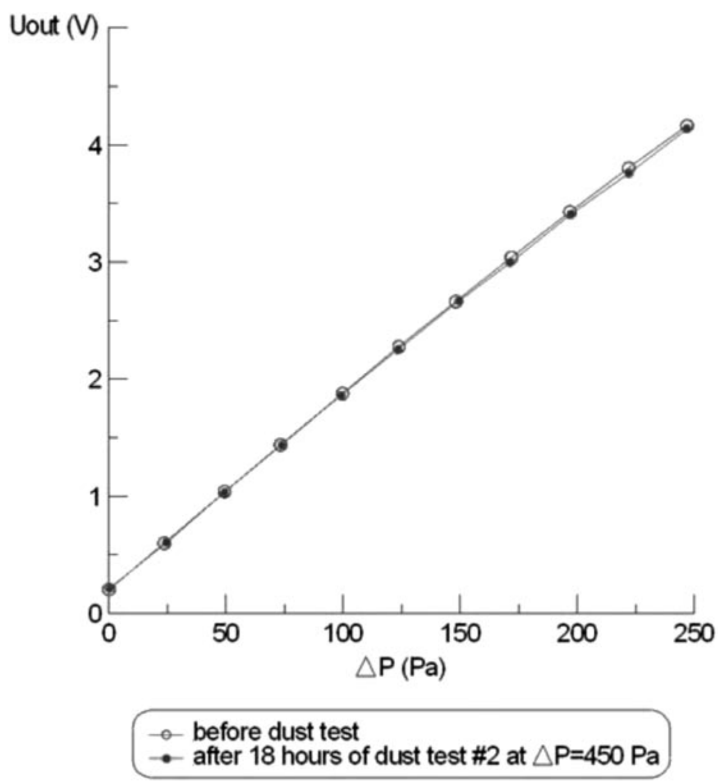


Fig. 10. Fine-characterization results for LBAS250UF6S (# 1)

already used in previous tests described above, sensor sample LBAS250UF6S (# 2), and sensor sample LBAS050UF6S, along with Sensor 2-2 and Sensor 3-2 were connected in parallel to the dust chamber, in the second configuration shown in Fig. 3 (with the sensors arranged vertically, above the dust chamber).

The test was run for 27 hours at a constant differential pressure ΔP=250 Pa (1 inH2O). This applied pressure was within the sensing range of Sensor 3-2, near the full-scale of LBAS250UF6S, and above the full-scale of the remaining two sensors in the test, such that their output voltage was saturated during the test.

The coarse-characterization results are shown in the graphs in Figs. 8 and 9. The before-and-after fine characterization results for LBA samples are shown in Figs. 11 and 12.

Note:

Both LBA sensors are the same sensor samples that were already exposed to many hours of dust-bearing air pressure in TEST #1 and TEST #2 above.

The results in Figs. 8 and 9 show that when the sensors are oriented vertically above the dust chamber, it takes much longer for the sensors under test to be affected. Sensor 2-2 and Sensor 3-2 have both significantly lost calibration after 25 hours, and have continued to lose calibration more severely after two more hours (total 27 hours of dust exposure for each sensor). This is not surprising, since the effect of gravity acts to delay and reduce the flow of dust particles upward toward the sensor inputs.

Fig. 11 shows that the LBAS250UF6S (#2) sensor's fine-characterized response curve is still unchanged after these additional 25 + 2 = 27 hours of dust exposure, beyond the original 20 hours of dust exposure from Test #1.

Fig. 12 shows that the LBAS050UF6S sensor may be finally beginning to change its calibration slightly (by a few per cent), after these additional 25 + 2 = 27 hours of dust exposure, beyond the original 20 + 18 = 38 hours of dust exposure from Test #1 and Test #2. It is not surprising that the

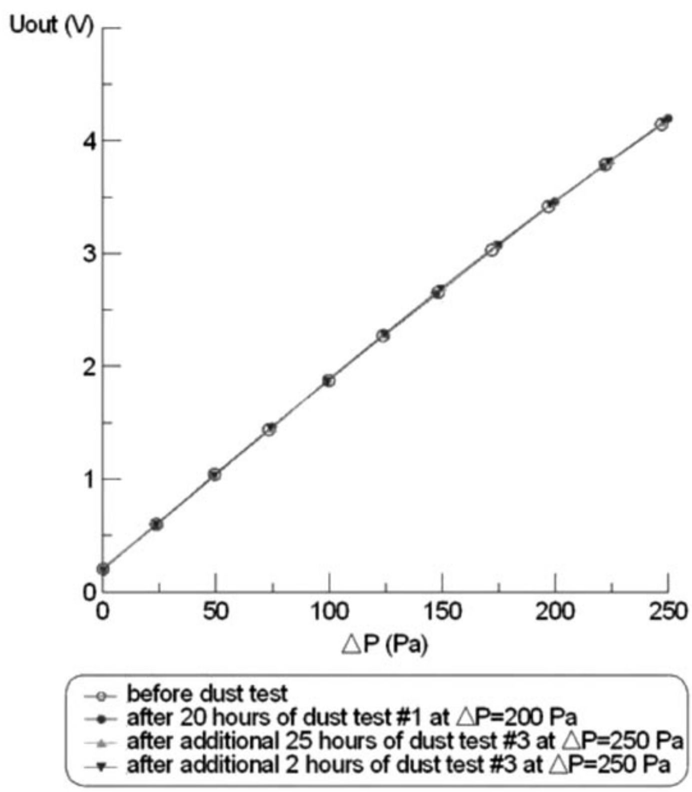


Fig. 11. Fine-characterization results for LBAS250UF6S (# 2)

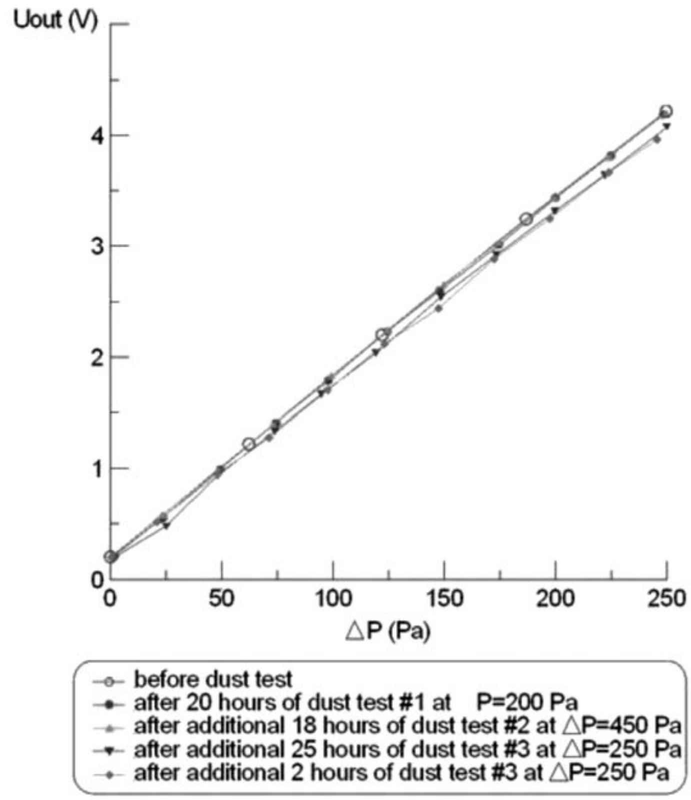


Fig. 12. Fine-characterization results for LBAS050UF6S

LBAS050UF6S sensor would begin to be affected before its neighbor LBAS250UF6S, because of its lower flow-impedance of ~30 kPa/(ml/s) vs. ~80 kPa/(ml/s).

Again, the dramatic difference between the Sensors 2-2 and 3-2, and LBA sensors is not surprising, since again the difference in flow impedance is two orders of magnitude or more. Again, far more air volume went through Sensors 2-2 and 3-2, and again the flow velocity of dust-bearing air toward Sensors 2-2 and 3-2 was also many times faster.

Again, the few inches of transparent connection hoses to Sensors 2-2 and 3-2, even when vertically oriented, had visible dust residue within them, while almost no dust residue was visible within the connection hoses to the LBA sensors. This is again consistent with the notion that the high flow-impedance of LBA sensors has limited the air-flow volume and velocity to such an extent that most of the dust has fallen out of suspension before reaching the LBA sensor.

Conclusions. For differential pressure (ΔP) sensors based on the thermal-anemometer sensing principle, involving small leakage through the sensor's airflow channel, the flow-impedance of that air-flow channel is an extremely important factor in determining the sensor's ease of use and immunity to dust-contamination.

With dust in the air flow, First Sensors LBA sensors having flow impedance >10 kPa/(ml/s) were compared directly with three other manufacturers' sensors using the same sensing principle, but having flow impedances of 15 Pa/(ml/s) to 300 Pa/(ml/s). In all cases the sensors having lower flow impedance lost calibration and/or failed completely after hours to tens of hours of normal operation. First Sensors LBA sensors did not show significant change of calibration.

The high flow impedance causes several effects:

- It reduces the volume of dust-bearing air which can approach the sensor's input;

- It reduces the velocity of air flow toward the sensor's input, allowing more dust to drop out of the flow before it reaches the sensor's input;
- It reduces the force on dust particles at the input of the sensor's flow channel.

When the air flow connection to the sensor is oriented vertically such that the flow of dust-bearing air must rise toward the sensor input, the effect of dust exposure is reduced.

Essentially, the less air-flow the sensor requires through its body to make its measurement, the more ideal is the behavior of the sensor, and the better is the immunity to dust-bearing air. First Sensors LBA ΔP sensors provide very high flow impedance and therefore substantial advantages.

Potential users of thermal-anemometer-based ΔP sensors are invited to repeat the same or similar dust tests to verify suitability for use in the conditions of their own application(s).

THIEME, T. *Silicon Saxony e.V.*
01099, Dresden, Germany, Silicon Saxony e.V.
E-mail: info@silicon-saxony.de

ТИМЕ Торстен – *директор по инновационным продуктам, «Кремниевая Саксония».*
01099, Dresden, Germany, Silicon Saxony e.V.
E-mail: info@silicon-saxony.de

UDC 621.3

L. Rissing, A. Belski, T. Creutzburg, T. Griesbach, M. Kaiser, A. Wienecke, M. Wurz

MAGNETIC MEMS

Magnetic MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) gained much of importance during the past 25 years. Today for example magnetic MEMS are part of the sensor network in cars. Magnetic sensors measure the rotation of the wheels to generate the information necessary for the ABS (anti-lock brake system) or for stabilization systems like ESC (Electronic Stability Control). They are also used to measure the angle of the stirring wheel as a basic part to implement the drive by wire concept. Another important field of application is the consumer electronic. MEMS are used as a part of an electronic compass. There are many more examples for magnetic sensors and actuators. We will present some examples for magnetic sensors and actuators developed during the last four years at the Institute for Micro Production Technology (IMPT) in Hanover.

MEMS; MAGNETIC SENSORS; MAGNETORESISTIVE DEVICES; MODULAR SYSTEM; EDDY CURRENT SENSOR; WRITE HEAD; HEARING AID IMPLANT; ACTIVE MICROOPTICAL SYSTEM.

Л. Риссинг, А. Бельски, Т. Гритцбург, Т. Грисбах, М. Кайзер, А. Винеке, М. Вюрц

МАГНИТНЫЕ МЭМС

В течение последних 25 лет магнитные микроэлектромеханические системы (МЭМС) приобрели важное значение в различных областях. Сегодня, например, магнитные МЭМС являются частью сенсорной сети в автомобилях. Так, магнитные датчики измеряют скорость вращения колес и генерируют информацию, необходимую для антиблокировочных систем или для электронных систем стабилизации. Магнитные датчики также используются для измерения угла перемещения колеса в качестве чувствительного элемента в системах привода проводного типа. Другой важной областью применения является отрасль бытовой электроники. Датчики МЭМС используются как часть электронных компасов. Существует много других примеров применения магнитных датчиков и исполнительных механизмов. Мы представим некоторые примеры для магнитных датчиков и исполнительных механизмов, разработанных в течение последних четырех лет в Институте производственных микротехнологий (IMPT) Университета Ляйбница в Ганновере.

МЭМС; МАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ; МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА; МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА; ДАТЧИК ТОКА EDDY; ЗАПИСЫВАЮЩАЯ ГОЛОВКА; ИМПЛАНТЫ ДЛЯ ПЛОХОСЛЫШАЩИХ; АКТИВНАЯ МИКРООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

I. Introduction

During the last four years the research activities at the IMPT in Hanover have been focused on the following topics. An important issue has been to find new fields of application for magnetic MEMS. Today, the basic principles of magnetic sensing and actuation are investigated in detail and in most cases well understood. But there is an ongoing demand to develop not only a simple sensor but a complete system to facilitate the application of the sensor. As a consequence other areas of technology have to be covered. For example data processing is very important and normally electronics is an essential part of MEMS. One of the key steps to realize a microsystem successfully is the packaging of the system. The advanced packaging technologies are relevant to achieve connectivity, robustness, and reliability and to allow an easy handling. It has to be taken into consideration that not only the thin-film processing is relevant for the costs. Packaging and testing is an important cost factor in the production process of MEMS.

It is necessary to concentrate not only on the thin-film processes to fabricate the sensor and actuator elements, but also on the packaging technologies to consider all these aspects during the design phase. To realize MEMS systems starting with the design from scratch it is also essential to develop the fabrication process in a holistic approach simultaneously.

Nowadays, microsystems are known for very low prices per system. The low price level is caused by low production costs for high volume production. The batch fabrication allows low costs per component, because the production costs are divided by the number of systems simultaneously produced. This argumentation is true if the number of produced MEMS is high. As a result it is normally much more difficult to start a low volume production. Therefore, it is necessary to find production processes to fabricate individualized sensors at an affordable cost level.

II. Industrial Applications

A. Industry 4.0 – Gentelligent components

Currently, the buzzword "industry 4.0" is very popular. Starting the Collaborative Research Center (CRC) 653, that is funded by the German Research Foundation (DFG), in 2005 the group of researches addressed many of those topics which are of importance also for the industry 4.0 today. The novel approach targeted the aim to enable the components to make experiences themselves during their life time, to collect and store information, and to pass this information to improve the next generation of components. A new word has been created and the components being able to collect and store information in their life time become genetically intelligent (short "gentelligent") [1]. This term has been chosen according to the transfer of information by genes in biology, although this technical process shows significant differences.

An important issue is that the components have to be able to gather data and to store the information. Accordingly, sensors have to be part of or have to be fused with the components. The IMPT has developed a variety of various sensors which have been directly attached to the surface of the respective component. Strain gauges, eddy current sensors, strain gauges, and anisotropic magnetoresistive sensors have been realized. These sensors have been developed to equip machine parts and tools with sensors to implement the sensing machine. As a consequence the volume is limited and a modular concept has been designed to reduce costs [2]. In the beginning a conventional process was applied. Silicon was used as a substrate material and after the thin-film processing the wafers were diced and thinned. The drawback of this procedure is that the sensor elements have been separated from the surface of the machine part or tool by the remaining silicon. The next approach was to use sacrificial layers. These sacrificial layers were dissolved using etchants. The sensor layers were embedded into a flexible polymer used as a handling framework. Summarizing the results it could be shown, that dissolving is possible, but the handling of the sensor foil has been a high challenge. If the sensors are separated from the silicon wafer in a ensemble, the polymer membrane unfurls and the sensors cannot be separated by dicing and handled afterwards. Separating the sensors before starting the dissolving process allows to dicing the wafer but handling of the sensor foils is still a challenge. In the context of the CRC 653 a new approach was developed taken all process steps starting with the thin-film process, the sensor separation, and the handling and application into account. In Fig. 1 the process for substrateless sensors is described.

The sensors are fabricated starting with a silicon substrate. As a first step the contact pads are deposited followed by an embedding layer of a polymer. On the polymer layer made of polyimide, the sensor layers are deposited and structured by photolithography and lift-off processes. The design presented in Fig. 1 shows an eddy current sensor. A single-turn excitation coil of copper generates the magnetic field. The sensing element is an AMR (Anisotropic Magneto Resistive) sensor realized as a meander-type resistor made of NiFe. Finally, the sensor is covered by a second polymer layer. After finishing the thin-film process, the backside material is etched and as a result the sensor membrane is only fixed to a frame of

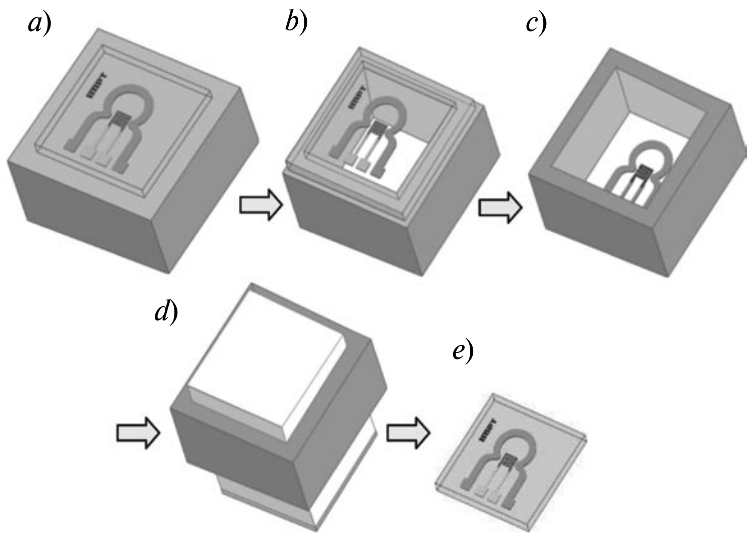


Fig. 1. Process for substrateless sensors

silicon (Fig. 1 *b*). In Fig. 1 *c* the wafer is turned. Using a stamp, the sensor can be solved from the carrier and attached to the machine part or tool (Fig. 1 *d*). In Fig. 2 the processed wafer is shown. The detail is revealing the structure of the eddy current sensor.

Fig. 3 depicts a sensor fixed to the frame provided by the silicon grid and the sensor after the stamping process.

The sensor design offers the possibility to realize four different kinds of sensors using the same set of photolithography masks and by depositing different materials [2]. In addition to the eddy current sensor, a temperature sensor, a sensor to measure the magnetic field, and a strain gauge sensor can be fabricated. This increases the flexibility and reduces the costs if only small piece numbers of sensors are produced.

The design and fabrication of the eddy current sensor was presented previously [3]. The measurement results were presented before as well [4]. The basic principle of the sensor is depicted in Fig. 5. The sensors are shown in Fig. 6. The eddy current sensor was used to measure the surface topography of a machined sample and the results were compared to the data gained by a confocal measurement. The qualitative comparison of the measured signals shows a very similar curve progression (Fig. 7).

The principle design has also been used to realize a strain gauge sensor. Only the meander-type sensor has been taken for this purpose. Although the layout is not optimized for a strain gauge, because the length and width of the sensing wire does not differ much from the connecting elements, the sensitivity

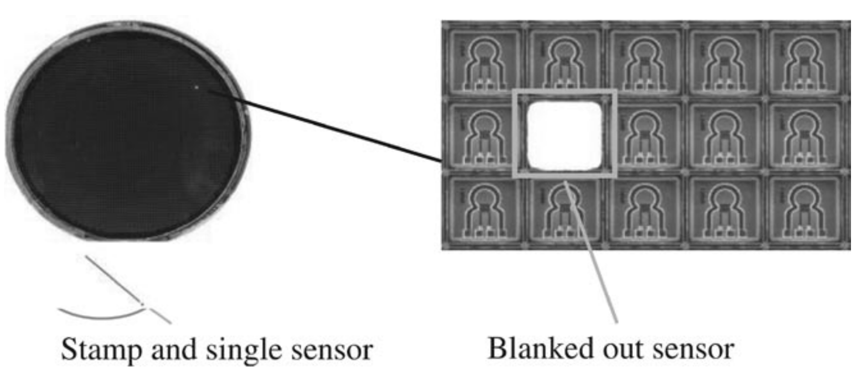


Fig. 2. Wafer with stamping tool, enlarged view of the wafer

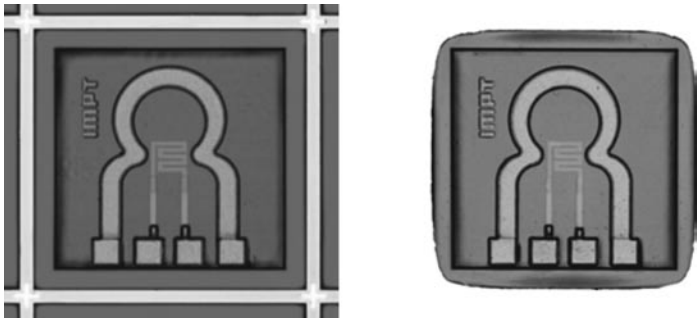


Fig. 3. Sensor fixed to the silicon frame and after the stamping process.
The size of the sensor is about 1 mm²

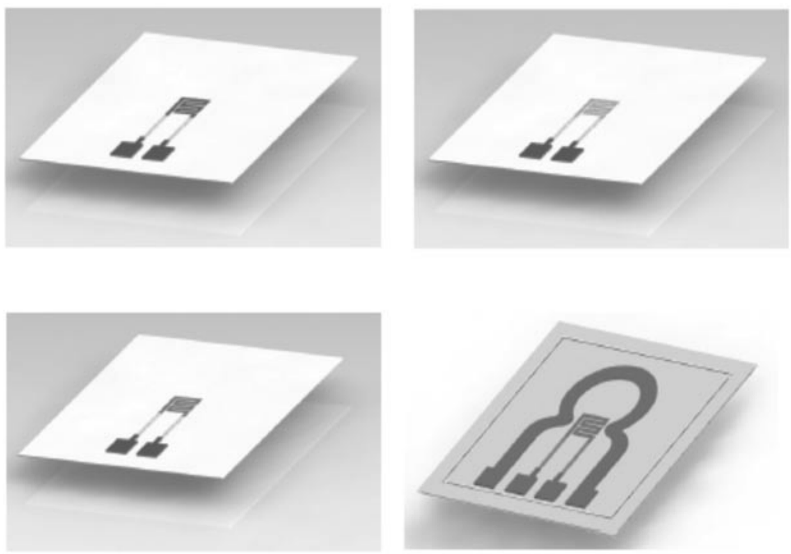


Fig. 4. These four different sensor types can be fabricated with the same set of photolithography masks

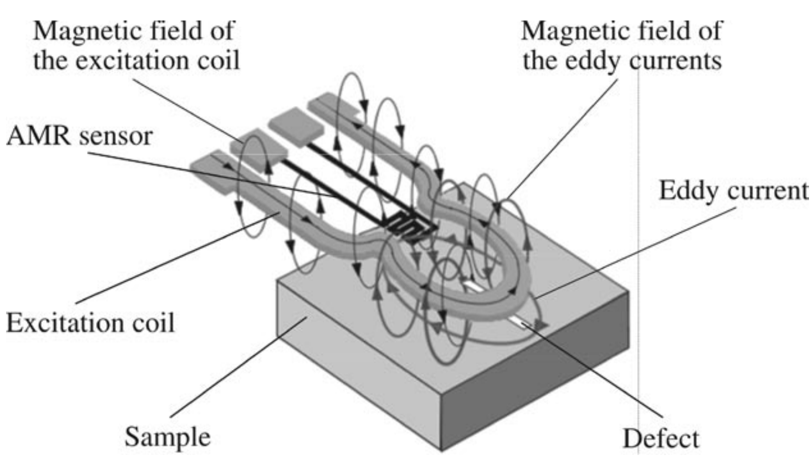


Fig. 5. Working principle of the modular eddy current micro sensor [4]

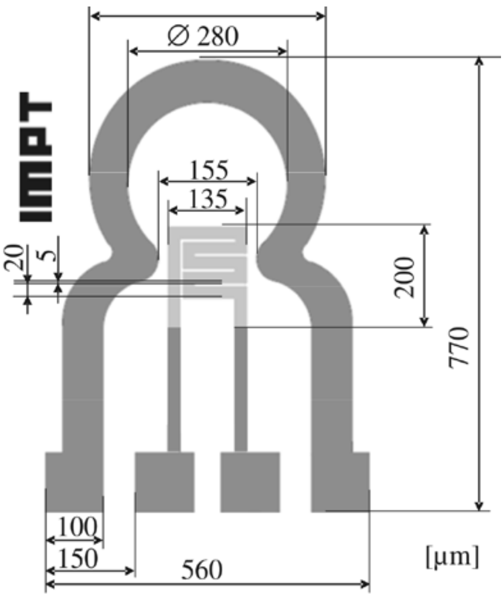


Fig. 6. Sensor dimensions [4]

is astonishing. Because of the thin polymer encapsulation layer, the sensing element is positioned in a close distance to the surface of the loaded part. The sensing structure is separated by less than a 8 μm polyimide film and a thin adhesive layer. 28 of these sensors have been integrated in the z-axis of a machining center and deliver strain and elongation values during the machining process.

In the framework of the CRC 653, the IMPT also designed a write head to store information magnetically in the surface of magnesium. Magnesium typically is not hard magnetic. The Institute for Material Science (IW, Hanover University) developed a new material for this purpose. To do so, hard magnetic material was embedded into a magnesium matrix.

The first approach used ferrite material to pattern a conventional write head [5]. The head has been fabricated applying a dicing process. This is a grinding process used for profiling. The coil is wound around the magnetic core.

Because the surface of the parts to carry the information is not flat, the challenge is to build a flexible and adaptable write head. Another desired feature is a direct control of the written data. This requires the implementation of a read-after-write procedure.

The first flexible head design was presented in [5]. The schematic view of the write head is shown in Fig. 8.

First a copper foil-cladded polymer is processed. The copper coils are fabricated by etching the copper layer. Holes are drilled into the foil. Then a pre-structured NiFe foil is bonded to the backside of the polyimide by a double-sided adhesive tape. NiFe creates a softmagnetic backside layer. Fig. 9 shows the process to form the first part consisting of polyimide carrier and Cu coils.

In the second step, the NiFe foil is bonded to the Cu module. This is depicted in Fig. 10.

The assembly group is flipped over and the gap area is realized by electroplating into a photoresist form Fig 11.

The finished assembled head is shown in Fig. 12. Also depicted is a detailed view of the air gap region.

It is important to mention, that the heads are produced in a batch fabrication process. The processed foils have been clamped to a holder. The substrate size is 4 inch.

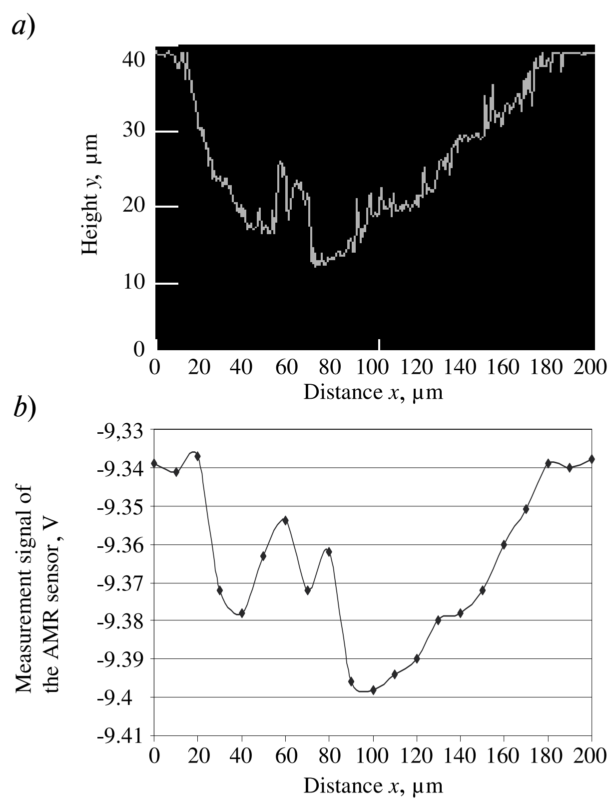


Fig. 7. The surface profile measured with *a* — a confocal microscope; *b* — the eddy current sensor [4]

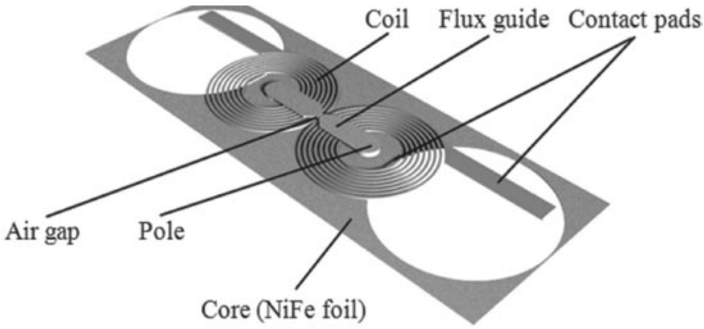


Fig. 8. Schematic view of the flexible write head [5]

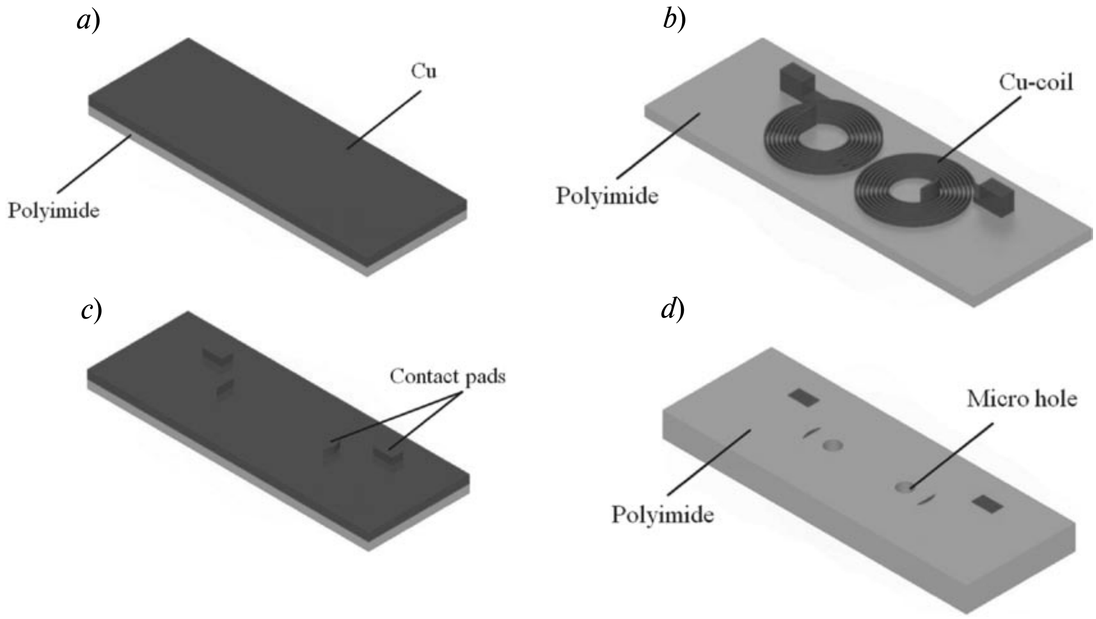


Fig. 9. Processing of the first side of the polyimide foil:
a – Cu foil-cladded polyimide; *b* – reinforcement of the contact pads;
c – etching of the Cu coils; *d* – embedding in polyimide [5]

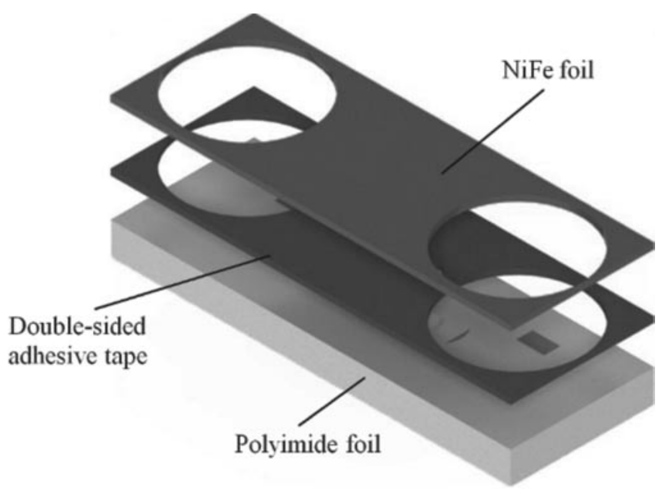


Fig. 10. Assembly of NiFe foil and coil module [5]

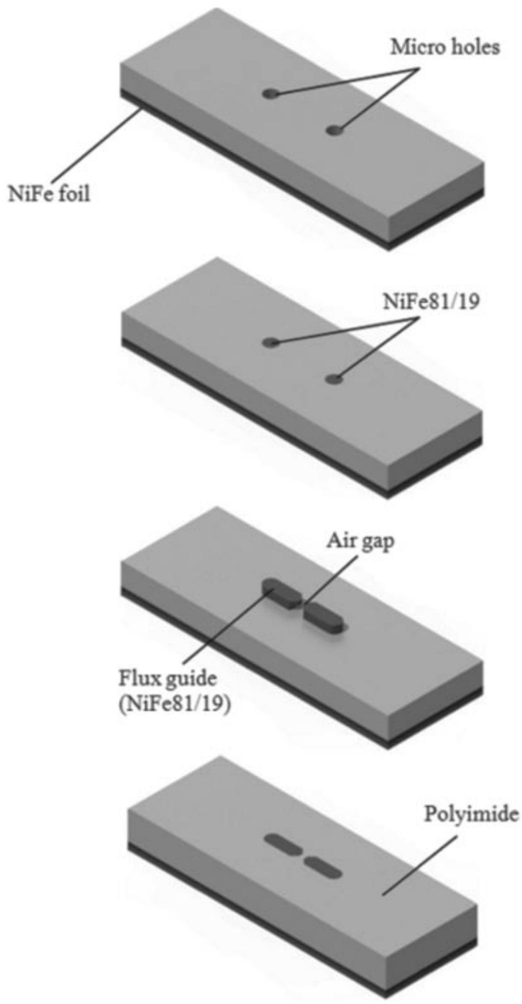


Fig. 11. Electroplating to form the air gap [5]

B. Highly sensitive earth magnetic field sensor

The goal of the project called Gebo funded by the German State of Lower Saxony is to develop new technologies necessary for geothermal drilling activities. To reach zones of exploitable thermal energies in Lower Saxony it is necessary to drill into a depth up to 6,000 m. The task of the IMPT was to design new magnetic sensors to measure magnetic fields in that depth. The challenges are the extreme temperatures, the low magnetic field strength, and the necessary robustness of the sensor. The sensors have to operate at temperatures up to 250 °C.

As sensor principle a GMR (Giant Magneto Resistive sensor) was chosen. The design of choice is that of a spin valve sensor. The layer sequence can be seen in Fig. 14.

The spin valve has been tested up to temperatures of 250 °C and it could be proven that the system is stable for several hundreds of hours.

The complete sensor layout is shown in Fig. 15. The system consists of four GMR sensors connected to a wheatstone bridge. Two of the sensors are covered with softmagnetic material to protect them against the magnetic field. They are used to compensate the influence of the temperature. The softmagnetic layer is also used to concentrate the field near to the measuring spin valves.

The sensor has been tested to evaluate the reliability. As a test sequence a thermal shock according to the MIL Std. 883 d was applied. The temperature has been alternated from −70 °C to 205 °C and vice versa in 10 s

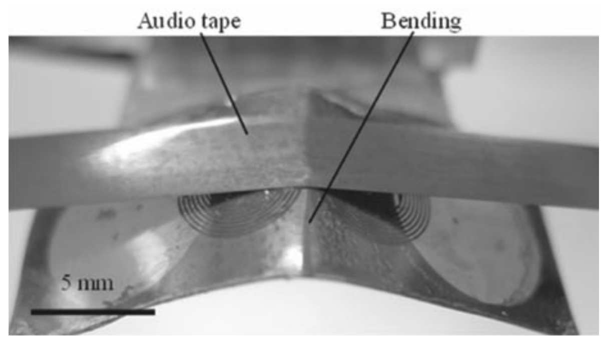


Fig. 12. Flexible write head writing data on an audio tape [5]

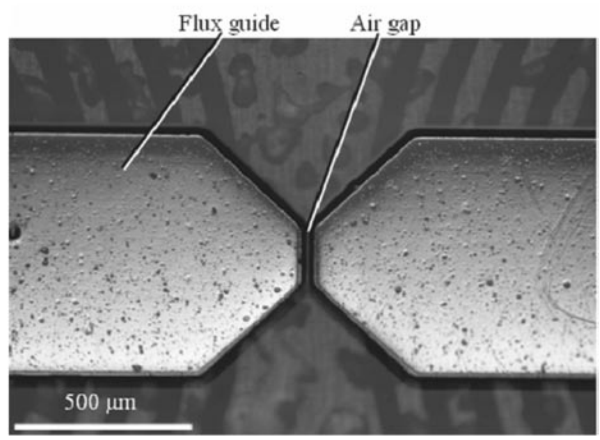


Fig. 13. Detail showing the air gap between the electroplated flux guides [5]

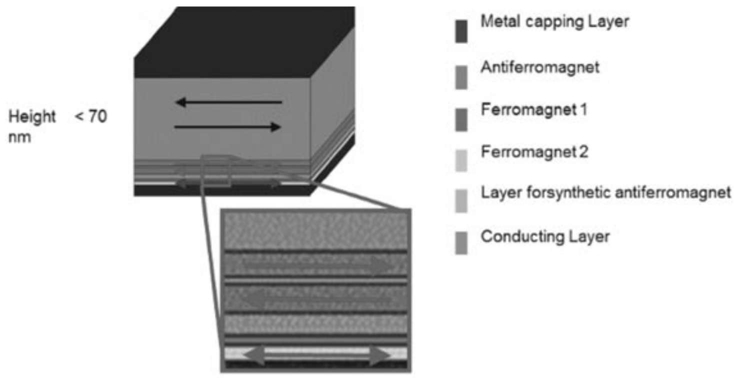


Fig. 14. Layer sequence of the spin valve system [6]

shifting time. The completed sensor is shown in Fig. 16.

III. Medical applications

A. Pole row for stem cell Transfection

The central topic of the CRC Transregio 37 was the investigation and development of micro and nanosystems for medical applications. Within the scope of the cooperative research in cooperation with the The Department of Cardiac Surgery, University of Rostock, Germany, the IMPT developed a pole row to transport nanoparticles. The nanoparticles were filled with genetic material. Shifting the magnetic field from one pole to the next by powering the poles sequentially, the nanoparticles are transported to the last pole in the row. A stem cell was placed at this point. When the stem cell is brought into contact with the genetic material the probability is high that a transfection takes place as intended.

The basic principle of the sensor function and its fabrication was presented in [8]. The small sensor was integrated in a PCB board and a well structure was added to the board to allow an easier handling [Fig. 17].

To improve the system capability, the silicon substrate was replaced by a substrate made of glass. The advantage of this approach is that glass is transparent and microscopic methods

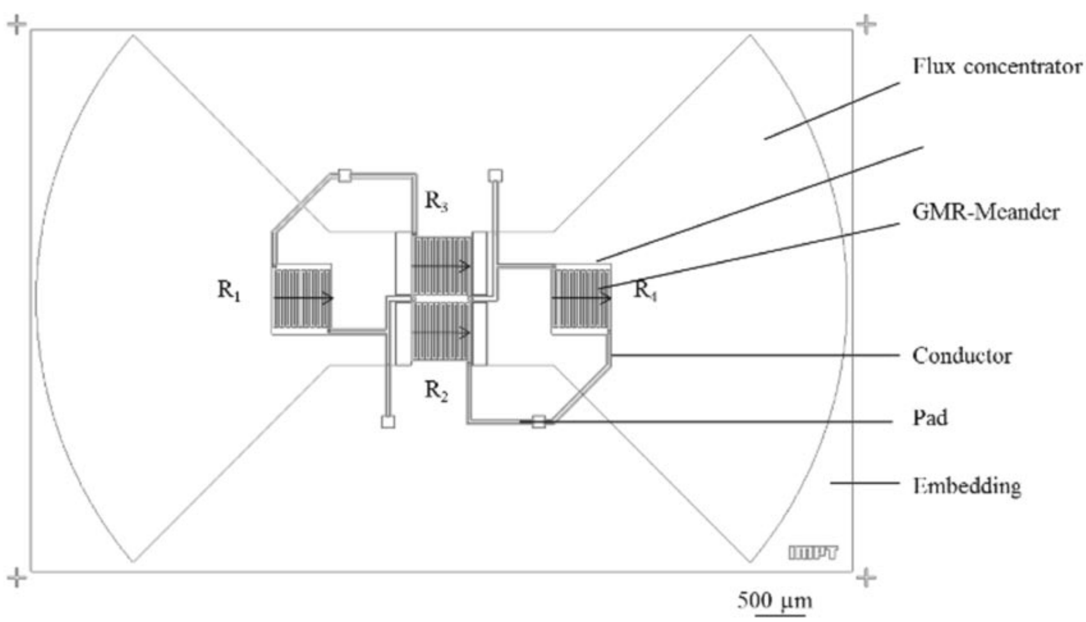


Fig. 15. Sensor design [7]

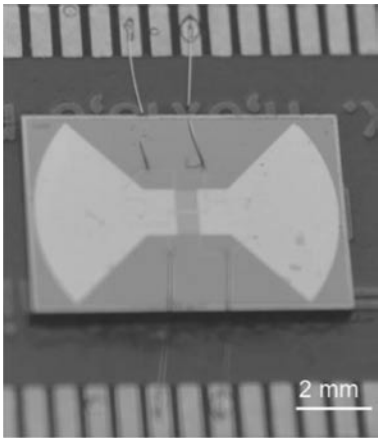


Fig. 16. Magnetic sensor for measuring low magnetic fields [7]

using transmitted light could be brought into action. To observe the transfection process, it was necessary to redesign the magnetic pole in the center of the coils. It could be shown that although the flux concentrator was missing the function of the pole row was still present. Another improvement was that the feed cables were covered with a thick layer of a polymer to suppress the influence of the magnetic field surrounding the powered lines. In Fig. 18 the new design is depicted as a schematic. In Fig. 19 a photo of the system is presented.

The pictures in Fig. 20 show that the material is transparent for the wavelengths 405 nm, 488 nm, and 561 nm, respectively.

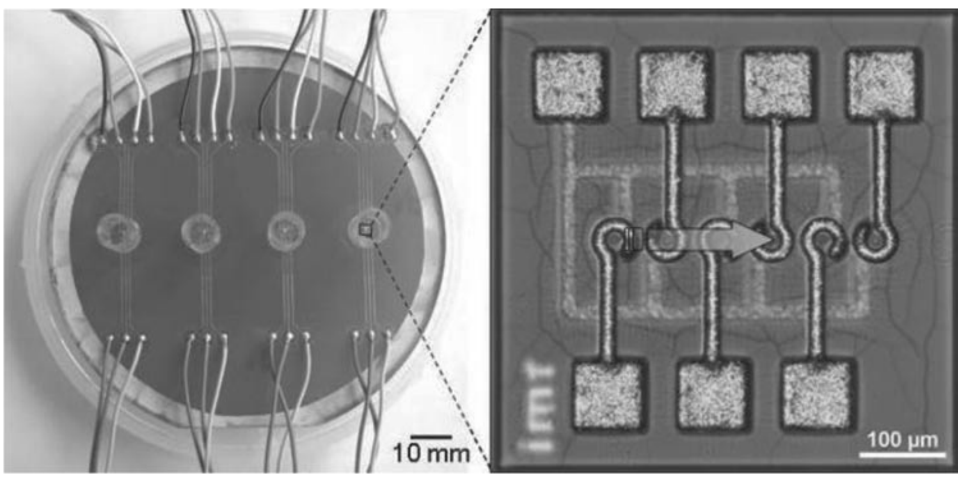


Fig. 17. PCB wafer with pole rows and well structures, detailed view of the system fabricated on a silicon substrate [8]

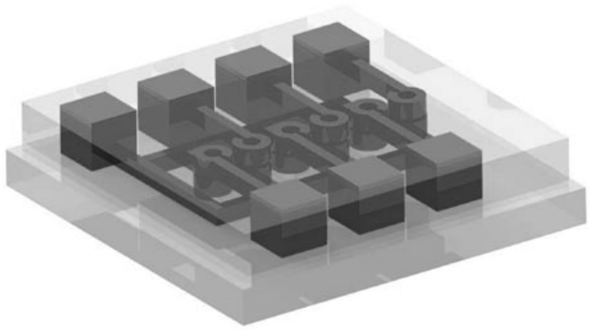


Fig. 18. Schematic view of the pole row fabricated on a glass substrate [8]

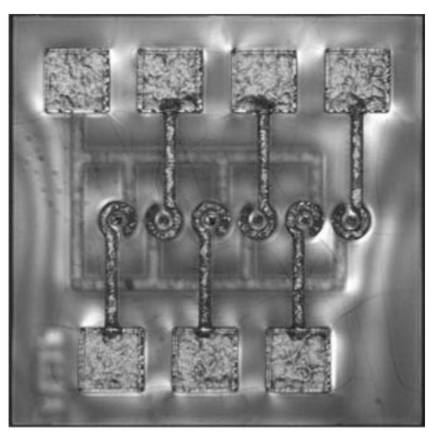


Fig. 19. Pole row fabricated on glass [8]

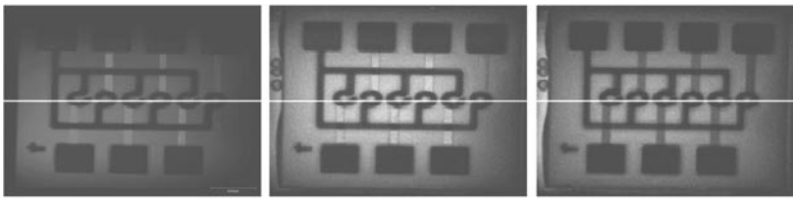


Fig. 20. Illumination of the pole row with blue, green, and red light, often used to visualized marked material [8]

B. Hearing aid implant

The partial or complete loss of the hearing ability of an adult represents a strong cut into the person's quality of life. For children this can have direct consequences on the development of the ability to learn to speak. Hearing aids can help to minimize the influences of a loss of the hearing ability. In cooperation with the Hannover Medical School a new implantable hearing aid has been developed. The hearing aid consists of an electro-mechanical microactuator, which is connected to the round window of the perilymph. The vibration is transferred to the membrane and the signal is transported to the hair cells. To reduce the costs a batch fabrication process has been chosen.

The principle design is shown by the model in Fig. 21.

The system consists of two basic parts, the substrate carrying a coil system and a second wafer providing the membrane and the boss. The boss is holding the plunger which is coupled to the membrane of the cochlea.

Fig. 22 presents the coil system which is generating the magnetic field. Powering the coil, the force is attracting the membrane carrying the magnetic back iron.

The bottom substrate is made of aluminium oxide and the top part is based on silicon. The silicon is etched using a deep reactive ion etching process to create a free-standing membrane. The complete system is shown in Fig. 23. The footprint of the system is 2.3×2.5 mm. The dimensions of the plunger are (0.4×0.4×2.5) mm^3.

To improve the system properties the system has been redesigned. The next generation was built as a hybrid system. The coil is conventionally wound around a machined softmagnetic core. The membrane, the back-iron and the boss are realized in applying process steps persued in

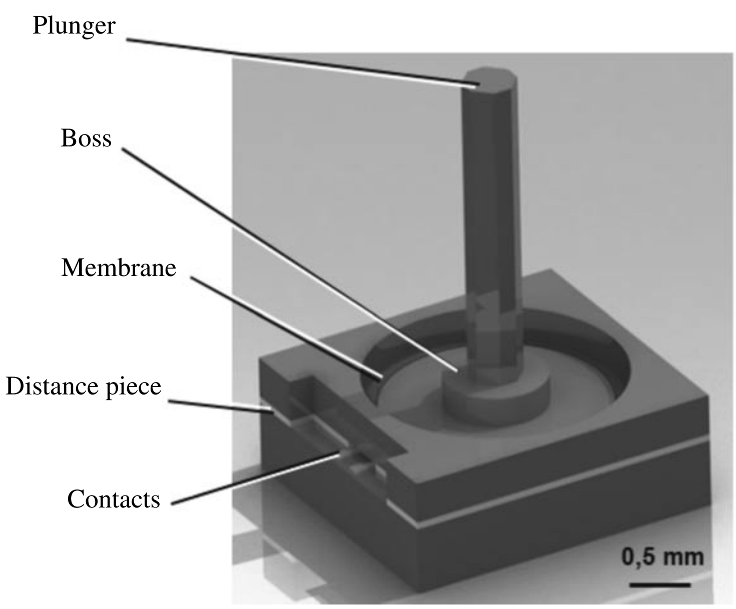


Fig. 21. Model of the hearing aid [9]

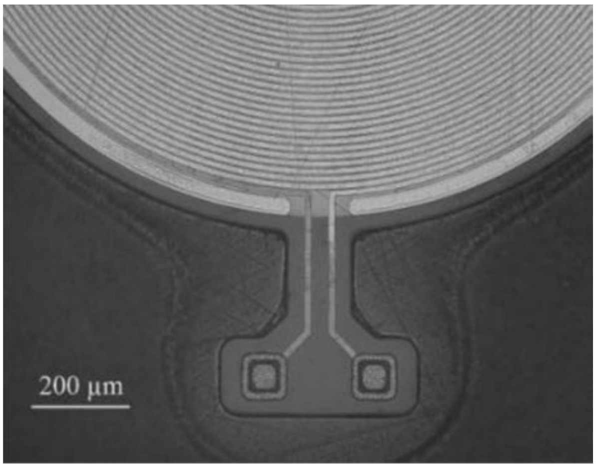


Fig. 22. Coil system [9]

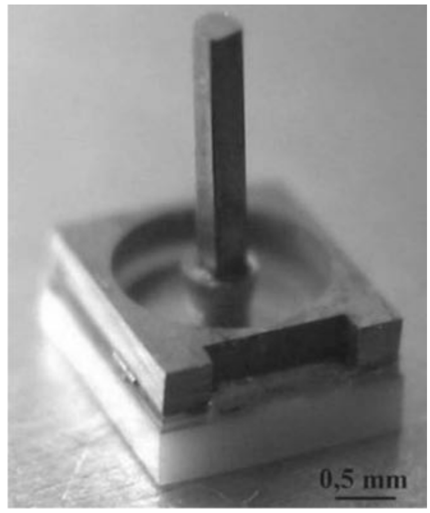


Fig. 23. Completed system of the hearing aid implant [9]

microsystem technologies. A picture of the new actuator system can be seen in Fig. 24.

C. Active microoptical system

There exists a demand for actuators which can be used to change the focal length by adapting optical lenses. These systems can be an essential part in autofocus systems or confocal microscopes. Together with the Hanover Centre for Optical Technologies (HOT) the IMPT has developed an actuator system to form a liquid lens. The coils of the microactuator generate a magnetic field and the magnetic force moves a ferrofluid in a microchannel. The movement of the ferrofluidic piston shifts a transparent fluid and a liquid lens is formed at the end of the channel. Fig. 25 shows a schematic drawing of the system.

Fig. 24. Picture of the redesign actuator

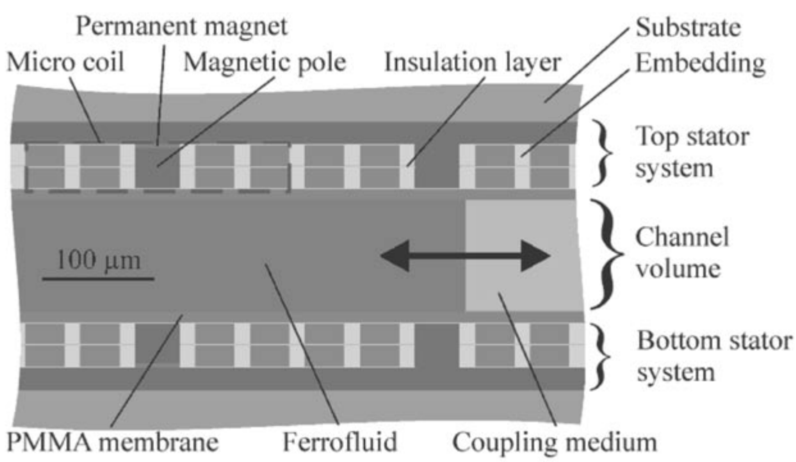


Fig. 25. Schematic drawing of the adaptive microoptical system [10]

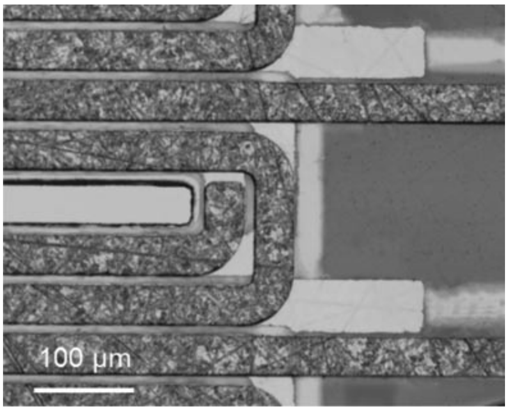


Fig. 26. Picture of the microcoils of the actuation system [11]

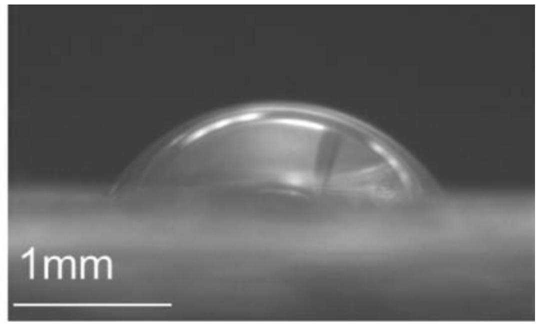


Fig. 27. Formation of the liquid lens [12, 13]

In Fig. 26 a magnified picture of the microcoils can be seen. The formed liquid lens by shifting the ferrofluidic plug is shown in Fig. 27.

Acknowledgment

This research has been sponsored in part by the German Research Foundation (DFG) within the Collaborative Research Center (CRC) 653 "Gentelligent Components in their Lifecycle", the CRC TR37 "Micro and nanosystems for medical applications", and the Priority Program 1337 "Active Micro-optics" and by the Gebo Project funded by the German State of Lower Saxony.

REFERENCES / СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lachmayer R., Mozgova I., Sauthoff B., Gottwald P.** Product Evolution and Optimization Based on Gentelligent Components and Product Life Cycle Data. *Smart Product Engineering Lecture Notes in Production Engineering*, 2013, Pp 685–694.

2. **Griesbach T., Wurz M.C., Rissing L.** Development and Fabrication of Modular Micro Sensors on Flexible Polymer Foils. *1st Joint International Symposium on System-Integrated Intelligence*, 2012, Pp. 66–68.

3. **Griesbach T., Wurz M.C., Rissing L.** Modular Eddy Current Micro Sensor, *In IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, Vol. 47, No. 10, Pp. 3760–3763.

4. **Griesbach T., Wurz M.C., Rissing L.** Design and Fabrication of a Modular Eddy Current Micro Sensor. in *PIERS Proceedings*, Marrakesh, Morocco, 2011, Pp. 752–755.

5. **Belski A., Wurz M., Rittinger J., Rissing L.** Development, Micro Fabrication and Test of Flexible Magnetic Write Head for Gentelligent Applications. *Proc. 38th Int. Conf. on Micro & Nanoengineering,* Toulouse, France, Microelectronic Engineering, 2013, Pp. 315–319.

6. **Wienecke A., Wurz M.C., Rissing L.** Integrierte Sensorik für Hochtemperaturumgebungen/ Integrated Sensor Systems for High Temperature Environments. GMM, VDI/VDE-IT (eds), *Tagungsband: Mikrosystemtechnik-Kongress. Von Bauelementen zu Systemen*, Aachen, 2013, Deutschland, Pp. 555–558.

7. **Wienecke A., Rissing L.** Thin film fabrication of a highly sensitive earth magnetic field sensor. *Tagungsband Smart Systems Integration, 8th International Conference & Exhibition on integration issues of miniaturized systems - MEMS, NEMS, ICs and electronic components*, 2014, Pp. 595–598.

8. **Kaiser M., Delaygina E., Steinhoff G., Rissing L.** Fertigung eines Mikroaktors zur Manipulation von Nanopartikeln auf einem Glassubstrat. *Mikrosystemtechnik-Kongress*, Aachen, Deutschland, 2013, Pp. 496–499.

9. **Creutzburg T., Cvetkovic S., Rissing L.** Herstellung eines Mikroaktors zur Anregung der Perilymphe bei Schwerhörigkeit. *Proc. Mikrosystemtechnik-Kongress*, Darmstadt, Deutschland, VDE Verlag GmbH–Berlin–Offenbach, 2011, Pp. 441–444.

10. **Schultheis T., Hoheisel D., Xiao W., Spani Molella L., Reithmeier E., Rissing L., Hardt S.** Performance of an Adaptive Liquid Microlens Controlled by a Microcoil Actuator. *Research Paper Journal Microfluid Nanofluid*, Springer Verlag, 2012, Vol. 13, Pp. 299–308.

11. **Hoheisel D., Schultheis T., Spani Molella L., Reithmeier E., Rissing L.** Konzept und Fertigung von Komponenten eines ferrofluidischen Mikroaktors. *Proc. Mikrosystemtechnik-Kongress*, Darmstadt, Deutschland, VDE Verlag GmbH—Berlin—Offenbach, 2011, Pp. 273—276

12. **Hoheisel D., Kruppe R., Rissing L.** *Design, Simulation and Fabrication Sequence of an Electromagnetic Microactuator for a Liquid Lens. M3-19, SMM*, 2013.

13. **Hoheisel D., Rissing L.** Thin Film Fabrication and System Integration Test Run for a Microactuator for a Tuneable Lens., *Proc. SPIE Photonics West*, San Francisco, USA, 2013.

RISSING, L. *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

РИССИНГ Лутц — *Prof., Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany, D.Eng.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

BELSKI, A. *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

БЕЛЬСКИ Александр — *сотрудник, Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

CREUTZBURG, T. *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

ГРИТЦБУРГ Том — *сотрудник, Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

GRIESBACH, T. *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

ГРИСБАХ Тим — *сотрудник, Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

KAISER, M. *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

КАЙЗЕР Маттиас — *сотрудник, Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

WIENECKE, A. *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

ВИНЕКЕ Аня – *сотрудник, Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

WURZ, M. *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

ВЮРЦ Марк – *сотрудник, Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany.*
An der Universität 2 30823 Garbsen, Germany.
E-mail: impt@impt.uni-hannover.de

УДК 621. 383.8

Ю.Д. Акульшин, М.С. Лурье, Е.Н. Пятышев,
А.В. Глуховской, А.Н. Казакин

БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИЙ МЭМС-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

На ряде примеров показана актуальность создания малогабаритных автономных источников энергии. Сделан краткий обзор конструктивных решений по прямому преобразованию в электричество энергии радиоактивного распада. Описаны известные разработки бета-вольтаических преобразователей. Приведены результаты сравнительного анализа предельных возможностей бета-вольтаических преобразователей для различных сочетаний полупроводникового материала и долгоживущего изотопа.

ТЕХНОЛОГИИ; МЭМС; ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ.

Yu.D. Akulshin, M.S. Lurie, E.N. Piatyshev,
A.V. Gluhovskoi, A.N. Kazakin

BETA-VOLTAIC MEMS CONVERTER

The given paper describes the design of the beta-voltaic converter with a regular relief textured surface. The design of some known beta-voltaic converters has been reviewed. We have also shown the comparison results of the specific power converter for various combinations of a semiconductor and long-lived isotope.

TECHNOLOGY; MEMS; POWER CONVERSION.

В связи с развитием микросистемной техники и началом проведения ряда амбициозных проектов, вплоть до многофункционального мониторинга планетарного масштаба, появилась необходимость в автономных источниках электроэнергии (генераторах), которые могли бы обеспечить многолетнее энергоснабжение микросистем, находящихся в недоступных местах. Такими местами могут быть объекты космического базирования, системы распределенного мониторинга земли, встроенные в каркасы зданий или в дорожные покрытия датчики и т. п. [1—3]

Даже приблизительный анализ возможных приложений изделий микросистемной техники позволяет выделить по отраслям деятельности следующие задачи, решение которых требует применения длительного автономного энергообеспечения.

Космонавтика

- функциональные микросистемы малогабаритных космических объектов (мониторинг параметров движения, температуры, давления, интенсивности и спектров облучения и т. д.);
- дежурные системы включения основной аппаратуры при достижении заданного внешнего параметра (например, изменения гравитации, магнитного поля, освещенности и т. п.).

МЧС и системы безопасности

Микросистемы распределенного многофункционального мониторинга, в т. ч.:

- сеть информационных датчиков в сейсмоопасных районах, районах расположения АЭС, прибрежных и внутриконтинентальных гидрологических сооружений и т. п., с целью своевременного предупреждения о надвигающихся катастрофических ситуациях природного происхождения;
- то же — внутри сооружений, труднодоступных конструкций и узлов, с целью предотвращения техногенных катастроф;
- системы информационных микродатчиков охраны периметра особо важных объектов и сооружений.

Газпром

Микросистемы распределенного многофункционального мониторинга, в т. ч.:

- МЭМС-контроля давления, температуры и расхода транспортируемого продукта вдоль газо- и нефтепроводных магистралей;
- МЭМС-диагностики состояния конструкций по длине газо- и нефтепроводных систем.

Строительство, ЖКХ и прикладная геология

- Встроенные системы мониторинга механических напряжений и других прочностных характеристик внутри строительных конструкций;
- мониторинг состояния и прочностных характеристик подземных энергетических магистралей;
- мониторинг ветровой нагрузки сооружений и строительных конструкций;
- распределенный многофункциональный мониторинг слоя вечной мерзлоты.

Генераторы, обеспечивающие энергоснабжение таких автономных микросистем, должны функционировать десятилетиями и быть соизмеримыми по габаритно-весовым показателям с другими МЭМС.

Электрохимические батареи, аккумуляторы и ионисторы такую задачу решить не могут. Очевидным решением задачи может явиться только атомная микроэнергетика. Тепловые атомные преобразователи, давно используемые в качестве автономных энергогенераторов, для решения данной задачи неприемлемы по массогабаритным показателям. Для этого пригодны только нетепловые преобразователи, которые могут напрямую преобразовывать энергию радиоактивного распада в электрический заряд. Для прямого преобразования могут использоваться два механизма распада радионуклида: альфа- и бета-распад. По соображениям безопасности рентгеновское излучение должно быть при этом минимальным. Немного выходя за пределы данной статьи, перечислим все известные к настоящему времени конструктивные подходы к решению проблемы.

Альфа-распад. Наиболее перспективное направление прямой трансформации альфа-распада рассмотрено в совместных работах Института космических исследований РАН (Москва) и Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» (Харьков). Это вторично-эмиссионный радиоизотопный источник тока (ВЭРИИТ), основанный на неравновесной эмиссии сверхтепловых электронов. Процесс реализуется при прохождении альфа-излучения трансурановых элементов через тонкие металлические пленки. Схематическое изображение преобразователя показано на рис. 1.

Физический принцип работы ВЭРИИТ состоит в том, что из-за разницы в коэффициентах вторичной электронной эмиссии пленок двух различных металлов бинарной ячейки происходит зарядка слоев относительно друг друга. КПД устройства достигает 10 %, а толщина одного пакета бинарных ячеек не превышает 1 мкм. Ценным

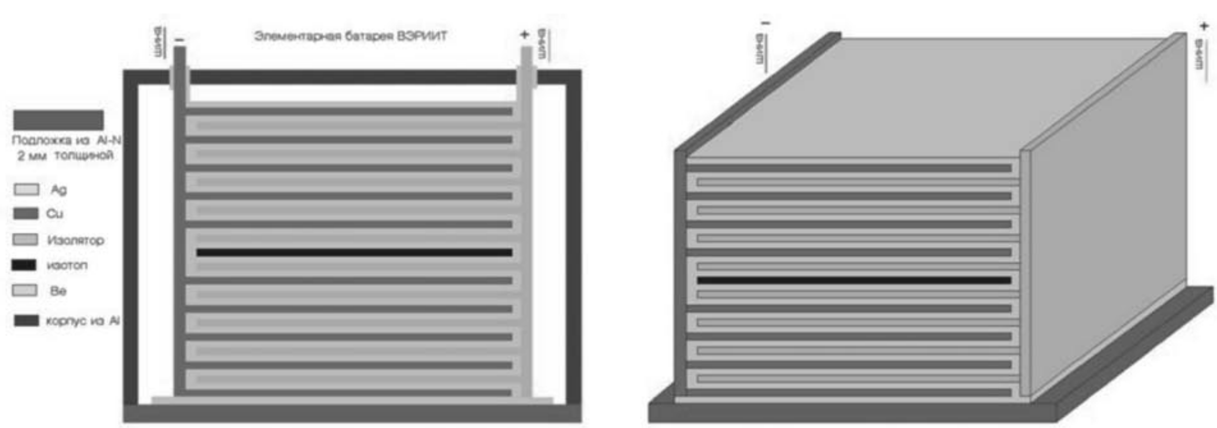


Рис. 1. Схема устройства вторично-ионного преобразователя

качеством таких преобразователей, способным обеспечить их применение не только в микросистемной технике, является принципиальная возможность конструирования устройств с мощностью от мкВт до кВт, путем последовательного и параллельного соединения исходных пакетов бинарных ячеек.

Другим способом использования альфа-излучения является способ двойного преобразования, в котором излучение изотопа трансформируется в фотонное излучение люминофора, которое преобразуется затем в электричество с помощью полупроводниковых структур. Данный способ по ряду причин применяется все реже.

Бета-распад. Недавно появилась новая разновидность конструкции изотопной батарейки – МЭМС с подвижным переносчиком заряда. В 2004 г. в Корнельском университете (США) с помощью объемной МЭМС-технологии был изготовлен элемент питания на изотопе Никеле-63, способный работать, по утверждению авторов, более 50 лет. Опытный образец имел форму куба с ребром, меньшим 1 мм. Внутри куба над слоем изотопа была установлена металлическая консоль (кантилевер). При распаде изотопа поглощаемое консолью излучение заряжает ее, и электрическое поле заставляет кантилевер сгибаться по направлению к слою изотопа. Замыкание консоли на изотоп снимает заряды, и консоль выпрямляется (рис. 2).

Пока изотоп распадается, консоль продолжает свои движения вверх-вниз, генерируя на выходе пульсирующее электрическое напряжение. Данные по параметрам не приведены, но можно предположить, что такая конструкция невелика по мощности. Проблематичной представляется также возможность безотказной работы упругой консоли в течение времени, соизмеримом с периодом полураспада Никеля-63 (100 лет).

Бета-вольтаический эффект. Работа бета-вольтаического преобразователя основана на том, что излученные при распаде электроны или позитроны высоких энергий, попадая в область *p-n* перехода полупроводниковой пластины, генерируют там электронно-дырочную пару, которая затем пространственно разделяется областью пространственного заряда (ОПЗ). Вследствие этого на *n* и *p*-поверхностях полупроводниковой пластины возникает разность электрических потенциалов. Принципиально механизм преобразования напоминает тот, который реализован в полупроводниковых солнечных батареях, но с заменой фотонного облучения на облучение электронами или позитронами бета-распада радионуклидов.

Для энергообеспечения изделий МСТ одним из важнейших становится требование уменьшения габаритов энергопреобразователя, т. е. требование максимальной удельной мощности – мощности на единицу объема преобразователя.

Работы по созданию бета-вольтаических микропреобразователей проводятся рядом фирм США и Японии. Проблемой, в частности, заняты исследовательская лаборатория американских ВВС (AFRL), фирма Medtronic, компания City Labs Inc., фирма

Рис. 2. Схема МЭМС-преобразователя энергии

Samsung и др. Некоторые изделия уже находятся в рыночном обращении.

Компания City Labs, Inc. (США) наладила коммерческое производство компактных тритиевых бета-гальванических элементов питания NanoTritium P100a (рис. 3) и выполняет контракт от ВВС США на разработку более мощных батарей. Согласно пресс-релизу производителя, NanoTritium™ может служить источником непрерывного питания в течение двадцати и более лет для различных платформ в микроэлектронике. Области применения: электроснабжение датчиков давления/температуры, медицинских имплантатов, полупассивных и активных систем идентификации, часов, SRAM-памяти, питание маломощных процессоров (например, ASIC, FPGA, и т. д.). NanoTritium™ доступна в нескольких конфигурациях напряжения/тока. Одна батарейка способна выдавать от 0,8 до 2,4 В при токе от 50 до 300 нА в течение 20 лет, т. е. вырабатывает постоянную мощность порядка 0,1–0,2 мкВт.

Основой батарейки является объемный диод, формируемый в каналах пористого кремния. Средние размеры каналов и кремниевых промежутков составляют порядка 1 мкм. Эффективная площадь объемного *p-n* перехода на пористом слое во много десятков раз превышает площадь плоской поверхности. Источником энергии в NanoTritium™ является бета-распад трития, введенного в состав полимера, заполняющего каналы пористого слоя [4].

Если в качестве источника радиоактивной энергии рассматривать только тритий (например, в виде тритийзамещенного полиэтилена), предложенное техническое решение следует считать оптимальным, поскольку энергия распада трития чрезвычайно мала (5,5 КэВ) и пробеги электронов излучения в кремнии составляют около 1 мкм. Таким образом, перемычка кремния в пористом слое полностью поглощает излучение канала. Однако такая ситуация нарушится для изотопов с большей энергией распада. Очевидно, что если в пористом кремнии использовать радионуклид с большей энергией распада и соответственно большей длиной пробега электронов или позитронов, часть радиоактивной энергии будет бесполезно расходоваться на нагрев изотопа в соседних каналах текстурированного слоя.

В последние годы в научной литературе появилось много сообщений о бета-вольтаическом эффекте на кремнии с изотопом ^{63}Ni, [2,3] энергетические параметры которого существенно превышают энергетику трития.

Для дальнейших поисковых исследований полезно было бы рассмотреть, хотя бы в сравнительно-оценочном плане, другие возможные сочетания различных полупроводниковых и радиоактивных материалов. Такая сравнительная оценка максимально возможной удельной мощности генераторов для различных сочетаний полупроводников и доступных к использованию долгоживущих изотопов была недавно проведена в лаборатории нано- и микросистемной тех-

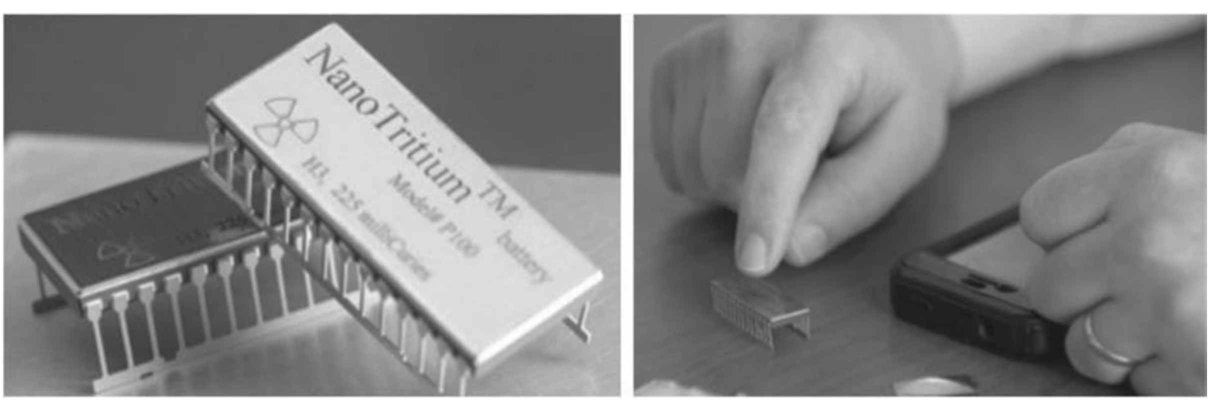


Рис. 3. Батареи NanoTritium™ компании City Labs, Inc.

Таблица 1

Параметры долгоживущих радионуклидов

Изотоп	Период полураспада, лет	Удельный вес, г/см^3	Удельная активность, Бк/см^3*10^{10} (⊂)	Тип распада	Энергия распада Е, МэВ			Удельная мощность w_0, Вт/см^3 с
					Альфа	Бета	Гамма	
Кадмий- 113m	14	8,6	7637	β	–	0,19	–	2,3
Цезий-137	30	1,90	618,6	β	–	0,19	–	0,19
Никель-63	96	8,902	1975	β	–	0,17	0,0048	0,54
Свинец-210	22	11,34	3230	β	–	0,038	<0,001	0,2
Радий-228	5,8	5,5	5698	β	–	0,017	–	0,36
Самарий-151	90	7,52	549	β	–	0,020	–	0,017
Стронций-90	29	2,54	1315	β	–	0,20	–	0,42
Тритий ^{3}H	12	$9\cdot10^{-5}$	$326\cdot10^{-5}$	β	–	0,005	–	$26\cdot10^{-8}$ (для газа)

ники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Следует отметить, что различные источники информации содержат несколько различающиеся данные по энергетическим параметрам радионуклидов. Нами использовались параметры, приведенные в [1], поскольку эта работа выполнена сравнительно недавно, принадлежит солидному ведомству и содержит наиболее полную информацию по интересующим вопросам. Извлечение из работы [1] (изотопы с многолетним периодом полураспада) приведено в табл. 1.

Из таблицы видно, что выбор изотопов бета-распада с приемлемым временем жизни ограничивается всего несколькими наименованиями (^{3}H, ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{228}Ra, ^{137}Cs, ^{113m}Cd).

Структура рассчитываемого полупроводникового чипа представляла собой упорядоченный и масштабно увеличенный аналог пористого слоя (рис. 4).

Для рассмотрения были выбраны перечисленные выше бета-радионуклиды и наиболее широко применяемые полупроводники. Расчет производился на основе энергетических характеристик изотопов и эффективных пробегов электронов в изотопе и полупроводнике, но без учета ряда вторичных факторов, т. е. фактически при допущении КПД = 100 %.

Полученные значения максимально возможной удельной мощности преобразователей приведены в табл. 2. Выделенные серым цветом ячейки таблицы указывают на сомнительную возможность реализации

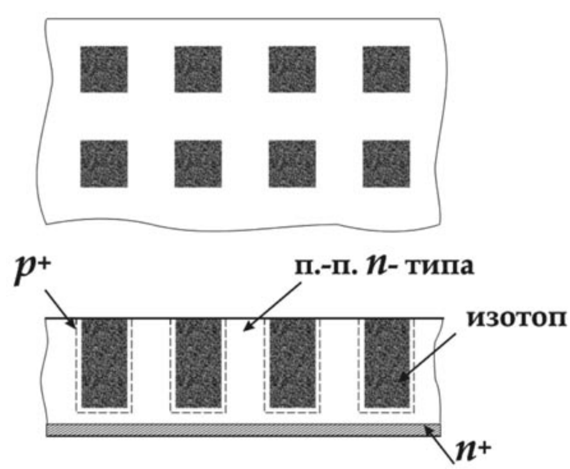


Рис. 4. Схема конструкции преобразователя

Таблица 2

Максимально возможная удельная мощность преобразований

Изотоп	Полупроводник		
	Si, W, мВт	GaAs, W, мВт	SiC, W, мВт
$^{3}H(C_2T_4)_n$	0,2	–	–
^{63}Ni	0,8	1,2	1,2
^{90}Sr	–	4	3,8
^{228}Ra	0,47	0,5	0,5
^{137}Cs	–	2	1,9
^{113m}Cd	7	13	10

данного сочетания в бета-вольтаической конструкции из-за вероятности радиационного повреждения полупроводника. Однако нет априорных противопоказаний для использования этих изотопов в конструкции кантилеверного МЭМС-преобразователя.

Проведенный расчет позволяет сделать следующие выводы:

1. В ряду полупроводников более выгодными материалами, чем кремний, представляются арсенид галлия и карбид кремния. Нужно иметь в виду, однако, что формирование объемных диодов в этих полупроводниках окажется более трудной задачей, чем в кремнии и может потребовать разработки новых нетрадиционных методов легирования.

2. В ряду изотопов более выгодным, чем тритий, и на сегодняшний день единственно возможным для повышения удельной мощности преобразователей является Никель-63.

3. В промежуточных продуктах распада «тяжелых» изотопов присутствуют радионуклиды с недопустимо высокими энергиями различных излучений. Исключение составляет Стронций-90, энергия излучения которого ненамного превышает пороговую энергию дефектообразования в кремнии. Гамма-излучение в короткой цепочке его превращений практически отсутствует, а промежуточный продукт распада – Иттрий-90 – не относится к числу долгоживущих изотопов. Поскольку стойкость к облучению зависит не только от энергии, но и от времени (дозы облучения), возможность применения этого изотопа требует исследования в условиях работы преобразователя.

4. Наиболее интересным из долгоживущих изотопов бета-распада представляется Кадмий-113m. В результате распада ^{113m}Cd превращается в стабильный индий. Средняя энергия распада ^{113m}Cd – 190 КэВ – лишь незначительно превышает порог дефектообразования в кремнии, а беспрецедентно высокая эффективность делает этот изотоп очень привлекательным для дальнейших исследований.

Еще раз отметим, что приведенные в табл. 2 значения удельной мощности следует рассматривать только как сравнительно-оценочные величины, которые могут оказаться полезными при проведении будущих практических разработок.

В настоящее время ведутся активные разработки автономных источников энергоснабжения на основе бета-вольтаических преобразователей. Наиболее приемлемыми изотопами являются тритий и никель-63. Использование кремниевых микротехнологий для реализации преобразователей должно обеспечить успешный выход на уровень массового производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Peterson J., MacDonell M., Haroun L., Monette F.** Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas. Argonne National Laboratory Environmental

Science Division. U.S. Department of Energy, 2007.

2. **Пчелинцева Е.С.** Моделирование и исследование бета-вольтаического эффекта на кремниевых pin структурах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ульяновск: УлГУ, 2011.

3. **Нагорнов Ю.С.** Современные аспекты применения бета-вольтаического эффекта: монография. Ульяновск, 2012.

4. NanoTritium P100a — новая тритиевая батарейка со сроком службы 20 лет [электронный ресурс]/ URL: http://pitbit.ru/news/technology/nanotritium_element_pitaniya_so_srokom_sluzhby_20_let/

REFERENCES

1. **Peterson J., MacDonell M., Haroun L., Monette F.** *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas*, Argonne National Laboratory Environmental Science Division, U.S. Department of Energy, 2007.

2. **Pchelintseva Ye.S.** *Modelirovaniye i issledovaniye betavoltaicheskogo effekta na kremniyevykh pin strukturakh:* Dissertatsiya k.f-m.n., Ulyanovsk: UlGU Publ., 2011. (rus)

3. **Nagornov Yu.S.** *Sovremennyye aspekty primeneniya betavoltaicheskogo effekta*, Ulyanovsk, 2012. (rus)

4. *NanoTritium P100a — novaya tritiyevaya batareyka so srokom sluzhby 20 let.* Available: http://pitbit.ru/news/technology/nanotritium_element_pitaniya_so_srokom_sluzhby_20_let/

АКУЛЬШИН Юрий Дмитриевич — *ведущий инженер лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: acul@mems.ru

AKULSHIN, Yurii D. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: acul@mems.ru

ЛУРЬЕ Михаил Семенович — *ведущий научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: milur@mail.ru

LURIE, Mikhail S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: milur@mail.ru

ПЯТЫШЕВ Евгений Нилович — *заведующий лабораторией нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: pen@mems.ru

PIATYSHEV, Evgenii N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: pen@mems.ru

ГЛУХОВСКОЙ Анатолий Викторович — *младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: togl@mail.ru

GLUHOVSKOI, Anatoliy V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: togl@mail.ru

КАЗАКИН Алексей Николаевич – *научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: keha@newmail.ru

KAZAKIN, Aleksey N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: keha@newmail.ru

УДК 681.586.6

Ю.Д. Акульшин, А.В. Глуховской, А.Н. Казакин, И.М. Комаревцев, М.С. Лурье, Е.Н. Пятышев

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ МЭМС-ДАТЧИКИ

Представлены результаты работ лаборатории нано- и микросистемной техники СПбГПУ по созданию и исследованию тепловых МЭМС-датчиков различного функционального назначения. Датчики реализованы на основе разработанного базового МЭМС-преобразователя и технологии его изготовления.

ТЕХНОЛОГИИ; ДАТЧИКИ; МЭМС.

Yu.D. Akulshin, A.V. Gluhovskoi, A.N. Kazakin, I.M. Komarevtcev, M.S. Lurie, E.N. Piatyshev

MULTIFUNCTIONAL THERMAL SENSORS

The give paper presents the results of NMST Lab in designing and researching thermal MEMS sensors for different purposes. The sensors are based on the MEMS-core converter and micromachining technologies.

TECHNOLOGY; SENSORS; MEMS.

Развитие микросистемной техники (МСТ) в решающей мере зависит от наличия и качества различных видов преобразователей неэлектрических величин в электрические сигналы. Помимо необходимых метрологических и эксплуатационных характеристик эти преобразователи должны отличаться возможностью использования в различных отраслях промышленности, технологической доступностью для серийного производства и невысокой себестоимостью. Обеспечению этих требований способствует объединение всего множества преобразователей в типовые группы, отличающиеся одинаковым принципом преобразования и разработкой соответствующих базовых технологий, которые позволяют изготавливать различные преобразователи данной группы с небольшими, непринципиальными изменениями технологических процессов [1—5].

Среди основных типов микросистемных преобразователей, сгруппированных по принципу общности механизмов преобразования неэлектрических величин в электрические сигналы, одно из направлений занимают тепловые преобразователи, которые могут быть отнесены также к категории наиболее сложных изделий [6, 7].

Следует отметить, что для всех типов преобразователей переход от макро- к микроконструкциям и использованию микротехнологий приводит не только к уменьшению размеров, массы и стоимости, но и к увеличению надежности и воспроизводимости параметров изделия.

Для тепловых преобразователей переход к микроразмерам помимо указанного дает еще следующие дополнительные преимущества:

при малых габаритах и незначительной массе преобразователя процессы теплопередачи стабилизируются за малые отрезки времени, т. е. снижается инерционность и повышается частотный предел работы изделия;

вследствие малых размеров значительно уменьшается рассеяние тепловой энергии за счет конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой;

изготовление токовых и крепежных элементов в виде пленочных слоев с малыми поперечными сечениями позволяет уменьшить рассеяние тепла за счет теплопроводности. Это резко уменьшает необходимую мощность нагрева [6].

Перечисленные особенности процессов

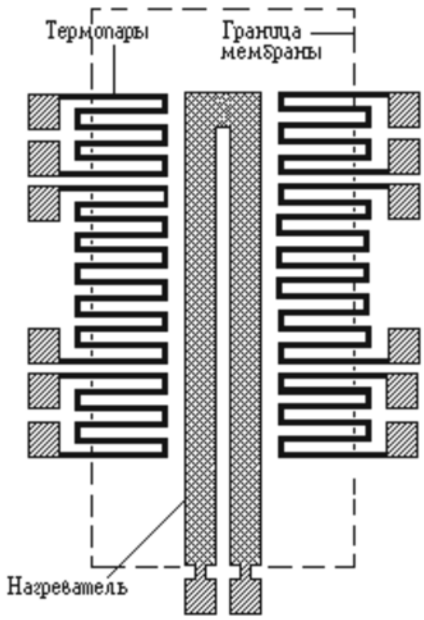


Рис. 1. Расположение элементов конструкции теплового МЭМС-преобразователя [6]

в тепловых МЭМС-преобразователях позволяют не только улучшить характеристики изделий, но и обеспечить ряд применений, недоступных макропреобразователям того же назначения.

Тепловые преобразователи являются по своей природе многофункциональными, т. е. позволяют использовать одинаковые конструкции чипа для измерения многих различных параметров путем изменения конструкции интерфейса. Отметим также, что для некоторых МЭМС-преобразователей макроскопические аналоги вообще отсутствуют (тепловые акселерометры и инклинометры).

Конструкция тепловых МЭМС-преобразователей содержит следующие функциональные элементы (рис. 1): основание (кремниевый чип); «терморазвязка» (мембрана); теплогенерирующие элементы (нагреватель); термочувствительные элементы (термопары, терморезисторы); теплоотводящие элементы (заполняющий корпус газ); элементы, обеспечивающие передачу электрических сигналов (токоразводка); специальные элементы функционального корпусирования, обеспечивающие чувствительность к различным измеряемым величинам.

Задача, поставленная перед лабораторией нано- и микросистемной техники СПбГПУ, состояла в разработке и исследовании базовой конструкции теплового МЭМС-преобразователя, разработке технологии изготовления базового чипа, максимально приближенной к возможностям стандартного микроэлектронного производства, разработке и исследованию тепловых МЭМС-датчиков различного функционального назначения.

Для базового чипа была принята конфигурация, принципиально сходная с конфигурацией, приведенной на рис. 1. Построена математическая модель теплопереноса между отдельными элементами конструкции МЭМС-преобразователя. С учетом результатов моделирования определены геометрические параметры элементов базовой конструкции чипа.

Внешний вид разработанного МЭМС-преобразователя представлен на фотографиях рис. 2.

Кремниевый чип размером в плане 3×2,5 мм содержит перечисленные выше структурные элементы. Одним из важнейших элементов конструкции является мембрана, малая теплопередача и минимальная температурная деформация которой являются непременным условием прецизионных измерений. Наилучшим вариантом изготовления мембраны, как выяснено в [12], является поочередное осаждение слоев оксида и нитрида кремния. Варьируя количество и толщину слоев, можно максимально приблизить коэффициент теплового расширения (ТКР) мембраны к ТКР кремния (ТКР $Si_3N_4 < Si < SiO_2$) и минимизировать температурные деформации. Многочисленными экспериментами установлено, что наилучшими характеристиками обладают пятислойные мембраны со строго определенными толщинами слоев.

Стабильность характеристик преобразования серьезно зависит также от температурной стабильности нагревательного элемента конструкции. Найдено, что оптимальными материалами нагревательного элемента яв-

а) *б*)

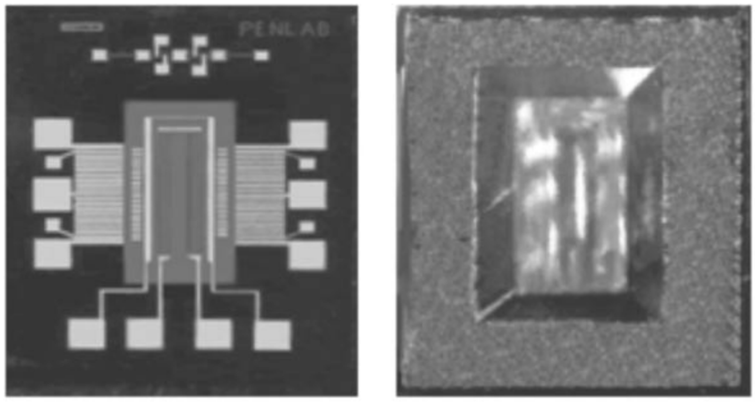


Рис. 2. Базовый тепловой МЭМС-преобразователь:
а — планарная сторона чипа; *б* — задняя сторона

ляются сплавы NiCrSi и NiCrAlCu с ТКС $\sim 10^{-5} - 10^{-6}\ {}^0\mathrm{K}^{-1}$. Удовлетворительный результат дают также пленки сплава монель (CuNiSi), отожженные при 200 °С.

С целью максимального увеличения чувствительности преобразования, в конструкции применены батареи включенных последовательно пленочных термопар, выполненных из чередующихся полосок поликремния *p*- и *n*-типа, причем «горячие» концы термопар находятся на мембране, а «холодные» — над массивом кремниевой основы чипа. Формирование термопар производилось имплантацией бора и фосфора с последующей термообработкой для активации и разгонки примеси.

Разработанные термобатареи позволили получить полезный сигнал в измерительной цепи порядка десятков милливольт при мощности нагрева порядка единиц милливатт.

Для изготовления тепловых преобразователей разработан технологический маршрут, операции которого не выходят за рамки возможностей стандартного полупроводникового производства.

На основе разработанного чипа теплового преобразователя созданы и исследованы МЭМС-датчики различного функционального назначения, особенности и технические характеристики которых приведены ниже.

Преобразователь мощности переменного тока используется для измерения действующих значений переменного напряжения, тока и мощности в широком частотном диапазоне и может обеспечивать измерение электрических сигналов произвольной формы путем сравнения исследуемого сигнала и сигнала от прецизионного источника постоянного тока. Разработка МЭМС-преобразователей ведется рядом зарубежных и отечественных метрологических организаций [8—13].

Связь между напряжением *U*, подводимым к нагревателю, и эдс, генерируемой на термочувствительном элементе, определяется в общем виде выражением:

$$U_0 = K_{\text{пр}} \frac{U_{\text{in}}^2}{R},$$

где U_0 — выходное напряжение термоэдс; U_{in} — входное напряжение; R — сопротивление нагревателя; $K_{\text{пр}}$ — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров изделия и факторов внешнего воздействия.

Из этого выражения следует одна из особенностей теплового преобразователя — независимость эдс на его выходе от направления тока через входную цепь, — позволяющая использовать преобразователь не только для измерения электрических параметров переменного тока, но и для преобразования ряда неэлектрических величин. Датчик представляет собой базовый преобразователь, который для исключения влияния внешних тепловых воздействий помещен в вакуумированный корпус. На-

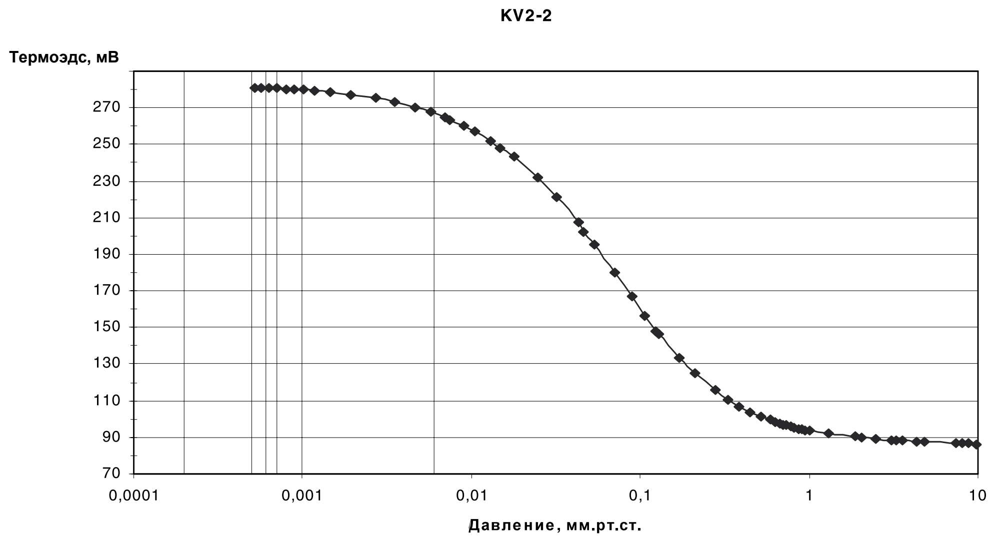


Рис. 3. Градуировочная характеристика теплового микровакуумметра

греватель преобразователя присоединяется к исследуемому источнику переменного сигнала, и фиксируются показания в измерительной цепи термопар. Затем к нагревателю присоединяется источник постоянного тока и проводится его регулирование до получения в цепи термопар такого же напряжения.

По данным испытаний, проведенных во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д.И. Менделеева, погрешность измерения в созданном приборе составила не более 10^{-5} %, что отвечает требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам [8].

Возможная область применения – метрологические лаборатории предприятий, использующих электротехническую и радиотехническую аппаратуру [13].

Базовый чип теплового МЭМС-преобразователя был испытан в качестве термопарного датчика форвакуума. Чип поместили в открытый корпус, который в свою очередь размещался во внешнем герметичном корпусе со штуцером, стандартным для откачных средств вакуумной техники.

В основе теплового метода измерения давления лежит эффект зависимости теплопроводности газа от его концентрации [14]. Градуировочная характеристика вакуумметра приведена на рис. 3.

Благодаря высокой чувствительности и малым размерам чипа, такой преобразователь может использоваться не только в стандартном вакуумном оборудовании, но и в широком круге специальных устройств, включая мониторинг герметизированных объектов микросистемной техники, например, герметизированных электронных модулей, капсул вибрационных гироскопов и др. [15–24]

Области применения микровакуумметра – отрасли промышленности, использующие откачную вакуумную технику, аэрокосмическая техника, а также мониторинг вакуумированных объемов в различных отраслях техники.

Тепловые методы измерения широко используются для измерения скоростей газовых потоков [25–34]. Скорость потока газа в термоанемометре определяется по изменению теплообмена между газом и термочувствительным элементом анемометра.

Известные многочисленные варианты конструкции анемометров не решают вопроса измерения очень малых (от 0,1 м/с) скоростей потока газа. Между тем, этот диапазон скоростей необходим во многих практических применениях анемометрии [27, 28, 34].

Для измерения скоростей потока газа в диапазоне 0–20 см/с выполнена разработка теплового микроанемометра на основе базовой конструкции теплового преобразователя. Для различных применений анемометры имеют различный интерфейс (специализированное корпусирование). Корпус микроанемометра реализован как проточная конструкция и отличается тем, что снабжен ограничителем сечения потока газа, а чип ориентирован в корпусе таким образом, чтобы газ протекал в направлении от одного «холодного» конца термопар к другому (рис. 4 *а*). Разность термоэдс выходных и входных термопар является функцией скорости потока. Один из конструктивных вариантов анемометра представлен на рис. 4 *б* (диаметр штуцеров 4 мм). Эта конструкция может использоваться во всех случаях, когда необходимо измерить малую скорость или малый расход направленного потока газа или неагрессивной жидкости внутри какой-либо магистрали.

В расходомере расход газа определяется интегрированием скорости потока по времени с учетом объема датчика. На основе микроанемометров изготовлены и исследованы экспериментальные образцы микрорасходомеров с диапазоном измерения (0—100) мл/мин и (0—250) мл/мин, с погрешностью измерения менее 5 %.

На разработанное устройство микроанемометра получен патент на полезную модель [30].

Области применения инклинометров и расходомеров:

Электронная промышленность, фармацевтика, косметическая промышленность, биология и медицина, метеорология, аэродинамика, космонавтика, авиация (особенно для малогабаритных летательных аппаратов специального назначения) и др. [31—34]

Задача измерения угла отклонения от вертикали сводится к измерению отклонения от направления гравитационной силы. Для создания инклинометров используются различные принципы преобразования от реостатных датчиков маятникового типа до микродатчиков с электростатическим приводом.

Преимущество тепловых инклинометров перед ними состоит в том, что тепловой датчик не имеет подвижных элементов [35—37]. При наклоне датчика смещение конвективных потоков нагретого воздуха в герметичной полости внутри корпуса создает градиент температуры на поверхности чипа. Изменение температуры между термоприемниками создает дифференциальный сигнал. Датчики такого типа серийно производятся в Германии (Vogt electronic AG) и США (фирма Memsic Inc.). Исследования специалистов этих фирм показали, что чувствительность преобразования существенно зависит от объема воздушной полости корпуса [36, 37].

На базовом чипе термических преобразователей был создан и исследован макетный образец одноосного инклинометра. Полученные результаты показали возможность измерения углов наклона с разрешающей способностью не более одного углового градуса. Сигнал, снятый непосредственно с преобразователя, составлял единицы милливольт (рис. 5).

Области применения инклинометров: автомобильные противоугонные системы, системы навигации, системы стабилизации крена судов, системы стабилизации в некоторых видах продукции военного назначения, робототехника, горнодобывающая

а) *б*)

Рис. 4. Структура анемометра — *а*; штуцерный анемометр — *б*

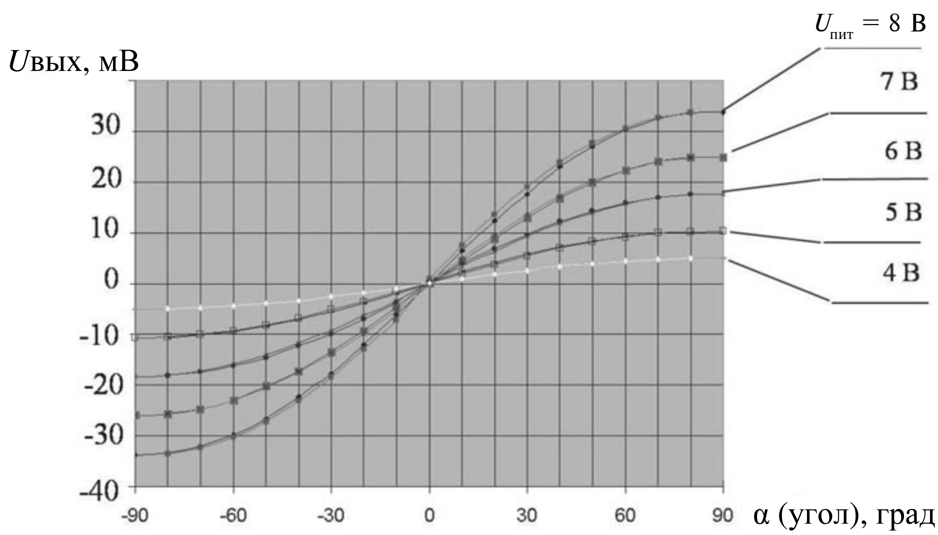


Рис. 5. Выходной сигнал в измерительной цепи инклинометра

промышленность, строительство, мониторинг высотных сооружений, проведение монтажных работ и др. [35–37]

Акселерометры – датчики линейного ускорения – основаны на измерении смещения инерциальной массы, которое регистрируется резисторным или емкостным способом. Оба способа имеют серьезные недостатки:

резисторные акселерометры имеют высокую температурную зависимость; на них оказывают большое влияние механические напряжения, возникающие при монтаже;

емкостные акселерометры из-за малой измеряемой величины требуют сложных измерительных устройств, подвержены электромагнитным помехам и влиянию паразитных емкостей, которые могут превышать измеряемую емкость. Тепловые акселерометры лишены этих недостатков [35–37].

Нами были проведены исследования базового чипа в качестве теплового акселерометра, с соответствующими изменениями интерфейса. Исследования проводились путем записи сигнала датчика, расположенного на консольной балке, которая отклонялась в пределах упругой деформации и после освобождения начинала колебаться. Переменный сигнал от колеблющегося вместе с балкой акселерометра записывался и анализировался на предмет сохранения монотонности затухания сигнала и отсутствия паразитных выбросов. Каких-либо выбросов на монотонном сигнале затухающих колебаний обнаружено не было.

Для статической калибровки акселерометра использовались измерения при трех стационарных ориентациях датчика в поле земного тяготения (вертикальном и двух горизонтальных). При этом фиксировался сигнал опорных значений 0, –1 g, +1 g. Чувствительность макетного образца составила порядка 100 мВ на 1 g.

Чувствительность акселерометра, естественно, может быть произвольно изменена путем изменения условий теплоотвода.

Результаты исследования макета показали, что такие акселерометры могут составить конкуренцию существующим резисторным и емкостным акселерометрам в целом ряде практических применений, включая МЭМС-системы в автомобильной промышленности, других средствах передвижения, робототехнике, военной промышленности и т. д. [35–37]

В заключение следует отметить, что разработанные макетные образцы тепловых МЭМС-датчиков различного функционального назначения не уступают по основным параметрам зарубежным аналогам, а в некоторых случаях их превосходят (квадратор, анемометр). Параметры датчиков для каждого конкретного применения изделий могут быть оптимизированы путем непринципиальных изменений отдельных элементов базового преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В., Мальцев П.П., Попова И.В.** Изделия микросистемной техники – основные понятия и термины // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 2–5.
2. **Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В., Мальцев П.П., Попова И.В.** Изделия микросистемной техники – термины и определения, классификация и обозначения типов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 2–5.
3. **Мальцев П.П.** О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 1. С. 9–10.
4. **Лучинин В.В.** Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 1. С. 3–18.
5. **Пятышев Е.Н, Лурье М.С., Акульшин Ю.Д., Скалон А.И.** Микротехнологии: от микроэлектроники к микросистемной технике // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 58–65.
6. **Козлов А.Г.** Тепловые микросенсоры: классификация, основные типы // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 4.
7. **Anatychuk L.I., Luste O.J.** Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano. CRC Press LLC, 2006. P. 356.
8. **Акнаев Р.Ф., Галахова О.П., Рождественская Т.Б.** Методы и средства обеспечения единства измерений напряжения переменного тока // Измер. техника. 1976. № 4. С. 66–71.
9. **Laiz H., Klonz M., Kessler E., Spiegel T.** New thin-film multijunction thermal converters with negligible low frequency AC-DC transfer differences // IEEE Trans. Instr. Meas. 2001. Vol. 50. No. 2. Pp. 11–23.
10. **Laiz H.M.** Low frequency behavior of thin-film multijunction thermal converter // Dissertation TU Braunschweig. 1999. 128 p. [электронный ресурс]/ URL: http://hdl.handle.net/10068/150785
11. **Kim J.S., Lee H.C., Lee J.H., Lee J.H., Park S.I., Kwon S.W.** A planar Bi–Sb multijunction thermal converter with small AC–DC transfer differences // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2002. Vol. 51. No. 1. Pp. 17–23.
12. **Одинцов А.В.** Тепловой преобразователь переменного тока, изготовленный методами микротехнологий // V СПб ассамблея молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов. 2000.
13. **Пятышев Е.Н., Одинцов А.В.** Микромеханический тепловой преобразователь напряжения переменного тока // Датчики и системы: сб. докл. междунар. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. Т. 2.
14. **Розанов Л.Н.** Вакуумная техника. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2007. 392 с.
15. **Wüest M.** The changing art of measuring vacuum pressure // Solid State Technology. June, 2004.
16. **Кузьмин В.В.** Состояние и тенденции развития современного вакуумметрического приборостроения // Вакуумная техника и технология. 2001. Т. 11. № 1. С. 3–16. № 2. С. 43–50.
17. **Wang S.N., Mizuno K., Fujiyoshi M., Funabachi H., Sakata J.** Thermal micropressure sensor for pressure monitoring in a minute package // American Vacuum Society. 2001. A 19 (1).
18. **Chou B.C.S., Chen C.-N., Shie J.-S.** Micromachining on (111)-Oriented Silicon // Sensors and Actuators. 1999. Vol. 75. Pp. 271–277.
19. **Doms M., Bekesch A., Mueller J.** A Microfabricated Pirani Pressure Sensor Operating Near Atmospheric Pressure // J. of Micromechanics and Microengineering. 2005. Vol. 15. Pp. 1504–1510.
20. **Zhang T.F., Tang Z., Yu J., Jin R.C.** A Micro-Pirani Vacuum Gauge Based on Micro-Hotplate Technology // Sensors and Actuators A. 2006. Vol. 126. Pp. 300–305.
21. **Baliga J.** Integrated Pressure Monitor Technology for RF MEMS // Semiconductor International. 2006. No. 2/1.
22. **Dozoretz P., Stone C., Wenzel O.** Shrinking the Pirani Vacuum Gauge // Sensors. 2005. No. 1.
23. **Одинцов А.В., Пятышев Е.Н.** Микромеханический термоэлектрический датчик вакуума на основе AC-DC преобразователя // Вакуумная техника и технология. Тезисы докл. науч.-техн. семинара. СПб.: Унивак, 2003.
24. **Пятышев Е.Н., Казакин А.Н., Пакконен А.В., Одинцов А.В.** Микросистемная техника в вакуумной технологии // Контроль герметичности. Тезисы докл. науч.-техн. семинара. 2001.
25. **Tropea C., Yarin A., Foss J.** Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin. Springer, 2007. Pp. 179–182.
26. **Beeby S.** MEMS mechanical sensors. Boston, London, Artech House, INC., 2004.
27. **Янкевич Ю.И., Веркин Ю.И.** Состояние и перспективы развития летательных микроаппаратов // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 37–39.

28. **Алексеев Н.В., Кравцов В.Г., Назаров О.И., Панкратов А.К., Вождаев Е.С., Вялков А.В., Головкин М.А., Ефремов А.А.** Системы измерения воздушных параметров полета нового поколения // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 8. С. 31–36.

29. [электронный ресурс] / URL: http://www.bosch.com.

30. **Пятышев Е.Н., Козлов В.П., Акульшин Ю.Д., Одинцов А.В., Зубарев А.Н.** Устройство для измерения вектора скорости воздушного потока // Патент РФ на полезную модель №55146. 15.02.2006.

31. **Кремлевский П.П.** Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник. СПб.: Политехника, 2002. Кн. 1. 409 с.

32. **Kersjes R., Liebscher F., Spiegel E., Manoli Y., Mokwa W.** An invasive catheter flow sensor with on-chip CMOS readout electronics for the on-line determination of blood flow // Sensors and Actuators A. 1999. Vol. 58. Pp. 563–567.

33. **Ashauer M., Glosch H., Hendrich P., Hey N., Sandmaier H., Lang W.** Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles // Sensors and Actuators. 1999. A 73. Pp. 7–13.

34. **Котов В.Н., Черепахин И.И.** Интегральный кремниевый микротермоанемометр для измерения расхода жидких и газообразных сред // Микросистемная техника. 2003. № 8.

35. **Leung A.M., Zhao Y., Cunnee T.M.** Moving with Heat // European Semiconductor. 2001. Pp. 63–67.

36. **Milanovi M., Bowen E., Zaghloul M.E., Tea N.H., Suehle J.S., Payne B., Gaitan M.** Micromachined convective accelerometers in standard integrated circuits technology // Applied Physics Letters. 2000. Vol. 76(4). Pp. 510–580.

37. [электронный ресурс] / URL: http:// www.memsic.com (дата обращения 08.08.2014).

38. [электронный ресурс] / URL: http:// www.mems.ru (дата обращения 08.08.2014).

REFERENCES

1. **Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V., Maltsev P.P., Popova I.V.** Izdeliya mikrosistemnoy tekhniki – osnovnyye ponyatiya i terminy, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, No. 12, Pp. 2–5. (rus)

2. **Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V., Maltsev P.P., Popova I.V.** Izdeliya mikrosistemnoy tekhniki – terminy i opredeleniya, klassifikatsiya i oboznacheniya tipov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, No. 1, Pp. 2–5. (rus)

3. **Maltsev P.P.** O klassifikatsii v oblasti mikrosistemnoy tekhniki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2005, No. 1, Pp. 9–10. (rus)

4. **Luchinin V.V.** Mikrosistemnaya tekhnika. Napravleniya i tendentsii razvitiya, *Nauchnoye priborostroyeniye*, 1999, Vol. 9, No. 1, Pp. 3–18. (rus)

5. **Pyatyshev Ye.N, Lurye M.S., Akulshin Yu.D., Skalon A.I.** Mikrotekhnologii: ot mikroelektroniki k mikrosistemnoy tekhnike, *Datchiki i sistemy*, 2001, No. 6, Pp. 58–65. (rus)

6. **Kozlov A.G.** Teplovyye mikrosensory: klassifikatsiya, osnovnyye tipy, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2006, No. 4. (rus)

7. **Anatychuk L.I., Luste O.J.** *Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano*, CRC Press LLC, 2006, P. 356.

8. **Aknayev R.F., Galakhova O.P., Rozhdestvenskaya T.B.** Metody i sredstva obespecheniya yedinstva izmereniy napryazheniya peremennogo toka, *Izmeritelnaya tekhnika*. 1976, No. 4, Pp. 66–71. (rus)

9. **Laiz H., Klonz M., Kessler E., Spiegel T.** New thin-film multijunction thermal converters with negligible low frequency AC-DC transfer differences, *IEEE Trans. Instr. Meas*, 2001, Vol. 50, No. 2, Pp. 11–23.

10. **Laiz H.M.** Low frequency behavior of thin-film multijunction thermal converter, *Dissertation TU Braunschweig*, 1999, 128 p. Available: http://hdl.handle.net/10068/150785

11. **Kim J.S., Lee H.C., Lee J.H., Lee J.H., Park S.I., Kwon S.W.** A planar Bi–Sb multijunction thermal converter with small AC-DC transfer differences, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2002, Vol. 51, No. 1, Pp. 17–23.

12. **Odintsov A.V.** Teplovoy preobrazovatel peremennogo toka, izgotovlennyy metodami mikrotekhnologiy, *Sankt-peterburgskaya assambleya molodykh uchenykh i spetsialistov: tezisy dokladov*, 2000. (rus)

13. **Pyatyshev Ye.N., Odintsov A.V.** Mikromekhanicheskiy teplovoy preobrazovatel napryazheniya peremennogo toka, *Datchiki i sistemy: Sbornik dokladov mezhdunarodnoy konferentsii*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2002, Vol. 2. (rus)

14. **Rozanov L.N.** Vakuumnaya tekhnika. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2007, 392 p. (rus)

15. **Wüest M.** The changing art of measuring vacuum pressure, *Solid State Technology*, June, 2004.

16. **Kuzmin V.V.** Sostoyaniye i tendentsii razvitiya sovremennogo vakuummetricheskogo priborostroyeniya, *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2001, Vol. 11, No. 1, Pp. 3–16, No. 2, Pp. 43–50. (rus)

17. **Wang S.N., Mizuno K., Fujiyoshi M., Funabachi H., Sakata J.** Thermal micropressure sensor for pressure monitoring in a minute package, *American Vacuum Society*, 2001, A 19 (1).

18. **Chou B.C.S., Chen C.-N., Shie J.-S.** Micromachining on (111)-Oriented Silicon, *Sensors and Actuators*, 1999, Vol. 75, Pp. 271–277.

19. **Doms M., Bekesch A., Mueller J.** A Microfabricated Pirani Pressure Sensor Operating Near Atmospheric Pressure, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, Vol. 15, Pp. 1504–1510.

20. **Zhang T.F., Tang Z., Yu J., Jin R.C.** A Micro-Pirani Vacuum Gauge Based on Micro-Hotplate Technology, *Sensors and Actuators A*, 2006, Vol. 126, Pp. 300–305.

21. **Baliga J.** Integrated Pressure Monitor Technology for RF MEMS, *Semiconductor International*, 2006, No. 2/1.

22. **Dozoretz P., Stone C., Wenzel O.** Shrinking the Pirani Vacuum Gauge, *Sensors*, 2005, No. 1.

23. **Odintsov A.V., Pyatyshev Ye.N.** Mikromekhanicheskiy termoelektricheskiy datchik vakuuma na osnove AC-DC preobrazovatelya, *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya: tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskogo seminara*, St. Petersburg: Univak Publ., 2003. (rus)

24. **Pyatyshev Ye.N., Kazakin A.N., Pakkonen A.V., Odintsov A.V.** Mikrosistemnaya tekhnika v vakuumnoy tekhnologii, *Kontrol germetichnosti: tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskogo seminara*, 2001. (rus)

25. **Tropea C., Yarin A., Foss J.** *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer, Berlin, 2007, Pp. 179–182.

26. **Beeby S.** *MEMS mechanical sensors*, Boston, London, Artech House, Inc., 2004.

27. **Yankevich Yu.I., Verkin Yu.I.** Sostoyaniye i perspektivy razvitiya letatelnykh mikroapparatov, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2000, No. 1, Pp. 37–39. (rus)

28. **Alekseyev N.V., Kravtsov V.G., Nazarov O.I., Pankratov A.K., Vozhdayev Ye.S., Vyalkov A.V., Golovkin M.A., Yefremov A.A.** Sistemy izmereniya vozdushnykh parametrov poleta novogo pokoleniya, *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye*, 2003, No. 8, Pp. 31–36. (rus)

29. Available: http://www.bosch.com

30. **Pyatyshev Ye.N., Kozlov V.P., Akulshin Yu.D., Odintsov A.V., Zubarev A.N.** Ustroystvo dlya izmereniya vektora skorosti vozdushnogo potoka, *Patent RF No. 55146*, 15.02. 2006. (rus)

31. **Kremlevskiy P.P.** Raskhodomery i schetchiki kolichestva veshchestva: Spravochnik. St. Petersburg: Politekhnika Publ., 2002, Kn. 1, 409 p. (rus)

32. **Kersjes R., Liebscher F., Spiegel E., Manoli Y., Mokwa W.** An invasive catheter flow sensor with on-chip CMOS readout electronics for the on-line determination of blood flow, *Sensors and Actuators A*, 1999, Vol. 58, Pp. 563–567.

33. **Ashauer M., Glosch H., Hendrich P., Hey N., Sandmaier H., Lang W.** Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles, *Sensors and Actuators*, 1999. A 73, Pp. 7–13.

34. **Kotov V.N., Cherepakhin I.I.** Integralnyy kremniyevyy mikrotermoanemometr dlya izmereniya raskhoda zhidkikh i gazoobraznykh sred, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2003, No. 8. (rus)

35. **Leung A.M., Zhao Y., Cunnee T.M.** Moving with Heat, *European Semiconductor*, March 2001, Pp. 63–67.

36. **Milanovi M., Bowen E., Zaghloul M.E., Tea N.H., Suehle J.S., Payne B., Gaitan M.** Micromachined convective accelerometers in standard integrated circuits technology, *Applied Physics Letters*, 2000, Vol. 76 (4), Pp. 510–580.

37. Available: http:// www.memsic.com (Accessed 08.08.2014).

38. Available: http:// www.mems.ru (Accessed 08.08.2014).

АКУЛЬШИН Юрий Дмитриевич – *ведущий инженер лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: acul@mems.ru

AKULSHIN, Yurii D. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: acul@mems.ru

ГЛУХОВСКОЙ Анатолий Викторович – *младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: togl@mail.ru

GLUHOVSKOI, Anatoliy V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: togl@mail.ru

КАЗАКИН Алексей Николаевич – *научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: keha@newmail.ru

KAZAKIN, Aleksey N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: keha@newmail.ru

КОМАРЕВЦЕВ Иван Михайлович – *младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vanec@aport.ru

KOMAREVTCEV, Ivan M. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vanec@aport.ru

ЛУРЬЕ Михаил Семенович – *ведущий научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: milur@mail.ru

LURIE, Mikhail S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: milur@mail.ru

ПЯТЫШЕВ Евгений Нилович – *заведующий лабораторией нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: pen@mems.ru

PIATYSHEV, Evgenii N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: pen@mems.ru

УДК 621.3

Ю.Д. Акульшин, А.В. Глуховской, А.Н. Казакин, В.П. Козлов, А.В. Коршунов, И.М. Комаревцев, М.С. Лурье, Е.Н. Пятышев

ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКИ ЛАБОРАТОРИИ НМСТ

Представлены результаты работ лаборатории нано- и микросистемной техники СПбГПУ в области разработки технологий и МЭМС-преобразователей различного назначения.

ТЕХНОЛОГИИ; МЭМС; ДАТЧИКИ.

Yu.D. Akulshin, A.V. Gluhovskoi, A.N. Kazakin, V.P. Kozlov, A.V. Korshunov, I.M. Komarevtcev, M.S. Lurie, E.N. Piatyshev

TECHNOLOGIES & DEVICES NMST LAB

The given paper presents the research work results of the Nano- and Microsystems Technology laboratory in the field of the technology development and MEMS transducers for different purposes.

TECHNOLOGY; MEMS; TRANSDUCERS.

Важнейшими задачами развития микросистемной техники (МСТ) в настоящее время являются создание собственной Российской элементной базы и импортозамещение для таких сфер применения, как медицина и здравоохранение, автомобилестроение, авиастроение, машиностроение, телекоммуникации, системы безопасности, оборонная промышленность.

Создаваемая элементная база, кроме необходимых метрологических и эксплуатационных характеристик, должна отличаться возможностью использования в различных отраслях промышленности, технологической доступностью для серийного полупроводникового производства и невысокой себестоимостью [1, 2].

Российским заказчикам требуются различные инерциальные датчики, датчики давления, высокочастотные микроэлектромеханические системы (ВЧ МЭМС), микрофлюидные устройства и комбинированные системы на их основе. Причем отечественным предприятиям необходимы как сами указанные продукты (в готовом виде), так и технологии по их проектированию, моделированию, производству и испытанию [3].

Научно-исследовательская лаборатория нано- и микросистемной техники обладает значительным опытом разработки и внедрения методов и технологий проектирования и производства изделий микросистемной техники, а также создания устройств микросистемной техники различного назначения с опорой на освоенную технологическую базу и методы физического и математического моделирования.

Лаборатория располагает возможностями для выполнения всего стандартного для микроэлектроники набора технологических операций: фотолитография, напыление металлов и диэлектриков, жидкостное и сухое травление, термическая обработка, легирование, разделение пластин на чипы и корпусирование. Лаборатория обеспечивает необходимые требования комплексного подхода ко всем составляющим цикла «проектирование-изготовление» (проектирование, технологии, материалы). Разработка МЭМС базируется на технологическом фундаменте, существенным моментом является сочетание технологий микроэлектроники и операций, радикально отличающихся от традиционных для микроэлектроники. Для разработки различных МЭМС-устройств используются технологии глубокого жидкостного и сухого (плазменного) травления, технологии «кремний на стекле» с применением анодной сварки, выполнен ряд разработок по функциональному корпусированию. Наряду с широким использованием возможностей традиционных микроэлектронных технологий это позволяет создавать изделия и устройства МСТ разнообразных применений [4].

Разработаны датчики давления тензорезистивного типа для измерения давления газовых потоков. Основу датчиков составляет кремниевый чип (чувствительный элемент давления). Датчики выполняются по классической МЭМС-технологии: мембрана, созданная жидкостным травлением, с диффузионными тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме. Датчики отличаются малыми габаритами, высокой чувствительностью и быстродействием и предназначены для исследования быстропротекающих аэродинамических процессов в компрессорах, вентиляторах, ветрогенераторах и устройствах подготовки воздуха (кондиционерах).

Низкопрофильные датчики давления типа Альфа (рис. 1), (табл. 1) – одна из первых микроэлектромеханических разработок нашей лаборатории, выполненная по заказу отдела промышленной вентиляции Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Были разработаны датчики для установки непосредственно на поверхность аэродинамической модели (толщина датчика 0,4 мм).

Датчики выполнены по классической МЭМС-технологии, однако контактные площадки покрыты нержавеющей сталью и имеют размер больший (1,6*0,6 мм), чем обычно используется при разработках ИС и МСТ. Такое конструктивное решение обеспечивает монтаж датчиков с использованием оборудования и методик стандартной

Таблица 1

Датчики давления

Наименование	Тип Альфа	Тип С	Тип СБ	Тип КС
Диапазоны, атм	±0,1 до 76	±0,1 до 16	±0,1 до 16	76; 160
Тип датчика	избыточный, дифференциальный	абсолютный, избыточный, дифференциальный	избыточный, дифференциальный	абсолютный
Выходной сигнал, мВ	±20	±30	±30	±200
Напряжение питания, В	5	5	5	6
Погрешность, %	0,5..1	0,5..1	0,5..1	0,5
Рабочий диапазон температур, °С	−25....80	−25....80	−25....80	−40....100
Быстродействие	2...50 мкс	10...100 мкс	10...100 мкс	10 мс
Рабочий газ	Воздух	Воздух	Воздух, фреон	Воздух, природный газ
Габариты, мм	7×2,8×0,5	H = 1,6, D = 6	D = 6, L = 25	D =36, L = 250
Особенности установки	Низкопрофильный для установки на стенки каналов	Для установки на рабочие колеса ЦК	Для установки на стенки каналов	Для системы антипомпажной защиты КС
Особенности технологии	Глубокое жидкостное травление			

Тип Альфа **Тип С** **Тип СБ** **Тип КС**

Рис. 1. Датчики давления тензометрического типа

тензометрии. Датчики устанавливаются на поверхность моделей с помощью клея, разводка выводов производится обычной распайкой с помощью микропаяльника. При необходимости защиты в ряде применений (исследования запыленных потоков, течений жидкостей в насосах) после монтажа поверхность датчика покрывается полимерной композицией на основе кремнийорганического материала. Мембраны датчиков имеют площадь 1,2*0,8 мм при толщине 5...50 мкм, что обеспечивает работу в диапазоне давлений 0...10 кПа, 0...1 МПа при собственных частотах мембран до 100 кГц.

Совместно с кафедрой компрессорной, вакуумной и холодильной техники СПбГПУ разработан ряд датчиков давления для исследований нестационарных аэродинамических процессов в турбомашинах, в т. ч. и на вращающемся роторе при высоком уровне центробежных ускорений (рис. 1), (табл. 1). Датчики давления типа С для установки на рабочие колеса выполнялись в металлических (ковар) и керамических (фотоситалл) корпусах. Конструкция датчиков обеспечивает установку на покрывающие диски рабочих колес центробежных компрессоров и работоспособна при перегрузке до 30 000 g. Датчики давления типа СБ предназначены для измерения быстроменяющихся давлений газовых потоков. Основу датчиков составляет кремниевый чип (чувствительный элемент давления). Конструкция корпусов и технология сборки датчиков типа С и СБ позволяют минимизировать величину предмембранного объема, подводящие каналы обеспечивают демпфирование колебаний в подводящем тракте. Диапазон измеряемых частот пульсаций до 40 кГц. Датчики давления типа КС разработаны совместно с ЗАО «Кировский Завод» и предназначены для системы антипомпажной защиты центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата. Датчики в составе макета системы антипомпажной защиты прошли испытания на головном агрегате ГПА «НЕВА16». Конструкция системы защищена патентом [5].

Тепловые МЭМС-преобразователи составляют значительную группу датчиков широкого спектра применений. Для изготовления тепловых преобразователей разработан технологический маршрут, операции которого не выходят за рамки возможностей стандартного полупроводникового производства. Конечные операции по глубокому жидкостному травлению выполняются на специализированном оборудовании.

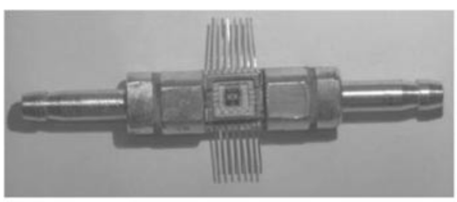
Тепловые микрорасходомеры (рис. 2), (табл. 2) предназначены для измерения расходов газовых потоков методом термоанемометра. Датчики типа Ион разработаны для применения в газовых трактах экспериментального лабораторного оборудования медико-биологического назначения. Датчики ТИРГ разработаны в качестве экспериментальных образцов по программе «Многофункциональные тепловые преобразователи». На разработанное устройство микроанемометра получен патент на полезную модель [6].

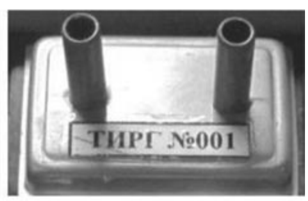
Тепловые акселерометры (рис. 3), (табл. 3) предназначены для измерения гравитационных и инерциальных ускорений методом «конвективного облака». Датчики GM08 разработаны для экспериментального образца системы стабилизации движения (контракт с фирмой GM). Датчики ТАКС разработаны в качестве экспериментальных образцов по программе «Многофункциональные тепловые преобразователи».

Таблица 2

Тепловые микрорасходомеры

Наименование	Тип Ион	Тип ТИРГ
Диапазоны, мл/мин	0—150	0—200
Тип датчика	Пленочный термоанемометр	Пленочный термоанемометр
Выходной сигнал, мВ	±30	±50
Напряжение питания, В	5	5
Погрешность, %	+/—1..2	+/—2
Рабочий диапазон температур, °С	15....35	10....50
Быстродействие, мс	10	10
Рабочий газ	Воздух, азот, чистые неагрессивные газы	Воздух
Габариты, мм	D = 10, L = 80	30×20×15
Особенности технологии	Глубокое жидкостное травление. Многослойная мембрана	





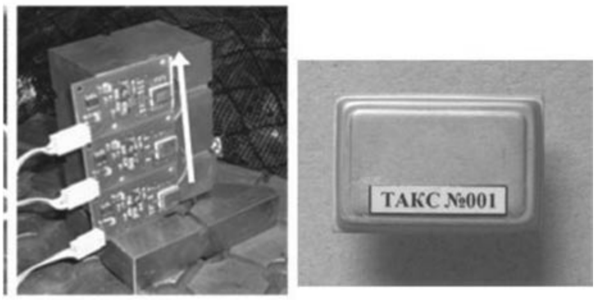
Тип Ион **Тип ТИРГ**

Рис. 2. Датчики для измерения микрорасходов

Таблица 3

Тепловые акселерометры

Наименование	Тип	
	GM08	ТАКС
Диапазоны, g	+/— 1	+/— 1
Тип датчика/принцип измерения	Конвективный	Конвективный
Выходной сигнал	0 до 4 В	±50 мВ
Напряжение питания, В	5	5
Погрешность, %	+/— 1..2	+/— 2
Рабочий диапазон температур, °С	15....35	10....50
Быстродействие, мс	10	10
Габариты, мм	H = 100, L = 80	30×20×15
Особенности технологии	Глубокое жидкостное травление. Многослойная мембрана	



Тип GM08 Тип ТАКС

Рис. 3. Тепловые микроакселерометры

Инерциальные преобразователи вибрационного типа наиболее сложные в технологическом отношении МЭМС-изделия. Лаборатория участвует в создании микромеханических инерциальных преобразователей различного назначения. Уровень разработки в этой области определяется во многом возможностями технологий, используются технологии глубокого сухого (плазменного) травления, технологии «кремний на стекле» с применением анодной сварки. В настоящее время Лаборатория работает над созданием технологии инерциальных преобразователей повышенной точности, пригодных для широкого круга применений.

Датчики угловой скорости (рис. 4), (табл. 4) являются основой для создания устройств различного назначения для систем навигации, стабилизации движения и управления. В таблице представлены данные одного из чувствительных элементов – датчиков угловой скорости, изготовленных в Лаборатории.

Таблица 4

Датчики угловой скорости

Наименование параметра	Режим измерения	Типовое/макс. значения	Единица измерения
Динамический диапазон	Аналоговый выход	±300	°/c
Уход начального смещения		–/10	°/ч
Значение шума на выходе	При динамическом диапазоне ±300°/c,	–/0,3	°/c СКЗ
Полоса пропускания по уровню –3 дБ,		100	Гц
Особенности технологии	Технология «кремний на стекле». Глубокое плазменное травление. Анодная сварка		

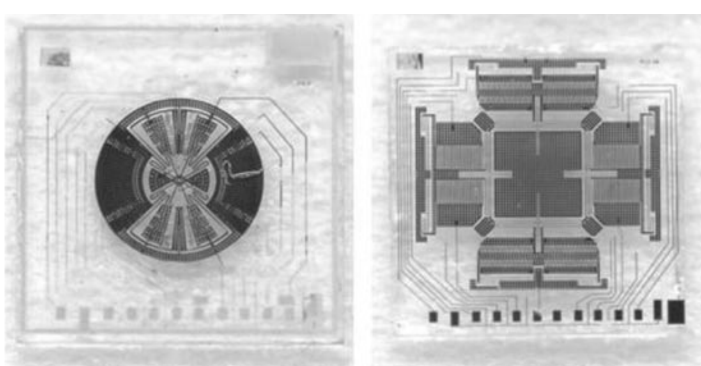


Рис. 4. Датчики угловой скорости

Таблица 5

Датчики линейного ускорения

Наименование параметра	Типовое значение	Единица измерения
Динамический диапазон	±50	g
Уход начального смещения	5	mg
Значение шума на выходе СКЗ	1,5	mg
Особенности технологии	Технология «кремний на стекле». Глубокое плазменное травление. Анодная сварка	

Датчики линейного ускорения (рис. 5), (табл. 5) предназначены для измерения инерционного и гравитационного линейного ускорения. Применяются для создания устройств различного назначения для систем навигации, стабилизации движения и управления, а также сейсмических устройств и систем охраны периметра. На разработанное устройство микроакселерометра получен патент на полезную модель [7].

Следует отметить, что разработка конструкции и поиск оптимальных механических параметров гироскопов и акселерометров представляют собой отдельную и очень трудоемкую задачу, решение которой требует применения специальных аналитических методов, а также современных компьютерных методов математического моделирования. Поэтому разработка конструкции ведется в кооперации со специалистами в области инерциального приборостроения. Так, разработка технологий и изготовление датчиков акселерометров и гироскопов для систем управления и навигации малогабаритных быстролетящих объектов (рис. 4, 5) проводились по заказу ЗАО «Гирооптика»; ведутся совместные работы в области бесплатформенных систем навигации и создании инерциальных датчиков движения с ЦНИИ робототехники и технической кибернетики; ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина, ФГУП «Электроприбор».

Для расширения областей применения разработанных МЭМС-датчиков требуется проведение работ по адаптации датчиков к требованиям стандартов конкретных отраслей. Так, датчики, отвечающие требованиям «автомобильного назначения», должны обеспечивать преобразование физических параметров (ускорение, скорость, давление) в цифровые сигналы автомобильной CAN-шины. Чувствительный элемент датчика в сочетании с преобразователем напряжения

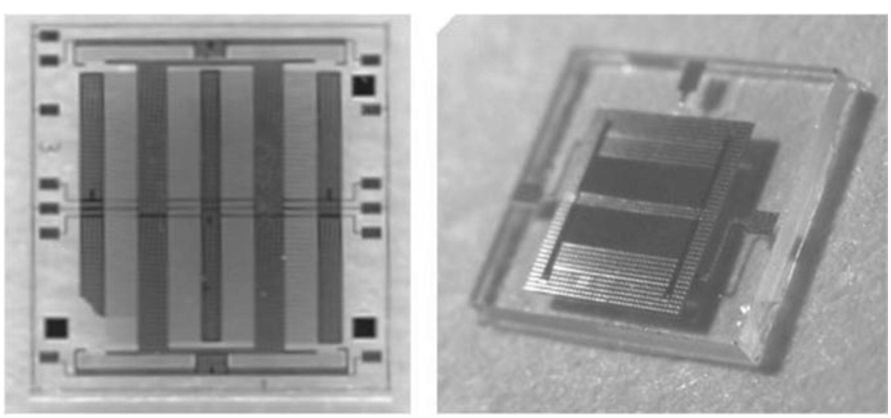


Рис. 5. Датчики линейного ускорения

(заказная микросхема – ASIC) необходимо компоновать в разработанный по автомобильным стандартам корпус.

В настоящее время отечественные датчики линейного ускорения, отвечающие требованиям «автомобильного назначения», могут быть востребованы в инновационных автомобильных разработках для систем безопасности, стабилизации движения, навигации, информационного обеспечения водителя и операторов автомобильного парка.

Разработанные нашей лабораторией технологии представляют значительный интерес для создания отечественной элементной базы и импортозамещения в таких областях, как медицина и здравоохранение, автомобилестроение, авиастроение, машиностроение, телекоммуникации, системы безопасности, оборонная промышленность. Собственная отечественная элементная база позволит избежать зависимости предприятий РФ от импортных компонент, что обеспечит безопасность серийного производства конечных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В., Мальцев П.П., Попова И.В.** Изделия микросистемной техники – термины и определения, классификация и обозначения типов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 2–5.

2. **Лучинин В.В.** Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 1. С. 3–18.

3. Обзор российского рынка МЭМС [электронный ресурс] / URL: http://www.semiconrussia.org/ en/sites/semiconrussia.org/files/docs/SEMI_2014_Urmanov_MEMS.pdf

4. **Пятышев Е.Н, Лурье М.С., Акульшин Ю.Д., Скалон А.И.** Микротехнологии: от микроэлектроники к микросистемной технике // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 58–65.

5. **Семененко П.Г., Гительман А.И., Акульшин Ю.Д., Измайлов Р.А., Сорокин А.В.** Способ регулирования режимов работы компрессора // Патент РФ № 2230939. Приоретет 20.06.2004.

6. **Пятышев Е.Н., Козлов В.П., Акульшин Ю.Д., Одинцов А.В., Зубарев А.Н.** Устройство для измерения вектора скорости воздушного потока // Патент РФ № 55146. Приоритет 15.02.2006.

7. **Прядко А.И., Рогов А.В., Пятышев Е.Н., Казакин А.Н., Караваев П.Н.** Микромеханический акселерометр// Патент РФ № 13361. Приоритет 29.10.2012.

REFERENCES

1. **Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V., Maltsev P.P., Popova I.V.** Izdeliya mikrosistemnoy tekhniki – terminy i opredeleniya, klassifikatsiya i oboznacheniya tipov. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, No. 1, Pp. 2–5. (rus)

2. **Luchinin V.V.** Mikrosistemnaya tekhnika. Napravleniya i tendentsii razvitiya, *Nauchnoye priborostroyeniye*, 1999, Vol. 9, No. 1, Pp. 3–18. (rus)

3. *Obzor rossiyskogo rynka MEMS.* Available: http://www.semiconrussia.org/ en/sites/semiconrussia.org/files/docs/SEMI_2014_Urmanov_MEMS.pdf (rus)

4. **Pyatyshev Ye.N, Lurye M.S., Akulshin Yu.D., Skalon A.I.** Mikrotekhnologii: ot mikroelektroniki k mikrosistemnoy tekhnike, *Datchiki i sistemy*, 2001, No. 6, Pp. 58–65. (rus)

5. **Semenenko P.G., Gitelman A.I., Akulshin Yu.D., Izmaylov R.A., Sorokin A.V.** Sposob regulirovaniya rezhimov raboty kompressora, *Patent RF No. 2230939. Prioritet 20.06.2004.* (rus)

6. **Pyatyshev Ye.N., Kozlov V.P., Akulshin Yu.D., Odintsov A.V., Zubarev A.N.** Ustroystvo dlya izmereniya vektora skorosti vozdushnogo potoka, *Patent RF No. 55146*, *Prioritet 15.02.2006.* (rus)

7. **Pryadko A.I., Rogov A.V., Pyatyshev Ye.N., Kazakin A.N., Karavayev P.N.** Mikromekhanicheskiy akselerometr, *Patent RF No. 13361. Prioritet 29.10.2012* (rus)

АКУЛЬШИН Юрий Дмитриевич – *ведущий инженер лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: acul@mems.ru

AKULSHIN, Yurii D. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: acul@mems.ru

ГЛУХОВСКОЙ Анатолий Викторович – *младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: togl@mail.ru

GLUHOVSKOI, Anatoliy V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: togl@mail.ru

КАЗАКИН Алексей Николаевич – *научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: keha@newmail.ru

KAZAKIN, Aleksey N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: keha@newmail.ru

КОЗЛОВ Владислав Петрович – *младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vkp@mems.ru

KOZLOV, Vladislav P. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vkp@mems.ru

КОРШУНОВ Андрей Васильевич – *доцент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: korshunov@spbstu.ru

KORSHUNOV, Andrey V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: korshunov@spbstu.ru

КОМАРЕВЦЕВ Иван Михайлович – *младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vanec@aport.ru

KOMAREVTCEV, Ivan M. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vanec@aport.ru

ЛУРЬЕ Михаил Семенович – *ведущий научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: milur@mail.ru

LURIE, Mikhail S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: milur@mail.ru

ПЯТЫШЕВ Евгений Нилович – *заведующий лабораторией нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: pen@mems.ru

PIATYSHEV, Evgenii N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: pen@mems.ru

CIRCUITS AND SYSTEMS SOCIETY

ISSCS 2015

12-th International Symposium on Signals, Circuits and Systems
Iasi, Romania, July 9–10, 2015
organized by:
Faculty of Electronics, Telecommunications and Information Technology, “Gh. Asachi” Technical University of Iasi
IEEE Romania Section & CAS Chapter in cooperation with IEEE CAS Society

Call for Papers

Honorary Chair
Ion Bogdan
Technical University of Iasi,
Romania

General Co-Chairs
Liviu Goras
Technical University of Iasi, Romania

Sanjit Mitra
University of California,
Santa Barbara, CA, USA

Technical Program Committee
Majid Ahmadi, Canada - **Chair**
Adnan Al-Alaoui, Lebanon
Marco Carli, Italy
Jonathon Chambers, U.K.
Qionghai Dai, China
Daniel Foty, U.S.A.
Gordana Jovanovic-Dolecek, Mexico
Pedro Julián, Argentina
Chan Hin Kam, Singapore
Abhay Karandikar, India
André Kaup, Germany
Alexander Korotkov, Russia
Franco Maloberti, Italy
Rui Paulo da Silva Martins, Macau
Yoshikazu Miyanaga, Japan
Georgi Nenov, Bulgaria
Antonio Petraglia, Brazil
Branimir Reljin, Serbia
Corneliu Rusu, Romania
Mohamad Sawan, Canada
Erchin Serpendin, U.S.A.
Mani Soma, U.S.A.
Thanos Stouraitis, Greece
Wonyong Sung, Korea
Ioan Tabus, Finland
Siddik Yarman, Turkey

ISSCS 2015 aims at bringing together scientists and researchers from academia and industry to present and discuss some of their latest ideas and results.

Prospective authors are invited to submit original papers in the following areas:

- **Linear and Nonlinear Circuits & Systems**
- **Circuits & Systems for Communications**
- **Power Electronic Circuits**
- **Analog and Digital Signal Processing**
- **Image and Video Processing**
- **VLSI Circuits & Systems**

The official language of the symposium will be English.

AUTHOR'S SCHEDULE:

Proposals for special sessions	December 8, 2014
Submission of full paper	February 16, 2015
Notification of acceptance	April 6, 2015
Submission of camera-ready version and registration form with signed copyright form	May 4, 2015

The papers should be written in IEEE/CAS A4 format (double column including paper title, authors' names and affiliation, short abstract). They should not exceed 4 pages (including figures and references).

Authors are expected to present their papers at the Symposium. At least one author of each accepted paper must register in order to have the paper included in the program and Proceedings.

ISSCS 2015
http://scs.etti.tuiasi.ro/isscs2015

Faculty of Electronics & Telecommunications
Bd. Carol I no.11, Iasi
700506, ROMANIA
Conference email address:
isscs2015@etti.tuiasi.ro

УДК 004.931

В.Г. Шубников, С.Ю. Беляев

ПОСТРОЕНИЕ КОНТУРОВ СТОПЫ ПО ФОТОГРАФИЯМ

Предложен алгоритм построения горизонтального контура стопы и контура ее подъема по трем фотографиям, содержащим, кроме самой стопы, стандартный лист бумаги. Благодаря учету перспективных и иных искажений, присутствующих на фотографиях, а также учету особенностей стопы, алгоритм строит искомые контуры с точностью порядка миллиметра. Указанная точность является достаточной для таких приложений, как виртуальная примерка и индивидуальный пошив обуви.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ; 3D РЕКОНСТРУКЦИЯ; ИЗМЕРЕНИЕ СТОПЫ ЧЕЛОВЕКА.

V.G. Shubnikov, S.Yu. Belyaev

FOOT CONTOUR DETECTION USING DIGITAL IMAGES

We have offered a special method of the foot contour detection using three digital images. In two images the foot is placed close to the standard A4 (or US Letter) paper sheet. The paper sheet (with known dimensions) is used like a size calibration object. Taking into account perspectives and other distortions the proposed algorithm builds the foot contour with the accuracy about 1 millimeter. The given high accuracy is enough for commercial applications like virtual shoe fitting or individual shoe manufacturing.

IMAGE PROCESSING; 3D RECONSTRUCTION; HUMAN FOOT MEASUREMENT.

Для выполнения виртуальной примерки обуви в интернет-магазине или для удаленного заказа пошива индивидуальной обуви клиент должен выполнить измерения характерных размеров своей стопы и передать их через on-line сервис в интернет-магазин или на фабрику пошива обуви. Профессиональные мастера по изготовлению обуви выполняют измерения стопы с помощью линейки и гибкого метра. К сожалению, обычный пользователь не может это сделать с достаточной (порядка миллиметра) точностью.

Более современный подход состоит в построении 3D модели стопы с помощью 3D сканера (см., например, [1, 2]). Этот метод обеспечивает высокую точность, но также не может использоваться для указанных целей по причине отсутствия у пользователя соответствующего оборудования.

В последнее время появилось программное обеспечение, выполняющее 3D реконструкцию объекта по видео или множеству фотографий (см., например, [3]), но результаты этой реконструкции требуют обязательной «ручной» коррекции в 3D редакторах, что неприемлемо в рамках рассматриваемой задачи. В работе [8] предложено частичное решение проблемы: измерение некоторых ключевых размеров стопы человека по фотографиям.

В настоящей статье для оценки размеров стопы предлагается использовать ее контуры, которые могут быть получены из трех фотографий. Данный подход идеально подходит для виртуальной примерки, т. к. удобен для пользователя, не требует наличия специального оборудования, программного обеспечения и пересылки большого объема данных.

Постановка задачи

Пусть заданы три фотографии, содержащие стандартный белый лист бумаги

Рис. 1. Пример исходных фотографий

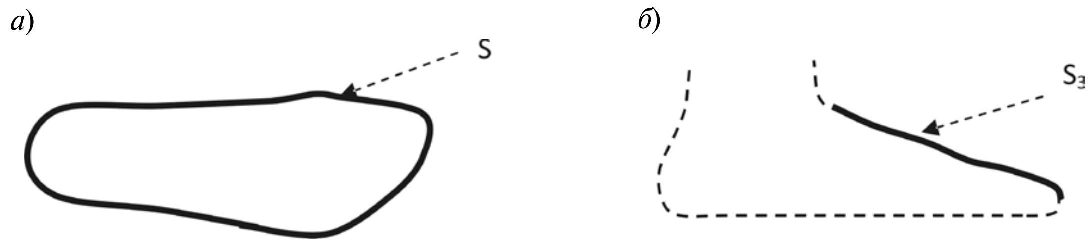


Рис. 2. Контуры стопы: *а* – горизонтальный, *б* – подъем

формата A4 или Letter и правую стопу в темном носке. Первые две фотографии содержат внутренний и внешний контуры стопы соответственно, а третья – контур ее подъема. Пример таких фотографий приведен на рис. 1. Предполагается, что на первой и третьей фотографиях лист бумаги и стопа находятся в одном и том же положении, а также что на миллиметр представленной на фотографиях сцены приходится не менее двух пикселей. Например, для 5-мегапиксельной камеры это достигается, если длина листа бумаги на фотографии составляет не менее 1/3 длины фотографии.

Требуется с точностью порядка миллиметра определить контур S горизонтальной ортогональной проекции стопы и значения высот точек контура S_3 подъема стопы (рис. 2).

Контур S может быть получен как объединение контуров S_1 и S_2, являющихся ортогональными проекциями контуров S'_1 и S'_2 внутренней и внешней частей стопы, путем совмещения их общих точек A и B (рис. 3). Контур S_3 является результатом ортогонального проецирования контура S'_3, представляющего собой множество точек максимальной высоты в поперечно-вертикальных сечениях стопы.

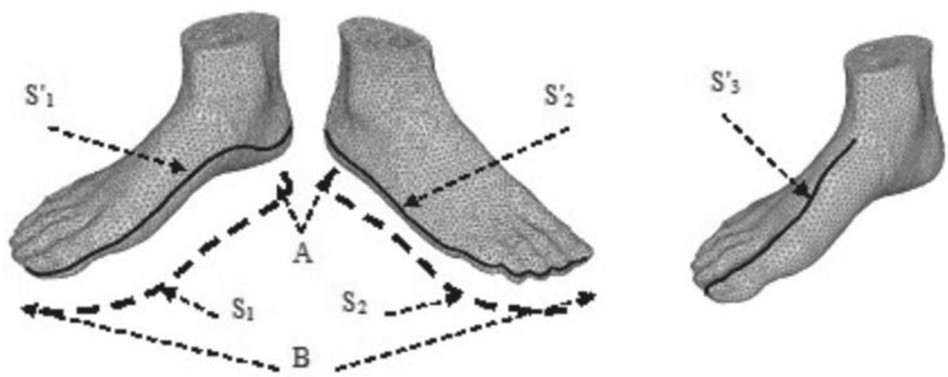


Рис. 3. Подлежащие определению контуры S_i являются ортогональными проекциями контуров S'_i

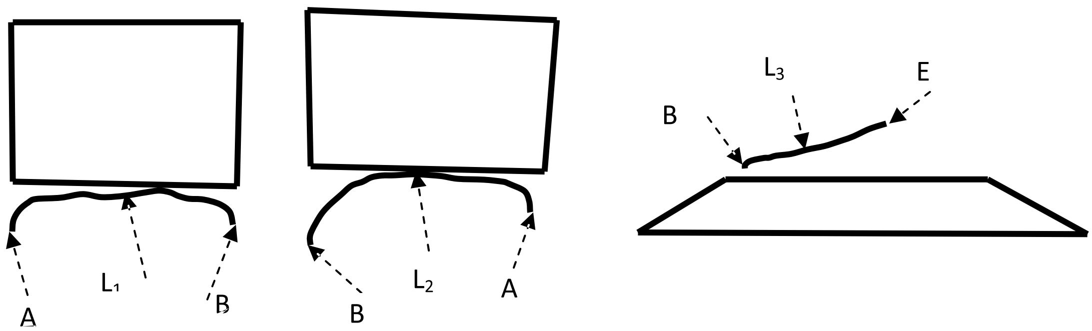


Рис. 4. Контуры листа бумаги и стопы, выделенные из заданных фотографий

Выделение контуров бумаги и стопы

Построение решения начинается с выделения из заданных фотографий контуров листа бумаги, внутренней части стопы L_1, внешней части стопы L_2 и контура подъема стопы L_3 (рис. 4), которые в дальнейшем будут преобразованы в искомые контуры S_i. Выделение контуров листа бумаги выполняется с помощью алгоритма Канни [4], а для построения контуров L_i используется алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 5. Данный алгоритм последовательно применяется к каждой из фотографий.

В блоке 1 уменьшается уровень шума, содержащегося в фотографии. Это достигается методом, предложенным в работе [5]. Полученное изображение преобразуется блоком 2 в Edge Map с помощью алгоритма Канни. Результирующее изображение используется в блоке 3 для нахождения множества замкнутых контуров, из которого в блоке 4 выделяется контур одетого на ногу носка (рис. 6), путем проверки каждого элемента множества на соответствие определенным критериям.

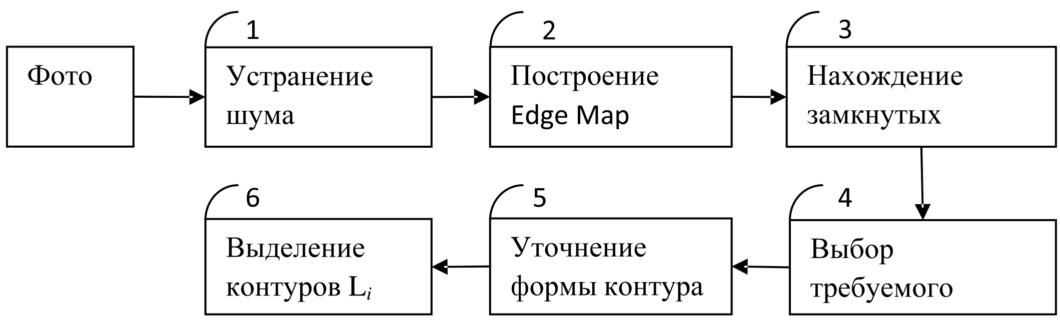


Рис. 5. Блок-схема алгоритма выделения контуров из фотографий

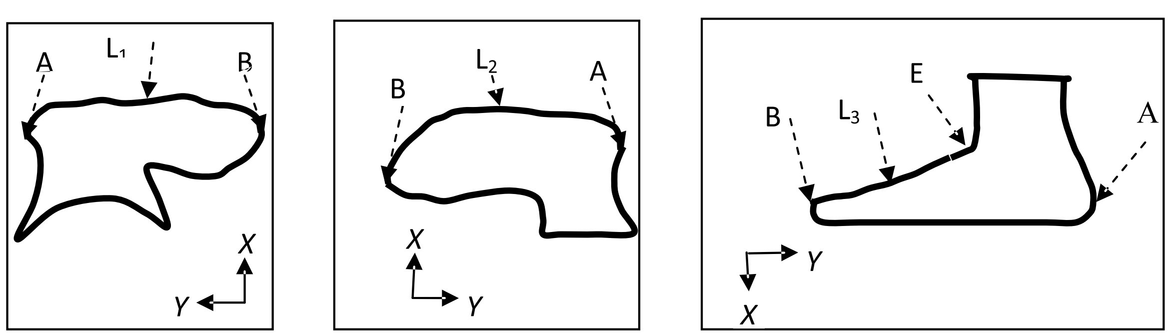


Рис. 6. Замкнутые контуры одетого на ногу носка, содержащие L_i

Основным критерием при поиске контуров носка является наличие двух точек A и B, являющихся концами пятки и носка соответственно. При анализе контуров в системах координат *XY*, показанных на рис. 6, точка A обнаруживается как точка, в которой достигается первый локальный максимум *Y* при обходе контура от точки с максимальной координатой *X* в направлении оси *Y*. Точка B определяется как точка контура, наиболее удаленная от A в секторе с углом 60 градусов, направленном против оси *Y*.

Дополнительными критериями являются следующие:

отрезок AB не должен иметь внутренних пересечений с контуром;

длина отрезка AB в пикселях должна находиться в пределах 0,5–1,2 длины листа бумаги.

Уточнение формы контура в блоке 5 выполняется с помощью алгоритма активного контура, описанного в работе [6]. В блоке 6 из построенных контуров носка выделяются искомые контуры L_i.

Построение приближенного решения

Приближенное решение строится на основе двух предположений: высотой контуров S'_1 и S'_2 можно пренебречь, то есть $S'_1 = S_1$ и $S'_2 = S_2$; контур S'_3 лежит в плоскости Ω, проходящей через точки A и B перпендикулярно к плоскости пола, то есть $S'_3 = S_3$ (рис. 7).

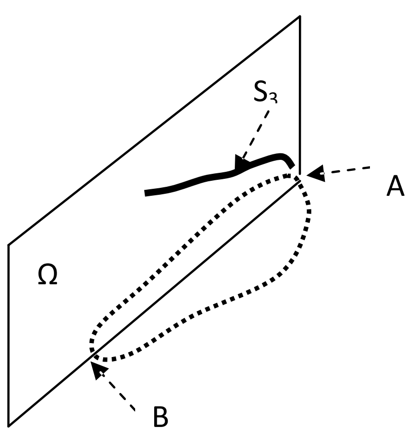


Рис. 7. Конур S_3 лежит в плоскости Ω, проходящей через точки A, B перпендикулярно плоскости пола

Порядок ошибок, порождаемых этими предположениями, оценивается в следующей главе.

Для преобразования контуров L_i в S_i определяются матрицы перспективных преобразований C^i (см., например, [7]), соответствующие заданным фотографиям. Вычисление этих матриц выполняется по трем изображениям листа бумаги известного размера, присутствующего на фотографиях, с помощью алгоритма, предложенного в [8]. Данный алгоритм строит искомые матрицы как произведение матрицы внутренней калибровки камеры *K* на матрицы внешней калибровки D^i:

$$C^i = KD^i,\ i = 1,\ 2,\ 3. \tag{1}$$

Матрица *K* учитывает особенности камеры и, в частности, искажения, вносимые этими особенностями. Матрицы D^i определяют системы координат камер в системе координат сцены, связанной с листом бумаги.

Пусть матрица *C* – одна из матриц C^i. Она отображает произвольную точку *M* из системы координат сцены, связанной с листом бумаги, в точку с координатами $\mathbf{v}$ в системе координат, связанной с фотографией, как показано на рис. 8. Используя однородные координаты $M = (X,\ Y,\ Z,\ 1)^T$ и $\mathbf{v} = (u,\ v,\ 1)^T$, данное преобразование можно записать в виде:

$$z\mathbf{v} = CM, \tag{2}$$

где *z* – масштабирующий коэффициент.

Матричное уравнение (2) эквивалентно трем обычным уравнениям:

$$\begin{aligned} zu &= c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14}, \\ zv &= c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24}, \\ z &= c_{31}X + c_{32}Y + c_{33}Z + c_{34}. \end{aligned} \tag{3}$$

Исключение z из первых уравнений дает два соотношения, связывающие трехмерные координаты точки и двухмерные координаты ее проекции:

$$\begin{aligned} &(c_{31}X + c_{32}Y + c_{33}Z + c_{34})u = \\ &= c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14}, \\ &(c_{31}X + c_{32}Y + c_{33}Z + c_{34})v = \\ &= c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24}. \end{aligned} \tag{4}$$

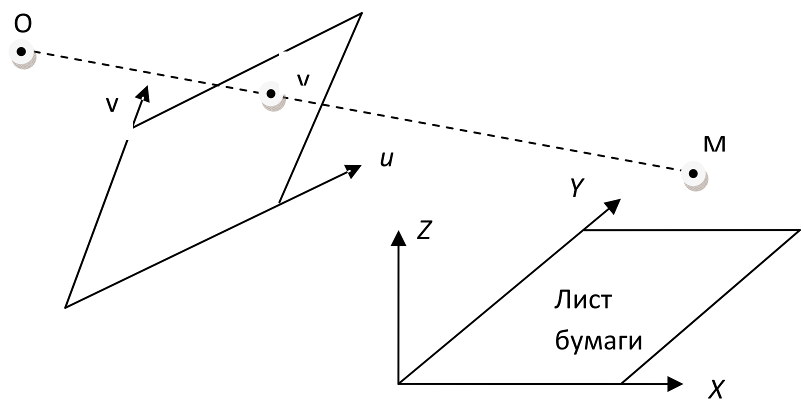


Рис. 8. Матрица перспективного проецирования отображает произвольную точку M
Точка O – позиция камеры

Эти соотношения позволяют по заданным координатам пикселя изображения (u,v) определить соответствующую ему точку сцены, если известна одна из координат X, Y или Z. Так, например, если известна координата Z, значения X и Y определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned}&(c_{11} - c_{31}u)X + (c_{12} - c_{32}u)Y = \\&= (c_{33}Z + c_{34})u - (c_{13}Z + c_{14}),\\&(c_{21} - c_{31}v)X + (c_{22} - c_{32}v)Y = \\&= (c_{33}Z + c_{34})v - (c_{23}Z + c_{24}).\end{aligned} \tag{5}$$

Согласно сделанному выше предположению, координаты Z точек контуров S'_i (I = 1, 2) равны нулю. Следовательно, соотношения (5) могут использоваться для вычисления координат X и Y контуров $S'_i = S_i$ по заданным координатам (u, v) контуров L_i. После того как контуры S_1 и S_2 определены, они объединяются в искомый контур S путем совмещения общих точек A и B (рис. 9).

Точки A и B определяют уравнение плоскости Ω (рис. 7) параллельной оси Z:

$$\begin{aligned}&X = kY + f,\\&k = (X_B - X_A) / (Y_A - Y_B),\\&f = (X_A Y_B - X_B Y_A) / (Y_A - Y_B),\end{aligned} \tag{6}$$

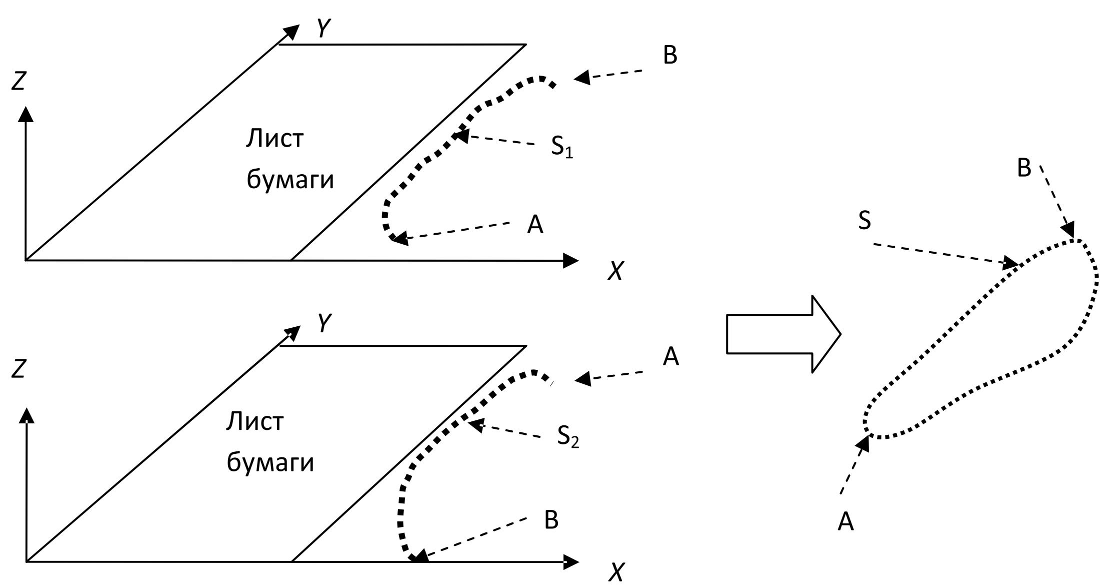


Рис. 9. Контуры S_1 и S_2 объединяются в единый контур S путем совмещения общих точек A и B

где (X_A, Y_A), (X_B, Y_B) — координаты точек A и B.

Подстановка уравнения (6) в соотношения (4) дает систему уравнений для вычисления координат контура S_3:

$$\begin{aligned}&(c_{31}ku + c_{32}u - c_{11}k - c_{12})Y + (c_{33}u - c_{13})Z =\\&\qquad = c_{11}f - c_{31}fu - c_{34}u + c_{14},\\&(c_{31}kv + c_{32}v - c_{21}k - c_{22})Y + (c_{33}v - c_{13})Z =\\&\qquad = c_{21}f - c_{31}fv - c_{34}v + c_{14},\end{aligned} \tag{7}$$

где в качестве u и v выступают координаты контура L_3 (рис. 4), а c_{ij} являются компонентами матрицы C^3.

Оценка ошибки приближенного решения

При получении приближенного решения предполагалось, что высота контуров S'_i равна нулю. Ошибка, порождаемая этим предположением, может быть оценена следующим образом. Пусть камера позиционирована параллельно полу в точке O, находящейся на расстоянии H_o от пола (рис. 10). Пусть точка P' контура S' имеет высоту Z = H и расположена на расстоянии D от оси камеры OO'. Искомая ошибка Δ равна длине отрезка PP*:

$$\Delta = HD / (H_o - H) \approx HD / H_o. \tag{8}$$

Как показали эксперименты, описанные в последнем главе, произведение HD достигает максимума в области пятки (точка A), где оно имеет значение порядка

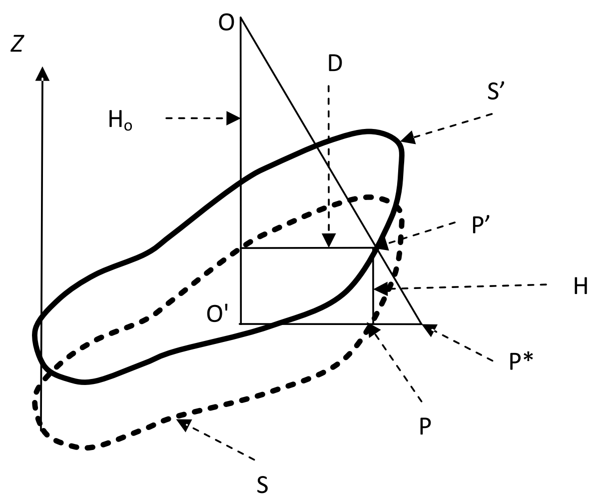


Рис. 10. Отрезок PP* определяет разницу между центральным и параллельным проецированием

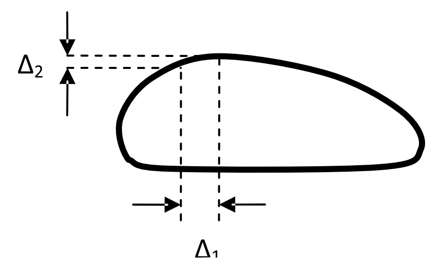


Рис. 11. Продольное и поперечное сечения стопы

37 см² (H~2,5 см, D~15 см) для стопы длиной 30 см. Величина H_o имеет порядок 100—150 см. Следовательно, величина абсолютной ошибки, порожденной первым упрощающим предположением, составляет порядка 3 мм для стопы длиной 30 см. С изменением длины стопы пропорционально изменяются все величины, входящие в формулу (8), так что порядок абсолютной ошибки не изменяется.

Второе предположение устанавливает, что точки контура S'_3 лежат в плоскости Ω. В действительности эти точки могут отклоняться от плоскости Ω на величину Δ_1, имеющую порядок 5 % ширины продольно-поперечного сечения стопы (рис. 11). Однако, как показали эксперименты, вычисленные значения координат контура S_3, выполненные в рамках этого предположения, имеют точность порядка миллиметра. Это объясняется тем, что из-за гладкости контура продольно-поперечного сечения, отношение Δ_2/Δ_1 мало при малых Δ_1.

Таким образом, учитывая, что абсолютная ошибка в построении контуров не должна превышать миллиметра, для уточнения приближенного решения требуется отказаться только от первого предположения.

Уточнение приближенного решения

Основой для построения уточненного решения является экспериментально установленная функциональная зависимость между значениями Z контура S' и высотой h контура S_3 в центре стопы (рис. 12):

$$Z = hf_i(t), i = 1, 2, \tag{9}$$

где t — параметр, определяющий положение

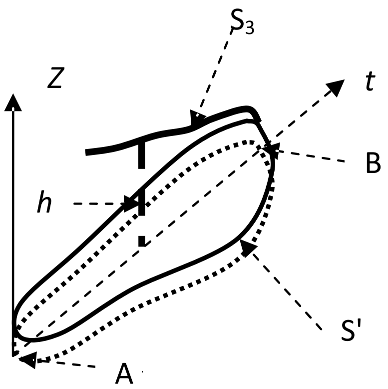


Рис. 12. Величина h определяет высоту контура S_3 в центре стопы

точки на отрезке АВ; h – высота контура S_3 в точке t = 0,5; $f_i(t)$ – функции значений высот контуров S'_i (i = 1, 2), приведенных к высоте контура S_3 в точке t = 0,5.

Графики усредненных (по числу экспериментов) значений этих функций приведены на рис. 13.

Формула (9) используется для уточнения значений координат контуров S_1 и S_2 с помощью соотношений (5). В качестве величины h берется значение, полученное в приближенном решении, а значение параметра t вычисляется по формуле:

$$t = (Y - Y_A) \,/\, (Y_B - Y_A), \qquad (10)$$

где Y, Y_A и Y_B также берутся из приближенного решения. Результатом уточнения контуров S_1 и S_2 является, в частности, уточнение координат точек А и В. Так как эти координаты использовались для построения контура S_3, то он тоже должен быть уточнен.

Полный алгоритм уточнения приближенного решения является итерационным:

Пусть через S_i^1 обозначены контуры S_i, полученные в результате приближенного решения.

k = 0;

do {

k = k+1;

for (всех $(u,v) \in L_i$, (i = 1, 2)){

Вычислить t по формуле (10), используя S_i^k;

Вычислить h, используя S_3^k;

Вычислить Z по формуле (9);

Вычислить S_i^{k+1} с помощью соотношений (5);

}

Вычислить коэффициенты k и f по формулам (6). Координаты точек А и В извлекаются из контура S_1^{k+1};

for (всех $(u,v) \in L_3$)

Вычислить S_3^{k+1} с помощью соотношений (7);

} **while** (max$|S_i^{k+1} - S_i^k| > \delta$ для всех i = 1, 2, 3)

Построить контур S путем объединения контуров S_1^k и S_2^k. Положить $S_3 = S_3^k$.

Эксперименты и результаты

Проведенные эксперименты преследовали две цели: оценку абсолютной ошибки приближенного и уточненного решений и построение функциональных зависимостей между значениями Z контуров S'_1, S'_2 и высотой h контура S_3 в центре стопы. В экс-

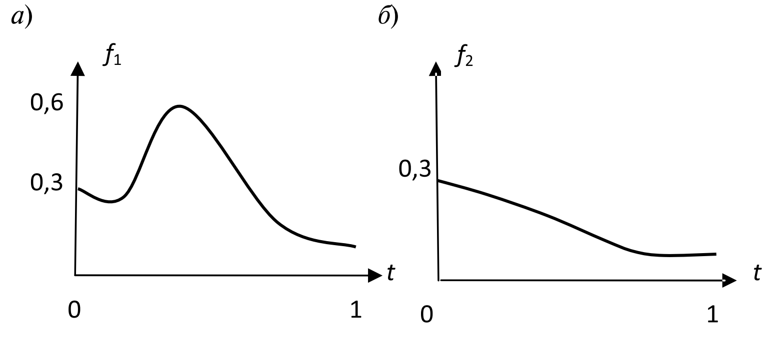


Рис. 13. Экспериментально установленная функциональная зависимость между значениями Z контура S' и высотой h контура S_3 в центре стопы: *а* – внутренняя часть стопы; *б* – внешняя часть стопы

периментах приняли участие 63 человека. Стопы каждого участника были отсканированы 3D сканером Artec MH-T, обеспечивающим точность построения 3D модели не ниже 0,1 мм.

С помощью созданных 3D моделей получены данные, использованные для оценки абсолютной ошибки приближенного решения, и построены графики усредненных значений функций $f_i(t) = Z/h$ для внутреннего ($i = 1$) и внешнего ($i = 2$) контура стопы, приведенные на рис. 13. Отклонения измеренных значений функций от усредненных не превышали 19 %.

Для оценки размеров абсолютной погрешности, вызванной использованием усредненных значений функций $f_i(t)$, провели расчеты, в которых эти функции заменялись на $(1 \pm 0{,}19)f_i(t)$ соответственно. Расчеты показали, что оцениваемая абсолютная погрешность не превышает 0,55 мм.

С целью проверки алгоритма проведены расчеты по фотографиям стоп 63 участников экспериментов. Фотографирование выполнялось девятью различными камерами (три фотоаппарата и шесть смартфонов) с разрешением не ниже 5 мегапикселей. Полученные фотографии были приведены к единому разрешению, равному 5 мегапикселей. Результаты расчетов сравнивались с контурами, полученными из 3D моделей ступней путем параллельного проецирования. Значения полученных максимальных абсолютных погрешностей Δ, упорядоченные по возрастанию, приведены на графике, представленном на рис. 14.

Как видно из графика, средняя максимальная абсолютная погрешность метода, полученная по результатам 63 экспериментов, составляет 0,61 мм, а максимальная – 1,18 мм.

В качестве значения δ, входящего в условие окончания цикла алгоритма уточнения результатов расчета, была выбрана величина, равная 0,1 мм, что приводило к окончанию итерационного процесса после

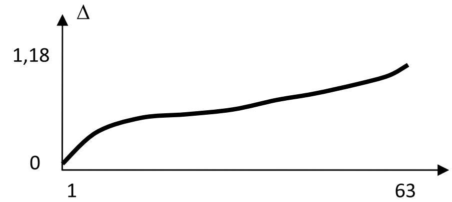


Рис. 14. Значения максимальных абсолютных погрешностей для 63 экспериментов, упорядоченные по возрастанию

двух-трех итераций. Уменьшение величины δ, как правило, не приводило к уменьшению абсолютной погрешности. Последнее связано как с неточностью экспериментально установленных функций $f_i(t)$, так и с неточностью исходных контуров L_i, полученных из дискретных фотографий.

Время, требуемое для построения контуров S и S_3 по заданным контурам L_i для одной стопы, составляет порядка 0,15 с на процессоре Intel® Core™ i7-2600 CPU 3.40 GHz. Указанная оценка может быть существенно улучшена за счет распараллеливания вычислений, например, на GPU, т. к. тела циклов **for**, в приведенном в статье алгоритме, могут выполняться параллельно на независимых наборах данных. Общее время, включающее время выделения контуров листа бумаги и L_i из фотографий без распараллеливания вычислений, составляет величину порядка 0,3 с.

Разработан итерационный алгоритм построения контуров стопы по трем ее фотографиям, содержащим стандартный лист бумаги известного размера. Алгоритм учитывает присутствующие на фотографиях перспективные и радиальные искажения. При построении горизонтального контура учитываются высоты точек контура над уровнем пола. Для вычисления этих высот экспериментально установлена их функциональная зависимость от высоты стопы в ее центре. Экспериментально установлено, что точность построения искомых контуров составляет величину порядка миллиметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lee H., Lee K., Choi T.** Development of a low cost foot-scanner for a custom shoe tailoring system // In 7th Symp. Footwear Biomechanics, Cleveland. 2005.

2. **Zhong S., Yang Y., Huang Y.** Data Slicing Processing Method for RE/RP System Based on

Spatial Point Cloud Data // Computer-Aided Design & Applications. 2013. Vol. 11(1). Pp. 20–31.

3. AUTODESK '123D'[электронный ресурс] / URL: http://www.123dapp.com/catch

4. **Canny J.** A computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intellegence. 1986. Vol. 8(6). Pp. 679–698.

5. **Belyaev S., Shubnikov V.** Edge Based Image Comparison and Noise Removal // The 23rd Internat. Conf. on Computer Graphics and Vision GRAPHICON'2013. Pp. 65–70.

6. **Kass M., Witkin A., Terzopoulos D.** Snakes: Active Contour Models // Internat. J. of Computer Vision. 1987. Vol. 1. No. 4. Pp. 321–331.

7. **Forsyth D., Ponce J.** Computer Vision: A Modern Approach. 2nd ed. Pearson education Inc., 2011.

8. **Zhang Z.** A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2000. Vol. 22(11). Pp. 1330–1334.

9. **Шубников В.Г., Беляев С.Ю.** Определение размеров стопы человека по фотографиям // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 2 (193). С. 23–30.

REFERENCES

1. **Lee H., Lee K., Choi T.** Development of a low cost foot-scanner for a custom shoe tailoring system*, In 7th Symp. Footwear Biomechanics*, Cleveland, 2005.

2. **Zhong S., Yang Y., Huang Y.** Data Slicing Processing Method for RE/RP System Based on Spatial Point Cloud Data, *Computer-Aided Design & Applications*, 2013, Vol. 11(1), Pp. 20–31.

3. *AUTODESK '123D'.* Available: http://www.123dapp.com/catch

4. **Canny J.** A computational approach to edge detection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intellegence*, 1986, Vol. 8(6), Pp. 679–698.

5. **Belyaev S., Shubnikov V.** Edge Based Image Comparison and Noise Removal, *The 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON'2013*, Pp. 65–70.

6. **Kass M., Witkin A., Terzopoulos D.** Snakes: Active Contour Models, *International Journal of Computer Vision*, 1987, Vol. 1, No. 4, Pp. 321–331.

7. **Forsyth D., Ponce J.** *Computer Vision: A Modern Approach*, 2nd ed., Pearson education Inc., 2011.

8. **Zhang Z.** A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2000, Vol. 22(11), Pp. 1330–1334.

9. **Shubnikov V.G., Belyayev S.Yu.** Opredelenie razmerov stopyi cheloveka po fotografiyam [Estimating a human foot size from images], *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 2 (193), Pp. 23–30. (rus)

ШУБНИКОВ Владислав Германович – *преподаватель кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vlad.shubnikov@gmail.com

SHUBNIKOV, Vladislav G. *St. Petersburg Polytechnic University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vlad.shubnikov@gmail.com

БЕЛЯЕВ Сергей Юрьевич – *доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: sergey.belyaev@d-inter.ru

BELYAEV, Sergey Yu. *St. Petersburg Polytechnic University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: sergey.belyaev@d-inter.ru

УДК 004.93'12

А.А. Хуршудов

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Подход выделения признаков, широко применяющийся при решении прикладных задач компьютерного зрения, в настоящее время включает в себя использование алгоритмов обучения признакам без учителя, таким как ограниченная машина Больцмана и разреженный автоэнкодер, что позволяет извлекать признаки автоматически из доменно-специфичной общей выборки. Обучение без учителя особенно эффективно в сочетании с моделями глубокого обучения, такими как сверточные нейронные сети и глубокие сети доверия (DBN). Однако при обработке высокоуровневых и структурированных данных, подверженных инвариантным трансформациям (что особенно актуально для компьютерного зрения в 3D и в движении), построение словаря признаков для отдельно взятого элемента выборки может быть проблематичным.

Предложен альтернативный подход, включающий в себя обнаружение некоторых пространственных структур в изображениях, характерных для конкретной выборки. Подобные способы имеют историю применения в задачах распознавания для отдельных, узкоспецифичных доменов (таких как обнаружение взаимоотношений между признаками черт лица). Рассмотренный алгоритм предлагает общий подход к проблеме, эксплуатируя некоторые свойства ориентационных клеток первичной зрительной коры головного мозга, с их помощью обнаруживая обобщенные свойства изображений и агрегируя их для получения информативных статистических параметров, которые в дальнейшем могут использоваться непосредственно для распознавания и классификации.

ВЫДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ; ЭКВИВАРИАНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ; ЗРИТЕЛЬНАЯ КОРА; РАЗРЕЖЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ; ФИЛЬТР ГАБОРА.

A.A. Khurshudov

DISCOVERING LOCAL SPATIAL RELATIONSHIPS FOR IMAGE RECOGNITION

Nowadays the feature detection approach widely used in lots of computer vision applications has been particularly improved by using unsupervised feature learning techniques such as Restricted Boltzman Machines and Sparse Autoencoders. It helps to learn features from large amounts of generally unrelated (or domain-related) data. Unsupervised feature learning has especially become useful combined with deep learning models like convolution neural networks and Deep Belifef Networks. However, when dealing with complex and high-level structured data, as long as with data exposed to lots of invariant transformations (which is highly relevant to a computer vision in 3D and motion), it can become a problem to construct a bag-of-words like a feature dictionary to contain all the possible changes an object can take. Instead, the study offers a different approach involving discovering some relevant spatial relationships that appear across the dataset. The idea by itself is not a new one. The classical example of using spatial structures for recognition would be a distinct pattern of a human face, with two eyes and a mouth. However, most of the existing solutions are strictly limited by a certain domain. The study proposes an algorithm inspired by some properties of a primary visual cortex V1. It mimics the functionality of orientation cells, discovers general properties of a natural image and aggregates them together to extract some useful statistics to be further used in a classification algorithm.

FEATURE DETECTION; INVARIANT TRANSFORM; PRIMARY VISUAL CORTEX; SPARSE CODING; GABOR FILTER.

При изучении нейробиологических основ зрительной системы и эффективных алгоритмов представления визуальной информации для распознавания изображений был предложен подход объединения существенных признаков изображенного объекта в некоторую иерархическую структуру, где признаки низшего уровня, такие как границы и штрихи, комбинируются в более сложные, такие как углы, детали контуров объектов, элементы фигуры или лиц, и т. д. В биологическом направлении подтверждением существования иерархии признаков являются клетки зрительной коры головного мозга, для которых неоднократно было показано [1, 2] существование ориентационной избирательности (чувствительности к границам под определенным углом), и отдельные классы «сложных» клеток, комбинирующих представления простых. Известно также о существовании клеток, активирующихся в ответ на исключительно узкоспециализированные и сложные объекты, такие как отдельный человек, причем способных при этом проявлять высокую степень толерантности к искажениям [3]. Вопрос о представлении в коре головного мозга сложных, функционально обособленных признаков до сих пор остается нерешенным.

В прикладных областях, таких как компьютерное зрение и машинное обучение, предлагались свои варианты построения иерархии признаков, наиболее известным из которых является обучение признакам на основе разреженного кода [4]. Подобный подход показал высокую эффективность на тестовых наборах данных, таких как выборки ImageNet [5] (массивная структурированная база изображений, де-факто стандарт сравнения алгоритмов распознавания), но при этом подвергается критике в отдельных исследованиях за статистическую неэффективность и избыточность получаемого кода. Отдельную сложность представляют собой пространственные преобразования, такие как масштабирование, трансляция и вращение, способные радикально изменить форму изображенного объекта и требующие отдельного набора признаков для разных возможных позиций и комбинаций, влияющих на восприятие характеристик изображения (таких как яркость, контраст и т. д.). Предположение об использовании разреженного кода в зрительной системе животных и человека представляется убедительным на некоторых (низших) уровнях обнаружения признаков, но для граничного случая несложно показать [6], что кодирование каждого представления отдельным элементом разреженного ансамбля нейронов требует не соответствующего реальности количества нейронов.

Таким образом, для высших уровней иерархии признаков необходим отдельный механизм, устойчивый к пространственным преобразованиям.

Проблемы обучения высокоуровневым признакам

Этот вид обучения, как правило, проводится без учителя, не считая (при необходимости) организацию выборки таким образом, чтобы она соответствовала выбранному домену. При этом могут использоваться различные алгоритмы, такие как анализ главных компонент (Principal Component Analysis — PCA) [7], разреженный автоэнкодер [8], ортогональное согласованное преследование (Orthogonal Matching Pursuit — OMP) [9], решающие, принципиально, одну задачу: аппроксимацию выборки набором ограниченных, независимых и (как правило, желательно) разреженных компонент, которые, в конечном итоге, и представляют собой признаки изображения.

Для составления иерархии признаков проводится несколько этапов такого обучения на локальных фрагментах изображений различного размера и детализации. Возможно использование информации, полученной на первых этапах обучения, для фильтрации выборки. Так, обнаружив, что изображение не содержит низкоуровневых признаков, алгоритм может отбросить его при изучении признаков более высоких уровней.

Конечный результат схематично выглядит, как показано на рис. 1.

В примере признаки получены с помощью алгоритма разреженного автоэнкодера, но похожий результат может достигаться любым из перечисленных выше методов.

Очевидным следствием подобного подхода является то, что каждый следующий уровень иерархии будет состоять из большего количества признаков, чем предыдущий, в силу того, что признаки высоких уровней представляют собой некоторое подмножество комбинаций признаков низкого уровня. Кроме того, дополнительную

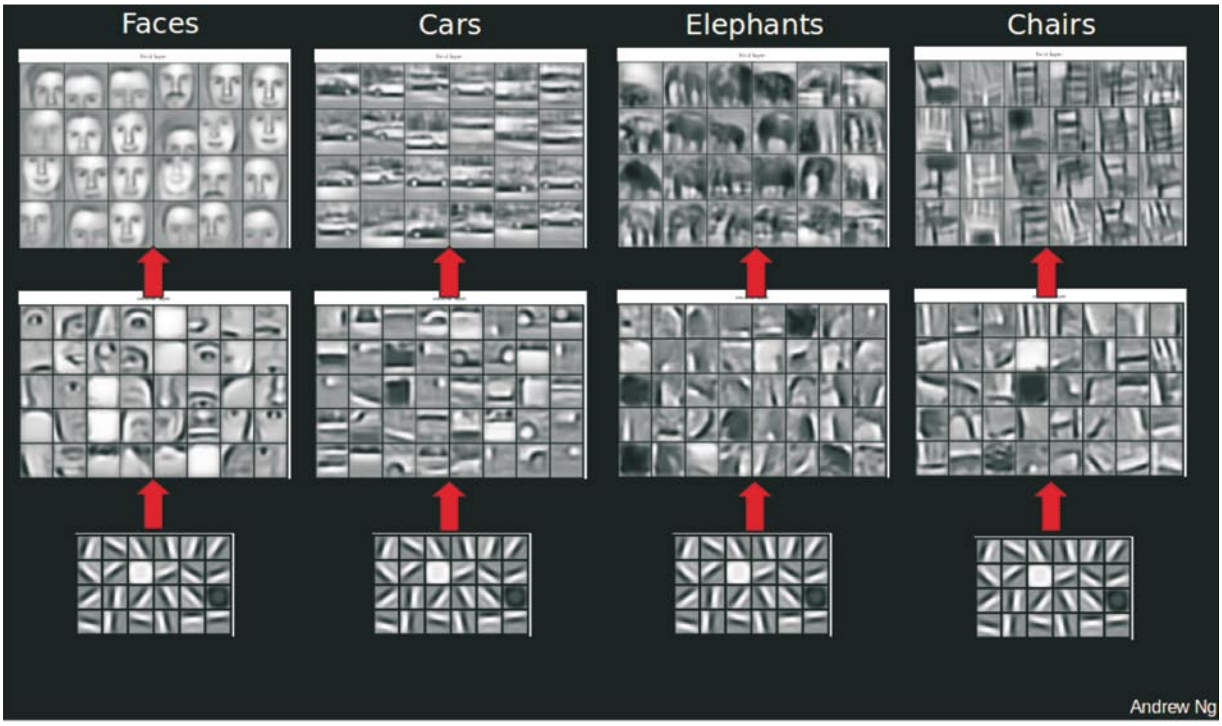


Рис. 1. Схема иерархии признаков для различных доменов
(слайд ECCV 10, Европейской конференции по проблемам компьютерного зрения)

вариативность вносят пространственные трансформации, особенно трехмерные, которые начинают играть роль на уровнях представления целых объектов. Поворот угла камеры в трехмерном пространстве, трансляция и окклюзия (частичное загораживание) способны радикально изменить вид объекта. С точки зрения естественного зрения подобные трансформации считаются инвариантными, но алгоритмы разреженной декомпозиции при этом воспринимают каждый такой экземпляр выборки как различные изображения.

На практике обучение путем выделения разреженных компонент работает тем успешнее, чем более ограничено пространство инвариантных преобразований объектов выборки. Так, фотографии человеческих лиц (фиксированная часть фигуры, не имеющая составных изменяющихся элементов) успешнее подвержены классификации, чем фотографии собак (на фото изображено тело целиком, способное принимать множество различных положений и выглядящее по-разному с различных углов зрения).

Для решения поставленных задач было проведено тестирование алгоритма разреженного автоэнкодера на выборках человеческих лиц и силуэтов животных. Если сформулированное предположение о фундаментальной ограниченности подхода выделения разреженных компонент верно, то выборка, содержащая в себе большое количество трехмерных инвариантных преобразований, будет плохо поддаваться обучению. Результаты тестирования показывают, что этот вывод подтверждается (см. рис. 2).

Таким образом, представляется вероятным, что несмотря на эффективность при обучении низкоуровневым признакам, метод декомпозиции выборки на составляющие ключевые признаки неэффективен на высоких уровнях. Сама идея построения иерархии признаков, представляющих собой компоненты декомпозиции изображений выборки, неполна без учета пространственных закономерностей и характеристик, которые признаки приобретают с увеличением размера, сложности и детализации. Так, признаки первого уровня иерархии, обычно соотносящиеся с

Рис. 2. Обучение высокоуровневым признакам
на примерах LFW Face Database и Kaggle's Cats vs Dogs Challenge
Вторая выборка практически не поддается декомпозиции (зеленым отмечены удачные результаты)

рецептивными полями первичной зрительной коры (V1) и представляющие собой контрастные штрихи различной ориентации, узкоспецифичны и не подвержены инвариантным трансформациям: любое изменение ориентации штриха представляет собой переход к другому признаку, в отличие от рассмотренных признаков высоких уровней, где один и тот же силуэт лица может рассматриваться с различных углов, трансляцией в поле зрения или разным масштабом.

Ограниченная разреженная аппроксимация фильтрами Габора

Рассмотрим ограниченную версию алгоритма ортогонального согласованного преследования со следующими правилами:

в качестве словаря используется набор двумерных фильтров Габора, отличающихся углом ориентации φ, последовательно меняющимся от нуля до 2π;

количество коэффициентов, отличных от нуля, для результата работы алгоритма выберем равным единице.

Входные данные: сигнал b, матрица фильтров Габора А, критерий остановки (пороговое значение; варьируется в зависимости от приложения) n.

Выходные данные: вектор аппроксимации c, соответствующий линейному разложению сигнала b на компоненты матрицы А.

Алгоритм:

1. Установить остаток $r_0 = b$, счетчик итераций $t = 0$ и вектор $V = \varnothing$.

2. $\nu_t = i$, где a_i удовлетворяет условию $\max < r_t, a_k >$, где a_k – строки матрицы А.

3. Добавить ν_t в вектор $V_t : V_t = V_{t-1} \bigcup \{v_t\}$.

4. Для вектора c решить методом наименьших квадратов:

$$\min_{c \in C^{v_t}} \left\| b - \sum_{j=1}^{t} c(v_j) a_{v_j} \right\|.$$

5. Рассчитать новый остаток с использованием c:

$$r_t = r_{t-1} - \sum_{j=1}^{t} c(v_j) a_{v_j}.$$

6. $t = t + 1$.

7. Если критерий остановки достигнут, то для каждого значения $c_i \neq \max(c), c_i = 0$. Вернуть c.

Изображения выборки кодируются следующим образом: каждый отдельный экземпляр разбивается на множество фрагментов, для каждого из которых выполняется алгоритм ограниченного OMP. Таким образом, каждый фрагмент изображения аппроксимируется одним фильтром Габора, играющим роль локального рецептивного поля простой клетки зрительной коры. Единственный ненулевой коэффициент, полученный в результате OMP, при этом определяет силу активации отдельной клетки. Разбивка изображения на фрагменты может происходить как простой продольно-поперечной сеткой, так и с перекрытием и последующим усреднением перекрывающихся активаций (рис. 3).

Тестовые результаты показывают, что несмотря на грубость аппроксимации (каждый небольшой фрагмент изображения заменяется на максимально соответствующий ему прямой отрезок заданной ориентации), разбиение с перекрытием сохраняет большинство деталей, необходимых для распознавания, устраняя при этом часть шума, оттенки и текстуры поверхностей.

Полученный результат представляется моделью того, как воспринимает изображение совокупность клеток зрительной коры V1. Фильтры Габора в качестве признаков используются ввиду нескольких причин. Они неоднократно использовались в качестве моделирования рецептивных полей первичной зрительной коры [10, 11]. Дж. Бергстра и И. Бенджио [12] описывают статистические достоинства таких признаков по сравнению с признаками, обнаруженными с помощью обучения. Ключевым элементом в извлечении высокоуровневых признаков и основным преимуществом данного алгоритма по сравнению с классическим алгоритмом OMP при этом оказывается тот факт, что фильтры Габора позволяют придать локальным участкам изображения пространственную семантику. За счет того что каждый из них соотносится с определенным, заранее известным углом ориентации φ, оказывается возможным выделить непрерывные участки одинаковой ориентации, соответствующие протяженным границам, и участки сочленений, где

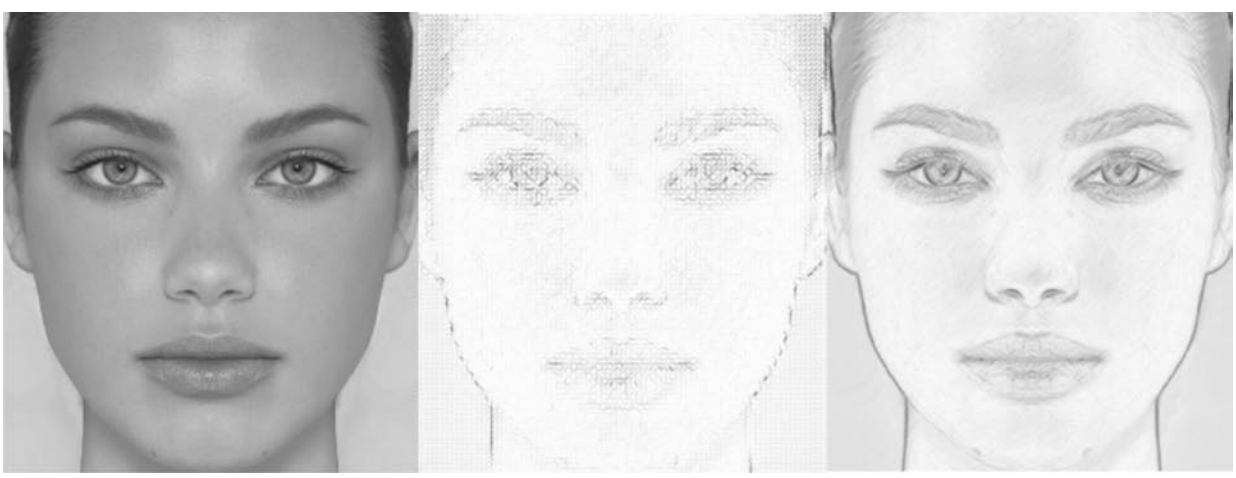


Рис. 3. Результат обработки изображения ограниченным OMP с фильтрами Габора (карта активаций)

Слева направо: оригинал изображения, результат разбиения без перекрытия и с перекрытием соответственно. Наиболее темные участки изображения представляют наибольшие значения активации на ограниченном пространстве встречаются активации клеток различных ориентаций. Более того, подобный подход позволяет ввести метрику схожести различных клеток, определив ее через разницу углов ориентации:

$$s = \|\varphi_1 - \varphi_2\| \bmod \varphi_{\max}, \quad (1)$$

где φ_1 – значение ориентации первой клетки; φ_2 – значение ориентации второй клетки; $\varphi_{\max}$ – максимальное значение ориентации.

Таким образом, клетки, кодирующие ортогональные друг другу фильтры, будут восприниматься моделью как максимально различные.

Локальные пространственные структуры на базе групп ориентационных клеток

Дальнейшая обработка изображения строится на предположении, что устойчивые комбинации локальных участов изображения определенной ориентации и участков-сочленений могут эффективно использоваться в качестве признаков для задачи распознавания. Рассмотрим в качестве примера базу данных рукописных цифр MNIST. Символы письменности в качестве объектов классификации особенно хорошо подходят для иллюстрации используемой идеи, поскольку, как представляется в современных работах [13], письменность изначально составлялась таким образом, чтобы различные ее знаки были эффективно различаемыми наборами штрихов и пересечений. При этом знаки письменности подвержены инвариантным преобразованиям (существует огромное количество шрифтов, вариаций почерка и материалов, влияющих на внешний вид), что объединяет этот пример с рассматриваемыми ранее инвариантными преобразованиями в 3D.

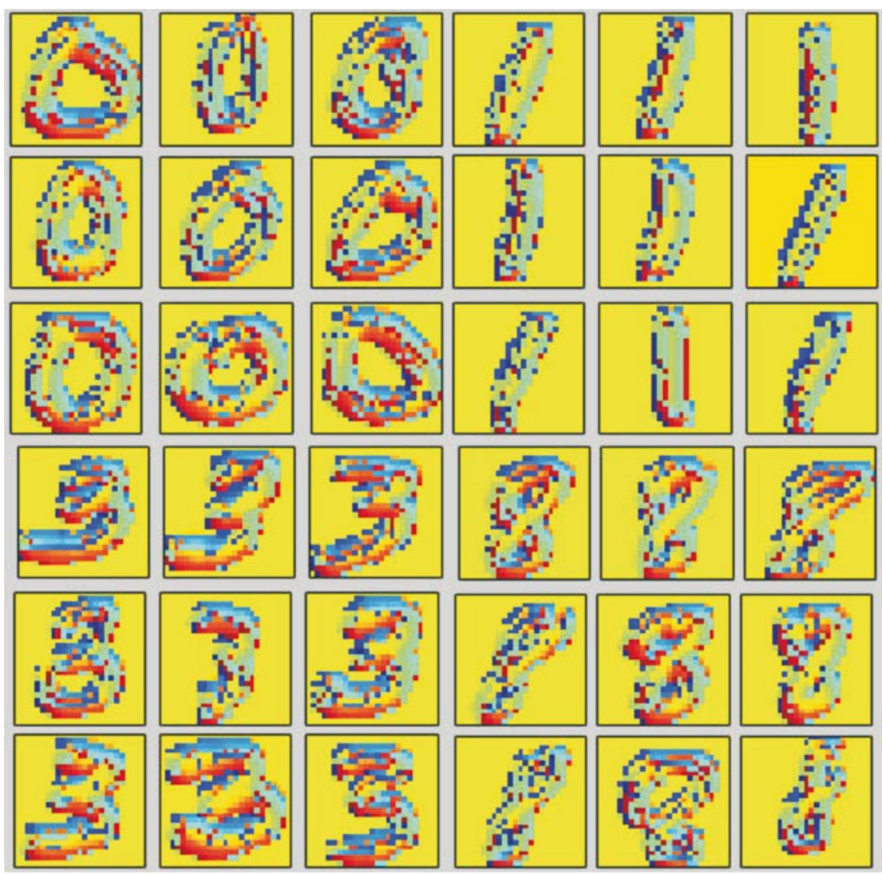


Рис. 4. Карты ориентаций цифр MNIST после преобразования ограниченным ОМР
Каждый пиксель соответствует одной клетке, цвет определяет ориентацию. Близкие оттенки изображают схожие клетки

Карты ориентаций демонстрируют схожие цветовые участки в изображениях одного класса (рис. 4). Становится возможным выделять продолжительные «гладкие кривые», где ориентации соседних клеток изменяются незначительно, сочленения или переходы между однородными участками, а также концы линий. Однако разбиение изображений на фрагменты с перекрытием оставляет некоторое количество шума – случайных одиночных активаций. Для фильтрации и усиления позиций существующих групп активных клеток применим алгоритм, эксплуатирующий идею латерального ингибирования [13], соревновательного взаимодействия между соседними клетками, в ходе которого клетки с высоким значением активации и поддержкой со стороны схожих соседей распространяют свое влияние на отличающихся соседей, корректируя их активацию в сторону своей.

Алгоритм:

Входные данные: карта ориентаций O_{map}, карта активаций A_{map}, пороговое значение активации A_t, пороговое значение схожести O_t, максимальное значение ориентации $\varphi_{\max}$.

Выходные данные: фильтрованные карты O'_{map}, A'_{map}.

1. $O'_{\text{map}} = O_{\text{map}}$, $A'_{\text{map}} = A_{\text{map}}$.

2. Установить счетчик изменений $c = 0$.

3. Для каждой клетки (i, j) в пределах карты ориентаций:

3.1. Получить $n_{i,j}$ – множество всех соседей клетки (i, j);

3.2. Если $A_{\text{map}_{i,j}} > A_t$, и нет ни одного элемента $n_{i,j}$ такого, что $A_{\text{map}_{ni,nj}} > A_t$ и $\left\| O_{\text{map}_{i,j}} - O_{\text{map}_{ni,nj}} \right\| \bmod \varphi_{\max} < O_t$, то установить

$$O'_{\text{map}_{i,j}} = \frac{\sum_{ni,nj} O'_{\text{map}_{ni,nj}}}{\text{length}(n_{i,j})}, \quad A'_{\text{map}_{i,j}} = \frac{\sum_{ni,nj} A'_{\text{map}_{ni,nj}}}{\text{length}(n_{i,j})};$$

3.3. Если $A_{\text{map}_{i,j}} < A_t$, и нет ни одного элемента $n_{i,j}$ такого, что $A_{\text{map}_{ni,nj}} > A_t$ и $\left\| O_{\text{map}_{i,j}} - O_{\text{map}_{ni,nj}} \right\| \bmod \varphi_{\max} < O_t$, то $A'_{\text{map}_{i,j}} = 0$;

3.5. $c = c + 1$.

4. Повторять, пока $c \neq 0$.

После снижения шума латеральным ингибированием появляется возможность поиска локальных элементов с большей сложностью, таких как соединения однородных регионов и концы линий. В современной психофизиологии существует большое количество подтверждений тому, что именно такие детали изображения исследуются зрительной системой животных и человека с наибольшим вниманием и, вероятно, важны для распознавания.

Таким образом, изображение MNIST (28×28, размерность 784) представляется композицией точек пересечений и концов линий, которых для достоверного отображения любой цифры достаточно не более шести (по аналогии с символами почтового индекса). Такое представление, кроме того,

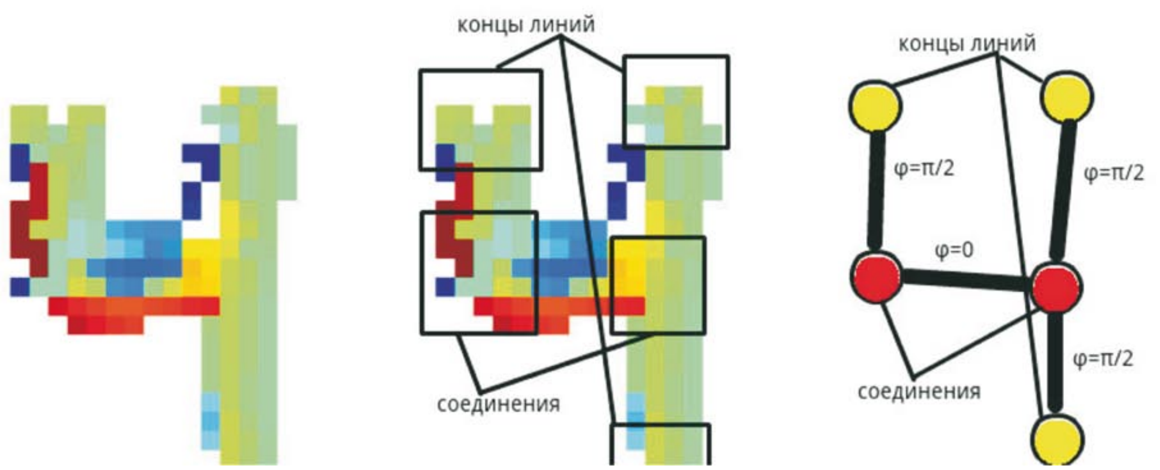


Рис. 5. Изображение, обработанное латеральным ингибированием, и дальнейшее выделение соединений и концов линий

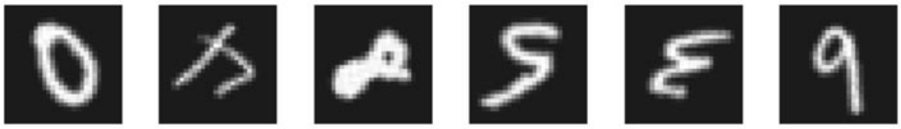


Рис. 6. Примеры экземпляров выборки MNIST с вращением

способно обеспечить высокий уровень ротационной устойчивости, если каждую цифру представить в виде маршрута обхода полученного графа, где каждый элемент маршрута будет представлять собой угол между двумя ребрами. Так, на рис. 5 угол $\pi/2$ между левой верхней чертой и горизонтальной поперечной сохранится, вне зависимости от того, на какой угол будет повернуто изображение. Инвариантность к масштабированию может достигаться, если длины ребер графа нормировать относительно средней или максимальной величины. При этом алгоритм распознавания будет воспринимать относительные расстояния между узлами, а не абсолютные.

Оценка результатов работы алгоритма

Для оценки результатов полученного алгоритма использована база MNIST с искусственным расширением выборки. Каждый образец был подвергнут нескольким пространственным преобразованиям, включающим в себя упомянутые трансляцию, вращение и масштабирование (рис. 6).

В качестве обучающего алгоритма использовалась софтмакс-регрессия (мультиномиальная регрессия) [14]. В качестве эталонных показателей в эксперименте применялись результаты работы классического многослойного перцептрона и сверточной нейронной сети архитектуры LeNet [15]. Для каждого алгоритма в статье приведено процентное значение успешно распознанных элементов выборки.

Результаты эксперимента демонстрируют преимущества рассмотренного алгоритма на выборках с большим количеством пространственных преобразований. При этом для отдельного класса преобразований трансляции эффективность алгоритма уступает сверточной нейронной сети, одним из ключевых свойств архитектуры которых как раз и является трансляционная устойчивость.

Для классификации изображений, имеющих большую структурную сложность, представляется целесообразным локальное выделение устойчиво повторяющихся графов в обособленных участках изображения (таких как глаза, нос и рот для распознавания человеческих лиц). Эти локальные структуры затем представляются единственным значением на следующем уровне масштаба, где алгоритм исследует пространственные связи уже между их сочетаниями и становится способен определить такие устойчивые паттерны, как взаимное расположение черт лица. Дополнительными свойствами локальных пространственных структур могут быть не только сочленения и концы линий, но и устойчивые детали кривых, простейшие геометрические фигуры, а также параметры выделенной области. Так, для цифр MNIST становится возможным определить преобладающую ось изображения цифры, что позволяет осуществлять ментальное вращение к стандартизированному положению.

Оценка результатов алгоритма

Выборка	Многослойный перцептрон, %	Сверточная сеть CNN-5, %	Рассмотренный алгоритм, %
MNIST классическая	98,74	98,91	95,3
MNIST вращение	61,23	73,23	85,14
MNIST трансляция	72,0	98,45	94,8
MNIST масштабирование	65,22	70,11	78,0

Достоинствами метода являются значительное снижение размерности признаков и использование пространственной семантики. Последнее представляется важным элементом системы зрительного восприятия и позволяет фиксировать инвариантные преобразования, которые во многих приложениях компьютерного зрения могут играть существенную роль. Так, зрительной системе необходимо знать, на какой именно угол повернут изображенный объект, где в поле зрения он находится, или уметь различать в объектах одного класса MNIST несколько различных стилей написания.

Перспективным направлением дальнейшей работы является распространение метода на трехмерные объекты и комбинация локальных пространственных структур с предположительной 3D-моделью объекта. Такой подход сделает возможным ментальное вращение в трехмерном пространстве и даст возможность определять ориентацию и расположение предметов в пространстве, по аналогии с примером MNIST, не требуя наличия переполненного набора признаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Olshausen B.A., Field D.J.** Sparse coding with an overcomplete basis set: A strategy employed by V1? // Vision research. 1997. Vol. 37. No. 23. Pp. 3311–3325.

2. **Riesenhuber M., Poggio T.** Hierarchical models of object recognition in cortex // Nature neuroscience. 1999. Vol. 2. No. 11. Pp. 1019–1025.

3. **Gross C.G.** Genealogy of the “grandmother cell” // The Neuroscientist. 2002. Vol. 8. No. 5. Pp. 512–518.

4. **Boureau Y. et al.** Sparse feature learning for deep belief networks // Advances in neural information processing systems. 2008. Pp. 1185–1192.

5. **Attneave F.** Some informational aspects of visual perception // Psychological review. 1954. Vol. 61. No. 3. P. 183.

6. **Jolliffe I.** Principal component analysis. John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

7. **Bengio Y.** Learning deep architectures for AI // Foundations and trends® in Machine Learning. 2009. Vol. 2. No. 1. Pp. 1–127.

8. **Tropp J.A., Gilbert A.C.** Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit // Information Theory, IEEE Transactions on. 2007. Vol. 53. No. 12. Pp. 4655–4666.

9. **Marčelja S.** Mathematical description of the responses of simple cortical cells* // JOSA. 1980. Vol. 70. No. 11. Pp. 1297–1300.

10. **Daugman J.G.** Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters // JOSA A. 1985. Vol. 2. No. 7. Pp. 1160–1169.

11. **Larochelle H., Erhan D., Courville A., Bergstra J., Bengio Y.** An empirical evaluation of deep architectures on problems with many factors of variation // Proc. of the 24th Internat. Conf. on Machine learning. ACM, 2007. Pp. 473–480.

12. **Blakemore C., Carpenter R.H., Georgeson M.A.** Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system // Nature. 1970.

13. **Kwak C., Clayton-Matthews A.** Multinomial logistic regression // Nursing research. 2002. Vol. 51. No. 6. Pp. 404–410.

14. **LeCun Y. et al.** Comparison of learning algorithms for handwritten digit recognition // Internat. Conf. on artificial neural networks. 1995. Vol. 60.

15. **Tarr M. J., Pinker S.** Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition // Cognitive psychology. 1989. Vol. 21. No. 2. Pp. 233–282.

REFERENCES

1. **Olshausen B.A., Field D.J.** Sparse coding with an overcomplete basis set: A strategy employed by V1?, *Vision research*, 1997, Vol. 37, No. 23, Pp. 3311–3325.

2. **Riesenhuber M., Poggio T.** Hierarchical models of object recognition in cortex, *Nature neuroscience*, 1999, Vol. 2, No. 11, Pp. 1019–1025.

3. **Gross C.G.** Genealogy of the “grandmother cell”, *The Neuroscientist*, 2002, Vol. 8, No. 5, Pp. 512–518.

4. **Boureau Y. et al.** Sparse feature learning for deep belief networks, *Advances in neural information processing systems*, 2008, Pp. 1185–1192.

5. **Attneave F.** Some informational aspects of visual perception, *Psychological review*, 1954, Vol. 61, No. 3, P. 183.

6. **Jolliffe I.** *Principal component analysis*, John Wiley & Sons, Ltd., 2005.

7. **Bengio Y.** Learning deep architectures for AI, *Foundations and trends® in Machine Learning*, 2009, Vol. 2, No. 1, Pp. 1–127.

8. **Tropp J.A., Gilbert A.C.** Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit, *Information Theory, IEEE Transactions on*,

2007, Vol. 53, No. 12, Pp. 4655–4666.

9. **Marčelja S.** Mathematical description of the responses of simple cortical cells*, *JOSA*, 1980, Vol. 70, No. 11, Pp. 1297–1300.

10. **Daugman J.G.** Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters, *JOSA A*, 1985, Vol. 2, No. 7, Pp. 1160–1169.

11. **Larochelle H., Erhan D., Courville A., Bergstra J., Bengio Y.** An empirical evaluation of deep architectures on problems with many factors of variation, *Proceedings of the 24th International Conference on Machine learning*, ACM, 2007, Pp. 473–480.

12. **Blakemore C., Carpenter R.H., Georgeson M.A.** Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system, *Nature*, 1970.

13. **Kwak C., Clayton-Matthews A.** Multinomial logistic regression, *Nursing research*, 2002, Vol. 51, No. 6, Pp. 404–410.

14. **LeCun Y. et al.** Comparison of learning algorithms for handwritten digit recognition, *International Conference on artificial neural networks*, 1995, Vol. 60.

15. **Tarr M.J., Pinker S.** Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition, *Cognitive psychology*, 1989, Vol. 21, No. 2, Pp. 233–282.

ХУРШУДОВ Артем Александрович – *аспирант кафедры информационных систем и программирования Кубанского государственного технологического университета.*

350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2.

E-mail: art1783@gmail.com

KHURSHUDOV, Artem A. *Kuban State Technological University.*

350072, Moskovskaya Str. 2, Krasnodar, Krasnodar krai, Russia.

E-mail: art1783@gmail.com

УДК 159.931

П.А. Орлов, В.В. Лаптев, В.М. Иванов

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ СИСТЕМ АЙ-ТРЕКИНГА

Показаны перспективы использования ай-трекингового оборудования в области когнитивных дисциплин и человеко-компьютерного взаимодействия. Показан и частично раскрыт потенциал как стационарной установки (SMI RED250) для применения в лабораторных условиях, так и переносной – головной системы SMI HED50. Определены основные области, в которых целесообразно использовать ай-трекинговое оборудование: когнитивные исследования, исследования графических пользовательских интерфейсов, человеко-компьютерное взаимодействие и психология программирования. Разобрано решение конкретной задачи по зрительному восприятию несмысловых художественных композиций. Приведены полученные результаты исследований.

АЙ-ТРЕКЕР; ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ; ЧЕЛОВЕКО-КОМПЬЮТЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ; ИНТЕРФЕЙС; ПРОГРАММИРОВАНИЕ.

P.A. Orlov, V.V. Laptev, V.M. Ivanov

REVISITING THE ISSUE OF EYE-TRACKING APPLYING

The given paper focuses on the opportunities how to use eye-tracking systems in the field of cognitive science and HCI. We have shown both possibilities of a table based eye-tracking system (SMI RED 250) for the laboratory studies and a head mounted system SMI HED50. The aim of the paper is to define the basic task for an eye-tracking technique to solve. We have achieved such tasks as cognitive studies, the studies of GUI, HCI and the psychology of programming. The obtained results have been provided for each task.

EYE-TRACKING; EYE MOVEMENT; HCI; GUI; PROGRAMMING.

Вопросы зрительного восприятия визуальных стимулов, опирающиеся на законы композиции и инфографики, играют большую роль в организации человеко-компьютерного взаимодействия. Ответы на эти вопросы диктуют применение соответствующих инновационных подходов при проведении исследований. Одним из таких современных программно-аппаратных комплексов можно считать системы фиксации окуломоторной активности ай-трекинга [2]. Системы ай-трекинга, появившиеся в 50-х гг. XX века [13], прошли высокотехнологичный путь развития и на сегодняшний момент используются в весьма широкой области приложений.

Основной задачей ай-трекингового комплекса является регистрация и передача в режиме реального времени (в нашем случае с частотой 250 Гц) данных о движении глаза. Известно восемь типов движения человеческого глаза [13, 6, 2], из которых наибольший интерес представляют фиксации и саккады. Фиксации (как определенная часть дрейфа) – это дрейф – медленное, плавное перемещение глаза в небольшой зоне [2]. Считается, что во время фиксаций происходит прием зрительной информации [12]. Саккада – резкий скачок глаза, при котором резко изменяется позиция глаза и, в свою очередь, меняется положение фиксации. Они отличаются высокой скоростью и точностью [2].

То, как человек рассматривает графическое изображение, читает, решает зрительные задачи, принято называть *окуломоторной активностью*. Эта деятельность, как и деятельность вообще, определяется текущей задачей [3, 4, 9]. Таким образом, изучая окуломоторную активность, мы имеем возможность вести исследования в области когнитивных дисциплин и человеко-компьютерного взаимодействия.

Принципиальная схема работы ай-трекинговой установки

Ай-трекинговые установки как стационарные, так и мобильные работают по одному принципу – видеоокулографии. На роговице глаза испытуемого регистрируется блик, по которому определяется направление взора. Рассмотрим схему работы мобильного ай-трекера, предназначенного для полевых условий.

Принцип работы данного аппарата заключается в видеорегистрации смещений зрачка и блика от направленного в глаз источника инфракрасного (ИК) излучения. На роговице образуется блик, видимый камере как светлое пятно, зрачок распознается как черное. Регистрация ведется на одном глазе. В зависимости от задач и условий исследования может быть выбран как левый, так и правый глаз. Чтобы не загораживать испытуемому взор, используется зеркало, прозрачное для видимого спектра (рис. 1). Полученная точка фиксации взора совмещается с изображением второй видеокамеры, которая снимает то, что видит испытуемый перед собой. По изображению со второй камеры производится калибровка системы для совмещения координат положения фиксации и экрана кадра.

При калибровке испытуемому предлагается посмотреть последовательно на пять точек. Точки располагаются в поле зрения испытуемого таким образом, чтобы он мог их видеть, не поворачивая головы. Координаты этих точек заносятся исследователем в прилагаемое программное обеспечение SMI IViewX, и по ним автоматически аппроксимируются все последующие вычисления. Алгоритм работы на приборе, предлагаемый производителем, включает следующие шаги: установка и закрепление прибора на голове испытуемого; калибровка ай-трекера на расстоянии, заданном условиями эксперимента; сбор данных; освобождение испытуемого от прибора.

Оборудование размещается с помощью шлема на голове человека. Легкий шлем с камерами удобно крепится ремешками за подбородок, чтобы не упасть с испытуемого. Испытуемый, надев такой шлем, не испытывает дискомфорта и привыкает к нему в течение нескольких минут. Время установки системы и проведения калибровки обычно занимает около 10 мин.

Особенность использования прибора на небольших расстояниях (несколько метров) заключается в том, что его можно использовать только для демонстрации стимульного материала в одной, заранее фиксируемой плоскости.

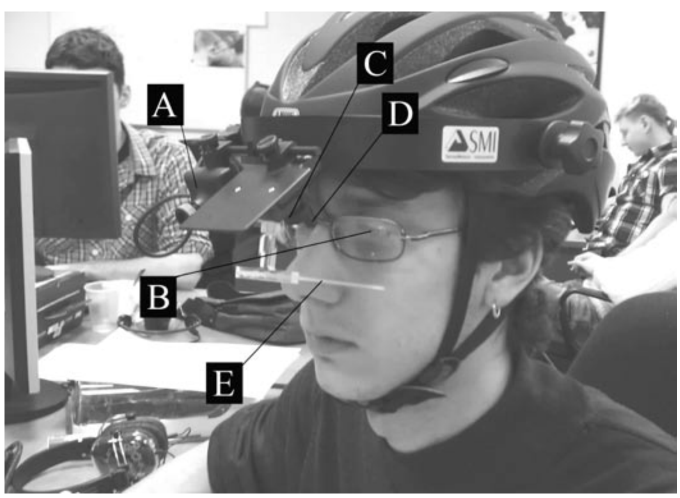


Рис. 1. Головная система ай-трекинга SMI HED50 IView X™ в рабочем положении для левого глаза на испытуемом:
A – камера, снимающая панораму перед испытуемым, на которую накладывается указатель направления взора; B – глаз испытуемого, с которого с помощью камеры C снимается отражение зрачка и блика на роговице от источника ИК излучения D; E – ИК зеркало

Задачи появляющиеся при использовании систем ай-трекера

Когнитивные исследования. Под когнитивными исследованиями мы понимаем широкий круг задач, в которых человек выступает в плане субъекта познания. Познавательная деятельность человека, на примере студентов второго курса, была областью исследования при оценке субъективной сложности задачи. Целью исследования было сравнение «фокально-амбьентного» подхода к интерпретации окуломоторной активности [5] и подхода «проблемностей» – субъективной сложности [7]. Перед испытуемым стояли две задачи разной степени сложности. Первая – чтение двухзначных цифр, вторая – решение задачи программирования. Как показал анализ дисперсий, вероятность того, что изменение уровней качественного признака (сложности задачи) значимо влияет на величину количественного (проблемности), составляет примерно 97,3 %. В то же время соотношение использования амбьентного и фокального зрения не подвержено качественному фактору (p.value = 0,21). Интерпретируя результаты математического анализа, можно заключить, что качественный фактор не коррелирует с графической композицией стимула (UX-Russia 2012).

Следующим примером исследований познавательной деятельности человека могут быть эмпирические лабораторные эксперименты по определению кластеров зрительных фиксаций при «чтении» 2D потоковых диаграмм Санкеи [8]. Цель работы – выбор математического аппарата многомерной кластеризации фиксаций взора и построение на этой основе математической модели. Модель рассматривания может выступать как базис для выявления влияния факторов инфографики различного рода на процесс рассматривания и условного понимания диаграммы.

Процессы восприятия визуального стимула, представленного в моно- и в стереорежиме, также могут быть отнесены к когнитивным исследованиям. Используя стереоскопическое оборудование (Christie hd3 с затворными очками Mirage HD3), мы провели исследование, целью которого было сравнение паттернов рассматривания стерео- и моновидеоматериала. Постановка задачи требовала совмещения ай-трекингового оборудования и стереосистемы на базе высокочастотных очков, что является нетривиальной технологической задачей. Одна группа испытуемых наблюдала подготовленный видеофрагмент в монорежиме, а вторая группа – этот же видеофрагмент, но подготовленный в стереоформате. Результаты кластерного анализа фиксаций взора показали отличие в расположении центров кластеров и в количестве кластеров. Таким образом, можно ставить вопрос об особенностях построения видеокадра в стереоизображениях по сравнению с моно.

Исследования графических пользовательских интерфейсов. Оценка юзабилити веб-сайтов и графических интерфейсов является одним из популярных вариантов использования ай-трекингового оборудования. Это обусловлено сравнительной легкостью использования бесконтактного оборудования, быстротой настройки и небольшими затратами на проведение непосредственно экспериментальной части. Однако чаще всего в качестве результата можно видеть только графическую визуализацию (тепловую карту) зон фиксации пользовательского взора. Следуя Ю.Б. Гиппенрейтер, мы считаем, что «глазные движения могут быть индикаторами сложных форм деятельности, только если учитываются многообразные и многоуровневые процессы, которые «проецируются» на эти движения или в них отражаются» [6].

Представляет интерес построение новых методик и подходов как к интерпретации результатов, так и к видам математического анализа данных окуломоторной активности. В настоящей работе по выявлению «проблемных» зон в интерфейсе сайта нами был осуществлен поиск корреляции относительно уровня когнитивной нагрузки и проблемности испытуемых [7]. Факторный анализ с покрытием более 70 % выявил два фактора и корреляции: между ментальной нагрузкой, физической нагрузкой, скоростью выполнения задачи и уровнем проблемности; между уровнем производительности, количеством затраченных сил (оцениваемых субъективно) и реакцией на фрустрацию.

Человеко-компьютерное взаимодействие. Использование ай-трекингового оборудования как устройства ввода и управления программой посредством глаза. В классическом представлении физиологии и психологии глаз является органом восприятия. Человек получает данные из окружающей среды и преобразует их в жизненно важную информацию. Глаз, постоянно находясь в движении, не является органом «производства» действия в прямом смысле, как, например, человеческая рука. По Н.А. Бернштейну, задача действия – это «результат, который организм стремится достигнуть» [4]. Задача, согласно А.Н. Леонтьеву, – это цель, данная в определенных условиях [9]. Таким образом, если условия диктуют новый вариант достижения цели, то представляется интересным рассмотреть работу глаза как часть человеко-компьютерного взаимодействия. Идея использовать взор человека для решения компьютерных (программных) задач не является новой [11]. Однако психологические особенности, особенности эффективности взаимодействия такого рода, ряд технологических вопросов взаимодействия «глаз – компьютер» представляют актуальную проблему [18, 23]. В работе по определению эффективности взор-содержащих интерфейсов продемонстрировано сравнение эффективности двух типов взаимодействия. Сравнивалась эффективность использования компьютерной мыши и управления взором. Испытуемым предлагалась задача визуального поиска определенного объекта на поле, причем искомый параметр появлялся на экране только при наведении на него курсора в первом случае или взора – во втором. Анализ продемонстрировал более высокую эффективность решения задачи при взаимодействии со взором (более чем на 40 %). Безусловно, этот результат может быть отнесен только к задачам определенного типа. Результаты этой работы представлены на симпозиуме по окуломоторной активности «Ярбус-100» [22].

Психология программирования. Отдельно следует отметить использование ай-трекинговых систем в сфере чтения и производства программного кода. Психология труда программистов в условиях современного общества является актуальной сферой исследований. В 2012 г. нами было проведено полевое исследование работы программистов с использованием переносной головной системы ай-трекинга SMI HED50. Эта система позволила проводить запись окуломоторной активности программиста прямо на его рабочем месте без отрыва от производства.

Целью исследования было определение уровня субъективной сложности при решении конкретных производственных задач и оценка по этому уровню пригодности новых сотрудников компании. В итоге были получены следующие основные результаты: уровень субъективной сложности (проблемность) при решении текущих профессиональных задач экспертами остается на низком уровне (не выше третьего, по Костину-Голикову). В то время как новые сотрудники компании, из числа бывших студентов, показывают более высокий уровень субъективной сложности (третий и выше) [20].

Визуальный анализ фиксаций взора программиста чаще всего проводится в привязке к семантике блоков исходного кода. Последовательность рассматривания блоков и особенности рассматривания одного блока могут быть объединены в паттерны рассматривания [17, 14]. Типы паттернов и их определение также является актуальной задачей [19]. Известно, что у профессиональных программистов и новичков паттерны отличаются [15], но даже среди профессионалов нет единой картины. В виду чего на 13th KOLI Calling International Conference on Computing Education [21] в рамках воркшопа по глазодвигательной активности в обучении программированию было представлено программное обеспечение для динамической визуализации. С помощью VETool стала возможной наглядная демонстрация не только фиксации блока исходного кода, но и развития решения задачи во времени [22].

Глазодвигательная активность и зрительное восприятие несмысловых художественных композиций

В рамках исследований вопросов когнитивного класса проводятся серии исследований на описание глазодвигательной активности при запоминании и вспоминании несмысловых графических композиций. Рассмотрим одно исследование подробнее.

Выдвигаемая гипотеза: существует ли какое-либо различие между стратегиями рассматривания несмысловых художественных композиций при решении задачи запоминания изображения и его последующего вспоминания, т. е. узнавания среди прочих последующих изображений. Или, другими словами, если стратегии рассматривания изображений при задачах запоминания и вспоминания изображения различны, то возможно ли определить это по показателям глазодвигательной активности.

Постановка эксперимента. Эксперимент проводился в лабораторных условиях на стационарном ай-трекере SMI RED250 (рис. 2). Под монитором расположено само устройство во включенном состоянии. Видно две работающие ИК лампы подсветки (съемка велась без ИК фильтра). В реальности ИК излучение человеческий глаз не воспринимает. Голова испытуемого опирается на подставку для уменьшения движения.

В эксперименте приняли участие на добровольной основе 30 испытуемых. Все испытуемые были отобраны среди студентов как технических, так и гуманитарных университетов. Основными критериями отбора являлись возраст от 18 до 30 лет и отсутствие какой-либо художественной подготовки.

Перед непосредственным началом эксперимента испытуемому пояснялась цель участия: сбор данных о движении глаз в процессе решения представленных заданий. Проводился инструктаж о ходе эксперимента, работе оборудования и общих целях исследования, не вдаваясь в подробности. Осуществлялась калибровка оборудования для каждого человека, производился выбор оптимальной позы для работы с ай-трекером. Расстояние до экрана составляло 60 см.

Процедура эксперимента. Исследование состояло из трех этапов.

На первом этапе эксперимента испытуемому предъявлялось пять картин К.С. Малевича. Необходимо было запомнить изображения. Участник эксперимента рассматривал предъявляемое изображение и по мере готовности переходил к следующему стимулу. После каждого стимула испытуемому предъявлялся пустой экран с точкой фиксации взора. После фиксации взора на точке, испытуемый мог перейти к следующему стимулу.

Рис. 2. Стационарная система ай-трекинга SMI RED250

После предъявления всех пяти изображений было необходимо отвлечь участника эксперимента от изображений. Для достижения этой цели ему предлагалось заполнить анкету участника и выпить чаю. Перерыв составлял 10 мин.

Далее испытуемому предлагалось вспомнить пять исходных изображений. При предъявлении каждого стимула испытуемому необходимо было дать ответ «да» или «нет», т. е. присутствовало ли предъявляемое изображение среди пяти исходных.

Третий этап эксперимента представлял собой аналогичную процедуру по узнаванию пяти изображений из первой группы стимульного материала, проведенную через неделю.

Участие экспериментатора было минимальным: фиксировались озвученные ответы по узнаванию изображений.

Выбор стимульного материала. На процесс зрительного восприятия произведений искусства, архитектуры и дизайна влияет ряд взаимодействующих факторов: смысловые связи, присущие объекту; использованные средства композиции; целевая установка зрителя и его прошлый опыт и пр. [10]

Уход от семантической нагрузки в стимульных изображениях (в виде реализма) был сделан неслучайно. Этот шаг позволил нам исключить фактор личностной оценки или эмоциональной значимости смыслового объекта в стимульном материале. При выборе достаточно выразительного и в то же время лаконичного материала было решено остановиться на абстрактных композициях книги К.С. Малевича «Супрематизм». Они составлены из одних и тех же простейших геометрических элементов: прямой, плоскости, кривой, круга, прямоугольника (пример изображения см. рис. 3).

Все художественные композиции являются беспредметными, несмысловыми, однако в них выражены многие отношения и взаимосвязи реальных предметов. Из 34 работ было выбрано пять композиций, обладающих, на наш взгляд, наиболее чистой художественной организацией элементов. Именно эти пять изображений и послужили таргет-объектами для эксперимента. К ним в дополнение были выбраны еще десять изображений – дистракторов. Еще пять композиций были получены путем поворота пяти основных стимулов на 180 градусов, образовав, таким образом, обратные таргет-объекты.

Результаты. Предварительные результаты показали статистическое различие между долями использования амбьентного и фокального типа зрения [5]. По Б. Величковскому, амбьентный тип зрения решает задачи, связанные с ответом на вопрос «где?», в то время как фокальный тип зрения – «что?». Деление по типам зрения происходит в зависимости от амплитуды саккад. В связи с этим для анализа нами и были выбраны амплитуды саккад.

Был проведен дисперсионный анализ данных по фокальному (т. е. предметному), а также амбьентному (т. е. пространственному) зрительному восприятию на наличие статистических различий в стратегиях рассматривания изображений при задачах запоминания и вспоминания. Результаты анализа представлены в табл. 1 и 2.

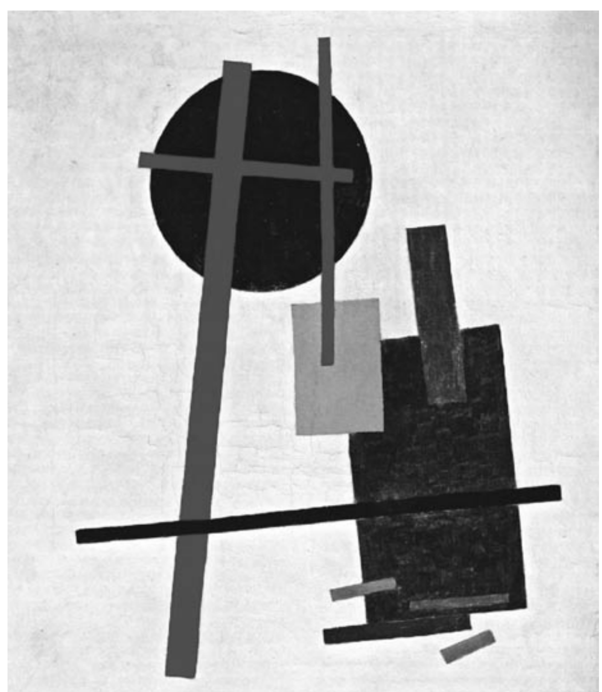


Рис. 3. Пример стимульного изображения из группы стимулов для запоминания

Таблица 1

Значения p-value сравнений амплитуд саккад при фокальном типе зрения

1 этап		Запоминание	2 этап, 10 мин			3 этап, 1 нед.		
			Таргет	Обратный таргет	Дистрактор	Таргет	Обратный таргет	Дистрактор
2 этап, 10 мин	Таргет	0,00056	*	–	–	–	–	–
	Обратный таргет	0,3943	1.24e-05	*	–	–	–	–
	Дистрактор	0,153	0,05007	0,02526	*	–	–	–
3 этап, 1 нед.	Таргет	0,6289	0,1747	0,3717	0,7888	*	–	–
	Обратный таргет	0,8912	0,01356	0,6847	0,282	0,6351	*	–
	Дистрактор	0,3223	0,5416	0,1618	0,7277	0,6398	0,07182	*

Таблица 2

Значения p-value сравнений амплитуд саккад при амбьентном типе зрения

1 этап		Запоминание	2 этап, 10 мин			3 этап, 1 нед.		
			Таргет	Обратный таргет	Дистрактор	Таргет	Обратный таргет	Дистрактор
2 этап, 10 мин	Таргет	<2.2e-16	*	–	–	–	–	–
	Обратный таргет	<2.2e-16	0,04513	*	–	–	–	–
	Дистрактор	2.89e-14	0,4665	0,00461	*	–	–	–
3 этап, 1 нед.	Таргет	0,1778	1.7e-08	1.92e-12	1.8e-07	*	–	–
	Обратный таргет	0,00345	0,0111	7.19e-05	0,0457	0,0027	*	–
	Дистрактор	0,1762	0,0041	3.62e-05	0,0135	0,0503	0,4812	*

Отметим, что сравнивая выборки при запоминании со всеми выборками второго и третьего этапа, мы видим только одну пару статистически различимых выборок (p-value: 0,00056): пару «таргет (10 мин) – запоминание». Очевидно, что это можно интерпретировать тем, что испытуемый за 10 мин не успел забыть стимульное изображение и рассматривает его уже по-другому.

Через 10 минут при сравнении выборок амплитуд «таргет (10 мин) – обратный таргет» мы видим сильное различие в выборках (p-value: 1.24e-05). Причем, если принять за уровень значимости p-value 0,01, то выборки пар «таргет (10 мин) – дистрактор» и «дистрактор – обратный таргет» будут статистически схожими (p-value: 0,05007 и 0,02526 соответственно).

Через неделю выборки сравнений между тремя группами показывают статистическое сходство.

Из таблицы амбьентного типа зрения видна противоположная картина. Сравнивая выборки амплитуд саккад при 10-минутном перерыве, очевидно сильное различие в выборках (p-value<2.2e-16; p-value = 2.89e-14). Вероятно, что при амбьентном типе зрения (с ответом на вопрос «где?») испытуемый «по-разному» отвечает на вопрос «где?» при запоминании и при вспоминании, вне зависимости от типа стимула. Через неделю картина меняется и становится больше похожей на фокальный тип, выборки становятся статистически схожими, за исключением пары «запоминание–обратный таргет» (p-value = 0,00345). Может быть это связано именно с «перевернутостью» стимула, однако в нашем исследовании мы не касались этого вопроса, который очевидно требует дальнейшего изучения.

Сравнивая выборки амплитуд саккад между собой, можно отметить, что сходство пар «дистратор–таргет», схожее через 10 мин (p-value: 0,4665), теряет этот показатель через неделю (p-value: 0,0503). В то время как пара «обратный таргет–дистрактор» показывает противоположную динамику от p-value = 0,00461 (10 мин) к p-value = 0,4812 (1 нед.).

Таким образом, на вопрос о схожести стратегий рассматривания несмысловых художественных композиций при запоминании и вспоминании мы отвечаем по большей части положительно. По показателям глазодвигательной активности можно определить видел ли испытуемый предъявленный стимул через 10 мин, однако уже через неделю это сделать не удается. Исходя из наших результатов, можно сделать предположение относительно рассматривания обратного таргет-изображения через неделю, что при повороте даст нам искомый таргет. Этот результат не явно подтверждается статическими методами (p-value 0,00345 < 0,01), но близок к ним. Также обратный таргет ярко проявляется через 10 мин при сравнении с другими парами, что позволяет его идентифицировать. Идентификация стимулов через недельный промежуток становится более затруднительной, но все же и в ней прослеживается пара «обратный таргет–дистрактор». Суммируя, мы можем указать на то, что в наших результатах особенным образом себя ведет именно перевернутое исходное изображение: обратный таргет.

Обобщая результаты экспериментов по вспоминанию картин Малевича, мы обратимся к эксперименту Э. Рубина 1915, а именно к интерпретации его Аллахвердовым. Испытуемым предъявлялись абстрактные изображения (чернильные кляксы) с инструкцией запомнить фигуро-фоновое отношение на нем. Было обнаружено, что, по мнению Аллахвердова, «...испытуемые узнают предъявленное изображение, но не осознают этого. Значит, существует какое-то неосознанное восприятие?»[1]. В нашем эксперименте испытуемым не ставилась задача рефлексии на тему перевернутого стимула, и лишь несколько человек сочли нужным дать устный отчет о том, что стимул был, но был перевернут. Вероятно, наше исследование поставило новые вопросы для дальнейшего изыскания.

По вопросу применения систем ай-трекинга нами были выделены основные направления исследований в области когнитивных дисциплин и человеко-компьютерного взаимодействия, в которых целесообразно применение ай-трекингового оборудования. Показан и частично раскрыт потенциал как стационарной установки (SMI RED250) для применения в лабораторных условиях, так и переносной – головной системы SMI HED50. В настоящее время в Лаборатории идут совместные исследования с Университетом г. Йоенсуу (Восточная Финляндия). В когнитивной лаборатории Университета г. Йоенсуу с 80-х гг. активно разрабатываются вопросы психологии программирования и ай-трекинга в целом. Первым результатом взаимодействия явилась разработка совместного программного обеспечения для определения формы и размера операционного поля зрения программиста – Screen Masker [16].

Высокий интерес к экспериментам с таким оборудованием со стороны будущих магистров кафедры инженерной графики и дизайна СПбГПУ показывает необходимость развития этого направления и в образовательной деятельности, на уровне преподаваемых дисциплин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аллахвердов В.М**. Сознание как парадокс // Экспериментальная психологика. Т. 1. СПб.: ДНК, 2000. 528 с.

2. **Барабанщиков В., Милад М.** Методы окулографии в исследовании познавательных процессов и деятельности. М.: Институт психологии РАН, 1994. 88 с.

3. **Бернштейн Н.А.** О построении движений. М.: Гос. изд-во медицинской лит-ры, 1947. 255 с.

4. **Бернштейн Н.А.** Очерки о физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966. 349 с.

5. **Величковский В.М.** Когнитивная наука. Основы психологии познания Т. 2. М.: Издат. центр «Академия», 2006. 432 с.

6. **Гиппенрейтер, Ю.Б.** Движения человеческого глаза. М.: МГУ, 1978. 256 с.

7. **Костин А.Н., Голиков Ю.Я., Дикая Л.Г.** Проблемность в профессиональной деятельности: теория и методы психологического анализа. М.: Институт психологии РАН, 1999. 358 с.

8. **Лаптев В.В.** Фигурные диаграммы в инфографике: сфера применения, классификация и правила построения // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Гуманитарные и общественные науки. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 1 (191). С. 298–306.

9. **Леонтьев А.Н.** Проблемы развития психики. М.: АПН РСФСР, 1965.

10. **Митькин А., Перцева Т.** Опыт экспериментального исследования восприятия несмысловых композиций. М.: Техническая эстетика, 1970.

11. **Сергеев С.Ф.** Инженерно-психологическое проектирование системы профессиональной подготовки операторов систем слежения, работающих в экстремальных условиях: Дисс. ... канд. психол. наук. Л., 1987.

12. **Филин В.А.** Автоматия саккад [Automaticity of saccadic]. М.: Изд-во МГУ, 2002. 240 с.

13. **Ярбус Л.** Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с.

14. **Bednarik R.** Expertise-dependent visual attention strategies develop over time during debugging with multiple code representations // Internat. J. of Human-Computer Studies. 2012. Vol. 70(2). Pp. 143–155.

15. **Bednarik R., Orlov P.A.** Investigating the role of programmers' peripheral vision: a gaze-contingent tool and an experiment proposal // In Psychology of Programming Interest Group PPIG. 2012.

16. **Bednarik R., Myller N., Sutinen E., Tukiainen M.** Analyzing individual differences in program comprehension // Technology, Instruction, Cognition and Learning. 2006. Vol. 3(3/4). 205 p.

17. **Crosby M.E., Stelovsky J.** How do we read algorithms? A case study // Computer. 1990. Vol. 23(1). Pp. 24–35.

18. **Isokoski P., Spakov O., Joos M., Martin B.** Gaze controlled games. Universal Access in the Information Society. 2009. Vol. 8(4). Pp. 323–337.

19. **Gavrilo K.** Analysis of two eyetracking renders of source code reading // In Internat. Workshop at the 13th Koli Calling Internat. Conf. on Computing Education Research. Joensuu: UEF, 2013. Pp. 20–21.

20. **Orlov P.A., Ivanov V.M.** Assessment of level professional competence of the programmers // In 8th edition of the Internat. Conf. on Methods and Techniques in Behavioral research. Utrecht: Noldus, 2012. Pp. 398–402.

21. **Orlov P.A.** Visual evaluation of two eyetracking renders of source code reading // In Internat. Workshop at the 13th Koli Calling Internat. Conf. on Computing Education Research. Joensuu: UEF, 2013. Pp. 33–36.

22. **Orlov P.A., Apraksin N.A.** Gaze contingent computer games – effectiveness // Yarbus-100. Internat. Symp. on the Role of Eye Movements in Vision. Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute). 2014.

23. **Seya Y., Watanabe K.** Objective and Subjective Sizes of the Effective Visual Field during Game Playing Measured by the Gaze-contingent Window Method // Internat. J. of Affective Engineering. 2013. Vol. 12(1). Pp. 11–19.

REFERENCES

1. **Allakhverdov V.M.** Soznaniye kak paradox, *Eksperimentalnaya psikhologika*. St. Petersburg: DNK Publ., 2000, Vol. 1, 528 p. (rus)

2. **Barabanshchikov V., Milad M.** *Metody okulografii v issledovanii poznavatelnykh protsessov i deyatelnosti.* Moscow: Institut psikhologii RAN Publ., 1994, 88 p. (rus)

3. **Bernshteyn N.A.** *O postroyenii dvizheniy.* Moscow: Gosudarstvennoye izdatelstvo meditsinskoy literatury Publ., 1947, 255 p. (rus)

4. **Bernshteyn N.A.** *Ocherki o fiziologii dvizheniy i fiziologii aktivnosti.* Moscow: Meditsina Publ., 1966, 349 p. (rus)

5. **Velichkovskiy B.M.** Kognitivnaya nauka,

Osnovy psikhologii poznaniya. Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya» Publ., 2006, Vol. 2, 432 p. (rus)

6. **Gippenreyter Yu.B.** *Dvizheniya chelovecheskogo glaza*. Moscow: MGU Publ., 1978, 256 p. (rus)

7. **Kostin A.N., Golikov Yu.Ya., Dikaya L.G.** *Problemnost v professionalnoy deyatelnosti: teoriya i metody psikhologicheskogo analiza*. Moscow: Institut psikhologii RAN Publ., 1999, 358 p. (rus)

8. **Laptev V.V.** Figurnyye diagrammy v infografike: sfera primeneniya, klassifikatsiya i pravila postroyeniya, *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Gumanitarnyye i obshchestvennyye nauki*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 1 (191), Pp. 298–306. (rus)

9. **Leontyev A.N.** *Problemy razvitiya psikhiki*. Moscow: APN RSFSR Publ., 1965. (rus)

10. **Mitkin A., Pertseva T.** *Opyt eksperimentalnogo issledovaniya vospriyatiya nesmyslovykh kompozitsii*. Moscow: Tekhnicheskaya estetika Publ., 1970. (rus)

11. **Sergeyev S.F.** Inzhenerno-psikhologicheskoye proyektirovaniye sistemy professionalnoy podgotovki operatorov sistem slezheniya, rabotayushchikh v ekstremalnykh usloviyakh: diss. kand. psikhol. nauk. Leningrad, 1987. (rus)

12. **Filin V.A.** *Avtomatiya sakkad* [*Automaticity of saccadic*]. Moscow: MGU Publ., 2002, 240 p. (rus)

13. **Yarbus L.** *Rol dvizheniy glaz v protsesse zreniya*. Moscow: Nauka Publ., 1965, 166 p. (rus)

14. **Bednarik R.** Expertise-dependent visual attention strategies develop over time during debugging with multiple code representations, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2012, Vol. 70(2), Pp. 143–155.

15. **Bednarik R., Orlov P.A.** Investigating the role of programmers' peripheral vision: a gaze-contingent tool and an experiment proposal, *In Psychology of Programming Interest Group PPIG,* 2012.

16. **Bednarik R., Myller N., Sutinen E., Tukiainen M.** Analyzing individual differences in program comprehension, *Technology, Instruction, Cognition and Learning,* 2006, Vol. 3(3/4), 205 p.

17. **Crosby M.E., Stelovsky J.** How do we read algorithms? A case study. *Computer,* 1990, Vol. 23(1), Pp. 24–35.

18. **Isokoski P., Spakov O., Joos M., Martin B.** Gaze controlled games. *Universal Access in the Information Society,* 2009, Vol. 8(4), Pp. 323–337.

19. **Gavrilo K.** Analysis of two eyetracking renders of source code reading, *In International Workshop at the 13th Koli Calling International Conference on Computing Education Research*. Joensuu: UEF, 2013, Pp. 20–21.

20. **Orlov P.A., Ivanov V.M.** Assessment of level professional competence of the programmers, *In 8th edition of the International Conference on Methods and Techniques in Behavioral research*. Utrecht: Noldus, 2012, Pp. 398–402.

21. **Orlov P.A.** Visual evaluation of two eye-tracking renders of source code reading, *In International Workshop at the 13th Koli Calling International Conference on Computing Education Research*. Joensuu: UEF, 2013, Pp. 33–36.

22. **Orlov P.A., Apraksin N.A.** Gaze contingent computer games – effectiveness, *Yarbus-100. International Symposium on the Role of Eye Movements in Vision*. Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute), 2014. (rus)

23. **Seya Y., Watanabe K.** Objective and Subjective Sizes of the Effective Visual Field during Game Playing Measured by the Gaze-contingent Window Method, *International Journal of Affective Engineering*. 2013, Vol. 12(1), Pp. 11–19.

ОРЛОВ Павел Анатольевич – *заведующий лабораторией человеко-компьютерного взаимодействия, старший преподаватель кафедры инженерной графики и дизайна Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: paul.a.orlov@gmail.com

ORLOV, Pavel A. *St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: paul.a.orlov@gmail.com

ЛАПТЕВ Владимир Владимирович – *доцент кафедры инженерной графики и дизайна Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат искусствоведения.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: laptevsee@yandex.ru

LAPTEV, Vladimir V. *St. Petersburg Polytechnic University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: laptevsee@yandex.ru

ИВАНОВ Владимир Михайлович – *заведующий кафедрой инженерной графики и дизайна Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук, профессор.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ivm@imop.spbstu.ru

IVANOV, Vladimir M. *St. Petersburg Polytechnic University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: ivm@imop.spbstu.ru

УДК 621.865

Н.В. Ростов

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ КИНЕМАТИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ

Рассмотрены формулировки обратных задач кинематики, решаемых в системах управления движением манипуляционных роботов. Обсуждены трудности решения таких задач аналитическими и численными методами. Проанализирована сходимость алгоритмов итерационных методов с регуляризацией на траекториях движения схвата с участками вне его зоны достижимости. Приведен пример итерационного расчета траекторий звеньев трехзвенного робота с вычислением матрицы Якоби по рекурсивному алгоритму.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ; ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ; МАТРИЦА ЯКОБИ; ИТЕРАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ; СХОДИМОСТЬ АЛГОРИТМОВ; РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ.

N.V. Rostov

ALGORITHM ANALYSIS FOR SOLVING THE INVERSE KINEMATIC PROBLEMS IN ROBOT MOTION CONTROL SYSTEMS

The given article covers the general formulations of inverse kinematic problems for robot motion control systems. We have discussed the difficulties how to solve such problems using analytical and numerical methods. We have also analyzed the convergence of iterative algorithms with the regularization on the trajectory with the points outside of the gripper reachability. The example of an iterative calculation of joint trajectories for a 3-link robot using the recursive algorithm for the Jacobi matrix calculation has been presented.

ROBOT MOTION CONTROL SYSTEMS; INVERSE KINEMATIC PROBLEMS; ITERATIVE METHODS; ALGORITHM CONVERGENCE; REGULARIZATION.

При моделировании систем управления движением (СУД) манипуляционных роботов требуется решать с помощью ЭВМ обратные задачи кинематики (ОЗК) для их исполнительных механизмов (ИМ) аналитическими или итерационными методами. Алгоритмы решения таких задач составляют математическую основу разработки СУД роботов.

В теоретической робототехнике для решения ОЗК часто используют алгоритмы на основе аналитических выражений, требующих вычисления обратных тригонометрических и трансцендентных функций. Такие алгоритмы получают непосредственно по геометрическим моделям кинематики ИМ, либо по векторно-матричным моделям в представлении Денавита–Хартенберга, описывающим кинематику ИМ в однородных координатах [3–9].

Однако для роботов со сложной кинематикой аналитические решения ОЗК на заданной траектории схвата могут оказываться ошибочными в особых конфигурациях ИМ (положениях звеньев), а также на границе и вне зоны достижимости схвата из-за вырождаемости матрицы Якоби вследствие понижения ее ранга. В подобных случаях могут быть получены только приближенные решения ОЗК итерационными методами. Но при применении таких методов необходимо проводить исследование сходимости их алгоритмов.

В предлагаемой статье обсуждаются трудности аналитического решения ОЗК на примере трехзвенного робота с вращательными звеньями, обращается внимание на необходимость регуляризации итерационных алгоритмов для обеспечения их сходимости, описывается рекурсивный алгоритм вычисления матрицы Якоби и анализируется работоспособность итерационных алгоритмов на траекториях схвата, содержащих участки с особыми конфигурациями ИМ.

Общие формулировки ОЗК. В системах позиционного, скоростного и силомоментного управления движением роботов решаются разные обратные задачи кинематики.

ОЗК о положениях звеньев. По заданному 6×1 вектору линейных координат положения и угловых координат ориентации схвата

$$S_C = (x_C, y_C, z_C, \varphi_C, \theta_C, \psi_C)^{\mathrm{T}}$$

вычисляется N×1 вектор обобщенных координат звеньев

$$q = (q_1, q_2, \ldots, q_N)^{\mathrm{T}} = \Phi^{-1}(S_C), \qquad (1)$$

где $\Phi^{-1}(\cdot)$ – N×1 вектор-функция, обратная 6×1 вектор-функции $\Phi(q)$, соответствующей кинематической схеме ИМ робота. Задача (1) является наиболее сложной с вычислительной точки зрения, т. к. она требует решения системы нелинейных алгебраических уравнений вида

$$\Phi(q) - S_C = F(q) = 0,$$

где 0 – нулевой 6×1 вектор.

ОЗК о скоростях звеньев. По заданным векторам линейных и угловых скоростей схвата

$$V_{\mathrm{C}} = (v_x,\ v_y,\ v_z)^{\mathrm{T}};\ \ \Omega_C = (\omega_\varphi,\ \omega_\theta,\ \omega_\psi)^{\mathrm{T}}$$

вычисляется N×1 вектор обобщенных скоростей звеньев

$$\dot{q} = (\dot{q}_1,\ \dot{q}_2,\ \ldots,\ \dot{q}_N)^{\mathrm{T}} = J^{-1}(q)\cdot\begin{pmatrix} V_C \\ \Omega_C \end{pmatrix}, \qquad (2)$$

где $J^{-1}(\cdot)$ – матрица, обратная (или псевдообратная) матрице Якоби $J(q)$ вектор-функции $\Phi(q)$. Задача (2) представляет собой решение системы линейных алгебраических уравнений вида

$$J(q)\cdot\dot{q} = \begin{pmatrix} V_C \\ \Omega_C \end{pmatrix}.$$

ОЗК о силах и моментах в шарнирах звеньев. По заданным векторам проекций силы и момента в схвате

$$F_{\mathrm{C}} = (F_x,\ F_y,\ F_z)^{\mathrm{T}};\ \ M_C = (M_\varphi,\ M_\theta,\ M_\psi)^{\mathrm{T}}$$

определяется вектор обобщенных сил в шарнирах

$$Q = (Q_1, Q_2,\ \ldots,\ Q_N)^{\mathrm{T}} = J^{\mathrm{T}}(q)\cdot\begin{pmatrix} F_C \\ M_C \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

Выражение (3), требующее вычисления и транспонирования матрицы Якоби, справедливо только для случая идеального ИМ, не имеющего потерь энергии в шарнирах звеньев.

Матрица Якоби в задачах (1)–(3) в зависимости от числа звеньев N робота может быть квадратной или иметь прямоугольный вид:

$$J(q) = \frac{\partial\Phi(q)}{\partial q} = \frac{\partial F(q)}{\partial q} = \left\{\frac{\partial F_i(q)}{\partial q_j},\ i = \overline{1,6},\ j = \overline{1,N}\right\}.$$

В более общей постановке задача (1) может формулироваться как задача минимизации квадрата нормы вектора невязки

$$\|F(q)\|^2 \to \min_{q\in R^N}, \qquad (4)$$

и решаться итерационными методами без вычисления матрицы Якоби или градиентными методами, использующими ее численные аппроксимации. Однако сходимость алгоритмов таких методов более медленная и при их применении требуется большее число шагов итерационного процесса [2].

В [4] приведен пример итерационного решения ОЗК в формулировке (4) для 6-звенного робота, на программной траектории схвата которого постоянная ориентация схвата задана не углами Эйлера, а вектором направляющих косинусов.

Если же значения вектора обобщенных координат ограничены допустимой областью $q \in D^N$, то задачи вида (4) должны решаться методами условной минимизации. При этом точные решения ОЗК в принципе могут отсутствовать.

Аналитическое решение ОЗК. Рассмотрим 3-звенный робот ВВВ-типа, работающий в ангулярной системе координат, для которого задача (1) решается неоднозначно и зависит от знака углового положения третьего звена (нижней или верхней конфигурации руки):

$$q_1 = \operatorname{arctg}(y_C/x_C);$$

$$q_3 = \pm\arccos(C);$$

$$q_2 = \operatorname{arctg}((z_C - L_1) / R_{xy}) \mp \arccos(D), \qquad (5а)$$

где L_1, L_2, L_3 — длины звеньев; $R_{xyz} = \sqrt{x_C^2 + y_C^2 + (z_C - L_1)^2}$;

$$C = (x_C^2 + y_C^2 + (z_C - L_1)^2 - {}$$
$$- L_2^2 - L_3^2) / (2L_2L_3);$$

$$D = (x_C^2 + y_C^2 + (z_C - L_1)^2 + {}$$
$$+ L_2^2 - L_3^2) / (2L_2R_{xyz}).$$

Решение ОЗК можно также получить по другим выражениям [5]:

$$q_1 = \operatorname{arctg}(y_C/x_C);$$

$$E = \sqrt{1 - C^2}; \quad q_3 = \pm\operatorname{arctg}(E/C);$$

$$q_2 = \operatorname{arctg}((z_C - L_1) / R_{xy}) - {}$$
$$- \operatorname{arctg}\left(\frac{L_3 \sin q_3}{L_2 + L_3 \cos q_3}\right). \qquad (5б)$$

Однако решения ОЗК функциями MATLAB по выражениям (5а) на траектории схвата с точками вне его зоны достижимости оказываются комплексными числами, не имеющими практического смысла. Для получения вещественных решений ОЗК значения переменных C и D, являющихся косинусами, должны ограничиваться единицей. Решения же ОЗК по выражениям (5б) получаются вещественными в точках и внутри, и вне зоны достижимости схвата, поэтому нет необходимости ограничивать значения переменных C и E.

Алгоритмы итерационных методов. Рассмотрим алгоритмы численного решения задачи (1), в которых матрица Якоби вычисляется в явном виде.

Алгоритм метода Ньютона. Теоретически в случае квадратной матрицы Якоби, например, когда $N = 3$ или 6, можно применить следующий алгоритм:

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k J^{-1}(q^k) \cdot F(q^k), \qquad (6)$$

где $\alpha_k \le 1$ — скалярная величина постоянного или переменного шага. При этом на каждом шаге итерационного процесса требуется вычислять обратную матрицу, соответствующую матрице Якоби. Однако в особых конфигурациях ИМ при плохой обусловленности или полной вырождаемости матрицы Якоби из-за понижения ее ранга работоспособность алгоритма (6) теряется,

Упрощенный алгоритм метода Ньютона. При замене в алгоритме (6) обратной матрицы J^{-1} на транспонированную матрицу Якоби

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k J^{\mathrm{T}}(q^k) \cdot F(q^k), \qquad (7)$$

могут быть получены грубые решения задачи (1), но в особых конфигурациях ИМ сходимость алгоритма (7) также не гарантируется.

Алгоритм метода Гаусса—Ньютона. При решении задач с прямоугольной матрицей Якоби, когда число звеньев избыточно ($N > 6$) или недостаточно ($N < 6$) в алгоритме (6) вместо обратной матрицы J^{-1} необходимо использовать левую $J^+ = (J^{\mathrm{T}} \cdot J)^{-1} J^{\mathrm{T}}$ или правую $J^+ = J^{\mathrm{T}}(J \cdot J^{\mathrm{T}})^{-1}$ псевдообратные матрицы [1]. При этом получаем следующий алгоритм:

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k J^+(q^k) \cdot F(q^k). \qquad (8)$$

Алгоритмы метода Левенберга—Марквардта. В алгоритме (8) при вычислении псевдообратных матриц из-за того, что матрицы $(J^{\mathrm{T}} \cdot J)$ и $(J \cdot J^{\mathrm{T}})$ могут оказываться плохо обусловленными или вырожденными, для обеспечения сходимости итерационных процессов необходимо осуществлять факторизацию на основе матричного разложения или использовать простую регуляризацию:

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k[(J^{\mathrm{T}}J + \alpha_{2k}E)^{-1}J^{\mathrm{T}}]F(q^k); \qquad (9)$$

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k[J^{\mathrm{T}}(JJ^{\mathrm{T}} + \alpha_{2k}E)^{-1}]F(q^k), \qquad (10)$$

где E — единичная матрица; α_{2k} — регуляризирующий скалярный параметр.

При применении любого из алгоритмов (6)–(10) матрица $J(q)$ может вычисляться либо по получаемым прямым дифференцированием вектор-функции $\Phi(q)$ аналитическим выражениям, достаточно громоздким при $N \geq 3$, либо по более эффективному рекурсивному алгоритму [9], использующему матрицы преобразования однородных координат и операции пересечения (векторные произведения) столбцов матрицы поворота схвата (n, o, a) – векторов нормали, ориентации и подхода.

Рекурсивный алгоритм вычисления матрицы Якоби. В базовой системе координат робота матрица Якоби осуществляет преобразование вектора обобщенных скоростей звеньев:

$$\begin{pmatrix} V_{C,0} \\ \Omega_{C,0} \end{pmatrix} = J_0(q) \cdot \dot{q},$$

где $V_{C,0}$ и $\Omega_{C,0}$ – векторы проекций линейной и угловой скорости схвата. При этом матрица Якоби определяется как произведение $J_0(q) = J_V(q) \cdot J_N(q)$, где $J_N(q)$ – $6{\times}N$ матрица Якоби преобразования скоростей в системе координат схвата

$$\begin{pmatrix} V_{C,N} \\ \Omega_{C,N} \end{pmatrix} = J_N(q) \cdot \dot{q};$$

$J_V(q)$ – $6{\times}6$ матрица преобразования линейных и угловых скоростей схвата из N-й в базовую систему координат

$$\begin{pmatrix} V_{C,0} \\ \Omega_{C,0} \end{pmatrix} = J_V(q) \cdot \begin{pmatrix} V_{C,N} \\ \Omega_{C,N} \end{pmatrix}.$$

Для вычисления матрицы $J_N(q)$ требуются $4{\times}4$ матрицы, определяющие положение и ориентацию схвата в j-й системе координат, т. е. относительно $(j-1)$-го звена:

$$U_j(q) = A_j(q_1) A_{j+1}(q_2) \cdots A_N(q_N) = \begin{pmatrix} R_{N,j} & & & p_{N,j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $R_{N,j} = (n_{N,j},\ o_{N,j},\ a_{N,j})^{\mathrm{T}}$ – матрица поворота с векторами ориентации системы координат схвата; $p_{N,j} = (x_{N,j},\ y_{N,j},\ z_{N,j})^{\mathrm{T}}$ – вектор положения центра системы координат схвата.

Столбцы матрицы $J_N(q) = (J_{1,N} \quad J_{2,N} \quad \ldots$ $\ldots \quad J_{6,N})$ вычисляются по обратной рекурсии ($j = 6,\ 5,\ \ldots,\ 1$):

$$J_{j,N} = \begin{cases} \begin{pmatrix} d_j \\ \delta_j \end{pmatrix} & \text{–для } j\text{-звена В-типа;} \\ \begin{pmatrix} \delta_j \\ 0_{3x1} \end{pmatrix} & \text{– для } j\text{-звена П-типа,} \end{cases}$$

где d_j – $3{\times}1$ вектор, составленный из Z-составляющих векторных произведений

$$d_j = \begin{pmatrix} (p_{N,j} \times n_{N,j})_z \\ (p_{N,j} \times o_{N,j})_z \\ (p_{N,j} \times a_{N,j})_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{x,j} n_{y,j} - p_{y,j} n_{x,j} \\ p_{x,j} o_{y,j} - p_{y,j} o_{x,j} \\ p_{x,j} a_{y,j} - p_{y,j} a_{x,j} \end{pmatrix};$$

δ_j – единичный $3{\times}1$ вектор, направленный вдоль оси движения j-го звена

$$\delta_j = R_{N,j}^{\mathrm{T}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{z,j} \\ o_{z,j} \\ a_{z,j} \end{pmatrix};$$

0_{3x1} – нулевой $3{\times}1$ вектор.

Матрица $J_V(q)$ в блочном представлении имеет следующий вид:

$$J_V(q) = \begin{pmatrix} R_{N,0} & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & R_{N,0} \end{pmatrix},$$

где 0_{3x3} – нулевая матрица; $R_{N,0}(q)$ – $3{\times}3$ матрица поворота с векторами-столбцами нормали, ориентации и подхода, вычисленными в базовой системе координат.

Более детально рекурсивный алгоритм вычисления матрицы Якоби описан в [5].

Анализ сходимости итерационных алгоритмов. Проанализируем процессы итерационного решения ОЗК по алгоритмам (6)–(10) с вычислением матрицы Якоби с использованием рассмотренного выше рекурсивного алгоритма на двух траекториях схвата робота ВВВ-типа (рис. 1). Траектории заданы базовыми точками $S_g = \{X,\ Y,\ Z\}$, первая – в зоне достижимости схвата, вторая – с некоторыми точками вне ее границы.

На рис. 2 и 3 показаны траектории звеньев, полученные для верхней конфигурации робота аналитическими методами (5а) и (5б), а вычисленные по этим траекториям путем решения прямой задачи кинематики соответствующие траектории схвата

$S_c = \{X_c,\ Y_c,\ Z_c\}$ показаны на рис. 1 сплошными линиями.

На рис. 4 представлены графики модулей определителя матрицы Якоби робота ВВВ-типа, вычисленной по рекурсивному алгоритму для двух вариантов траекторий звеньев (см. рис. 2 и 3). Точно такие же графики получаются при вычислении элементов матрицы Якоби по аналитическим выражениям. По графикам видно, что для второго варианта траекторий в точках на границе зоны достижимости схвата определитель вырожденной матрицы Якоби принимает нулевое значение.

На первоой траектории схвата решения, получаемые всеми сравниваемыми алгорит-

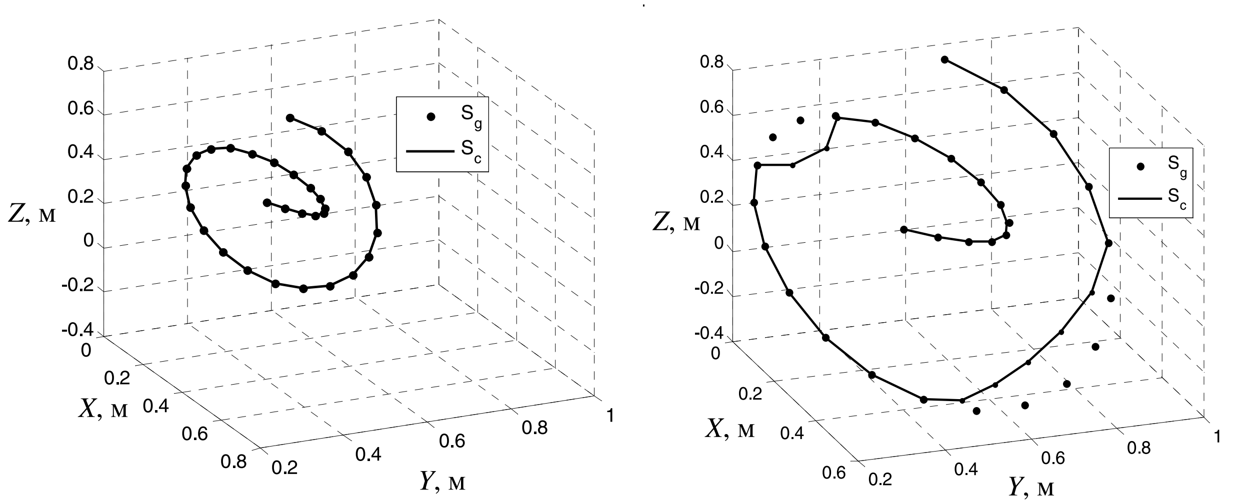


Рис. 1. Заданные траектории схвата

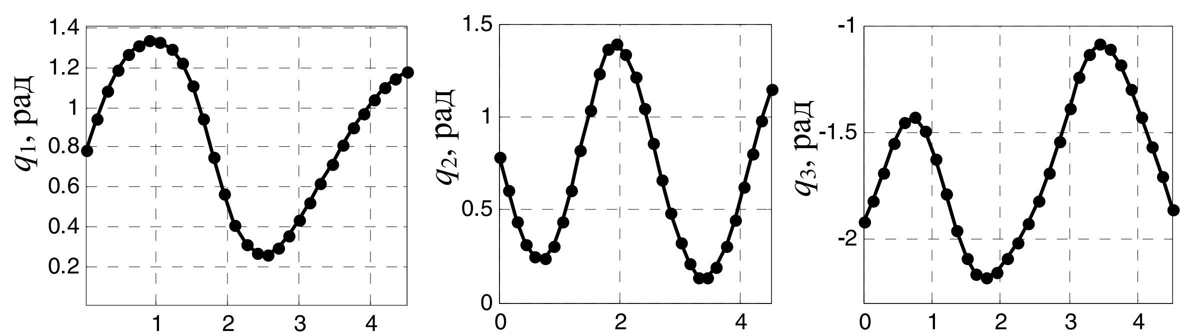


Рис. 2. Результаты решения ОЗК на первой траектории схвата

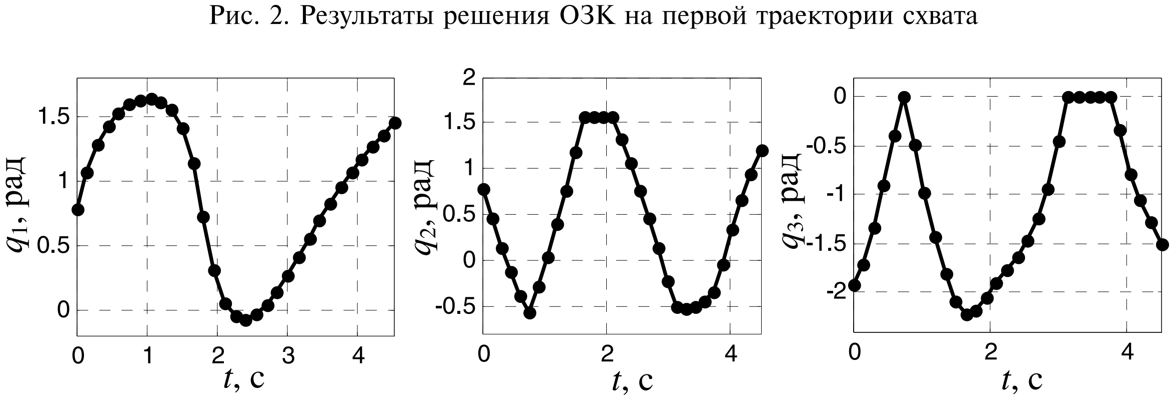


Рис. 3. Результаты решения ОЗК на второй траектории схвата

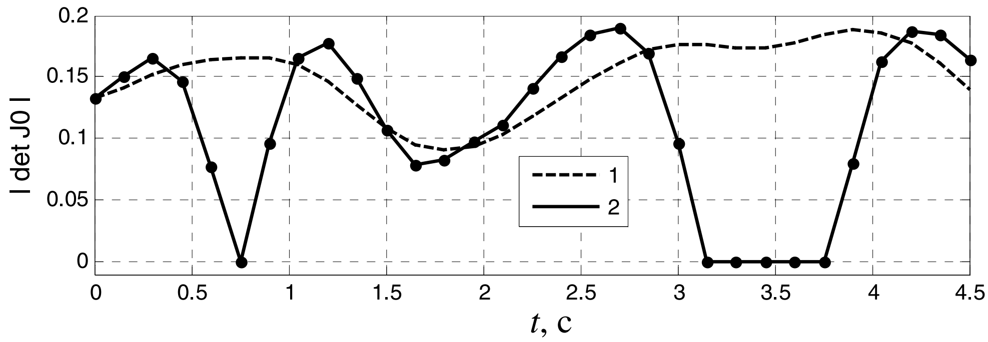


Рис. 4. Графики модулей определителя матрицы Якоби

мами (6)–(10), совпадают с траекториями звеньев (см. рис. 2), вычисленными аналитическими методами. При этом для каждого из алгоритмов были настроены значения постоянных параметров α_k и α_{2k}, обеспечивающие сходимость процессов решения ОЗК за число итераций $k_{\max} \le 100$.

На второй траектории схвата из-за вырождаемости матрицы Якоби в особых точках сходимость алгоритмов (6) и (8) теряется. Алгоритмы (9) и (10) с регуляризированными левой и правой псевдообратными матрицами наиболее устойчивые. При значениях $\alpha_k = 2$, $\alpha_{2k} = 0{,}1$ они дают такие же решения, как на рис. 3, за число итераций $k_{\max} \le 30$. Алгоритм (7), использующий транспонированную матрицу Якоби, сходится, но дает очень грубые решения.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно дать следующие практические рекомендации.

При моделировании и разработке систем управления движением манипуляционных роботов целесообразно применять итерационные алгоритмы решения ОЗК. Аналитические решения по выражениям, содержащим обратные тригонометрические функции, в особых конфигурациях ИМ могут оказываться некорректными.

Наиболее точные решения ОЗК многозвенных роботов могут быть получены по алгоритмам (9) и (10) с регуляризацией, в которых матрицу Якоби рекомендуется вычислять без численного дифференцирования по рекурсивному алгоритму, использующему кинематические модели в однородных координатах.

При программировании (планировании) траекторий схвата в системах управления движением роботов следует стараться избегать ситуаций, показанных на рис. 1 и 3. Базовые точки должны задаваться в рабочей области робота, определяемой габаритными размерами звеньев и допустимыми диапазонами изменения обобщенных координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беклемишев Д.В.** Дополнительные главы линейной алгебры: учеб. пособие. М.: Наука, 1983. 336 с.

2. **Деннис Д., Шнабель Р.** Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988. 440 с.

3. **Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.** Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.

4. **Игнатова Е.И., Ростов Н.В.** Кинематические задачи в математическом моделировании роботов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 2(97). С. 159–164.

5. **Игнатова Е.И., Лопота А.В., Ростов Н.В.** Системы управления движением роботов. Компьютерное проектирование. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. 302 с.

6. **Шахинпур М.** Курс робототехники. Пер. с англ. под ред. С.Л. Зенкевича. М.: Мир, 1990. 527 с.

7. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника. Пер. с англ. под ред. В.Г. Градецкого. М.: Мир, 1989. 624 с.

8. **Юревич Е.И.** Основы робототехники: учеб. для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.

9. **Corke P.I.** Robotics Toolbox 9.9 for MATLAB R9. 2014. 286 p.

REFERENCES

1. **Beklemishev D.V.** *Dopolnitelnyye glavy lineynoy algebry*. Moscow: Nauka Publ., 1983, 336 p. (rus)

2. **Dennis D., Shnabel R.** *Chislennyye metody bezuslovnoy optimizatsii i resheniya nelineynykh uravneniy*. Moscow: Mir Publ., 1988, 440 p. (rus)

3. **Zenkevich S.L., Yushchenko A.S.** *Upravleniye robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami*. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2000, 400 p. (rus)

4. **Ignatova Ye.I., Rostov N.V.** Kinematicheskiye zadachi v matematicheskom modelirovanii robotov, *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*. St. Petersburg: SPbGPU Publ, 2010, No. 2(97), Pp. 159–164. (rus)

5. **Ignatova Ye.I., Lopota A.V., Rostov N.V.** *Sistemy upravleniya dvizheniyem robotov. Kompyuternoye proyektirovaniye*. St. Petersburg: SPbGPU Publ, 2014, 302 p. (rus)

6. **Shakhinpur M.** *Kurs robototekhniki*, Per. s angl. pod red. S.L. Zenkevicha. Moscow: Mir Publ., 1990, 527 p. (rus)

7. **Fu K., Gonsales R., Li K.** *Robototekhnika*, Per. s angl. pod red. V.G. Gradetskogo. Moscow: Mir Publ., 1989, 624 p. (rus)

8. **Yurevich Ye.I.** *Osnovy robototekhniki*. St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2005, 416 p. (rus)

9. **Corke P.I.** *Robotics Toolbox 9.9 for MATLAB R9*. 2014, 286 p.

РОСТОВ Николай Васильевич – *доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: rostovnv@mail.ru

ROSTOV, Nicolay V. *St. Petersburg Polytechnic University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: rostovnv@mail.ru

УДК 531(075)

В.В. Котов, Д.Г. Арсеньев, В.А. Полянский

КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ БИОМОРФНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена модельная задача о подавлении случайных колебаний шарнирно опертой балки с помощью равномерно распределенных по ней активных гасителей. Предложено синтезировать регуляторы на основе модальной декомпозиции управляемого объекта с использованием линейно-квадратичного критерия качества. Предложен квазиоптимальный подход с минимизацией множества линейно-квадратичных критериев последовательно, начиная с первой собственной формы. Проведено математическое моделирование как самих вынужденных случайных колебаний, так и различных алгоритмов подавления. Проведено исследование робастности модальных регуляторов путем изменения точности задания их параметров.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ; РОБАСТНОСТЬ; КОЛЕБАНИЯ; ДЕКОМПОЗИЦИЯ.

V.V. Kotov, D.G. Arseniev, V.A. Polyanskiy

QUASIOPTIMAL BIOMORPHIC MITIGATION IN RANDOM VIBRATION OF ELASTIC OBJECTS

The given paper investigates the model problem of mitigating random vibrations of a hinged beam using evenly distributed actuators on it. It has been proposed to synthesize the regulators based on the modal decomposition of a controlled object using the linear-quadratic criterion of quality. We have also proposed a quasioptimal method with the minimisation of multiplicity linear-quadratic criteria successively starting with the first eigenform. The mathematical modeling of forced random vibrations and various algorithms of mitigation has been conducted. The robustness of modal regulators has been investigated by varying their parameters. The results have demonstrated a very good degree of mitigation forced random vibrations of a modeling object, especially in the modal control case in comparison with other strategies to solve control problems.

OPTIMAL CONTROL; ROBUSTNESS; VIBRATIONS; DECOMPOSITION.

Применение оптимальных алгоритмов управления при активном подавлении вынужденных колебаний упругих систем имеет глубокий физический смысл, т. к. большинство критериев оптимальности носят «энергетический» характер. Низкая энергия вынужденных колебаний соответствует минимуму критерия. Этот подход широко применяется [1—5].

Вместе с тем известные результаты относятся к упругим системам с относительно небольшим количеством датчиков обратной связи и актуаторов. По механическим соображениям эти датчики не позволяют с достаточной точностью контролировать больше двух-трех собственных частот колебаний упругого объекта (например, восемь датчиков и восемь актуаторов на квадратной упругой пластине). Это приводит к фактической ненаблюдаемости управляемого объекта. Увеличение количества датчиков приводит в случае распределенных упругих систем к плохо обусловленным нелинейным системам уравнений большой размерности для определения величины управляющих сигналов.

В [6] для преодоления плохой обусловленности предложен декомпозиционный подход. Но его применение эффективно только при проведении параллельной оптимизации расположения датчиков и актуаторов системы управления на распределенном объекте. Применение декомпозиционного подхода к задачам синтеза оптимальных систем управления по линейно-квадратичному критерию не дает однозначного результата, т. к. для поиска коэффициентов усиления в контурах обратной связи необходимо решать систему связанных нелинейных уравнений большой размерности.

Вместе с тем оптимизационный подход позволяет автоматически получать устойчивые системы управления. Несмотря на отдельные проблемы, в среднем качество переходных процессов и степень подавления вынужденных колебаний в таких системах – оптимальные, что важно для практики. Из-за большого количества переменных состояния (теоретически бесконечного) и другие методы синтеза устойчивой системы управления являются очень трудоемкими.

Большие преимущества модального управления и декомпозиционного подхода позволяют искать решения задачи синтеза регуляторов системы управления распределенными объектами с помощью квазиоптимальных алгоритмов.

Недостаток многих оптимальных алгоритмов – большая чувствительность принимаемых решений к изменению параметров распределенного объекта. Поэтому исследование робастности модального управления является критически важным для их применения на практике.

Постановка задачи оптимального управления колебаниями распределенного объекта

За исключением специальных случаев автоколебаний и параметрического резонанса можно считать колебания упругих систем малыми по амплитуде. В этом случае уравнения управляемого механического объекта можно рассматривать в линейном приближении:

$$\begin{gathered} \dot{X} = AX + BU + Gf, \\ Y = CX, \\ X(0) = X_0, \end{gathered} \tag{1}$$

где X – вектор переменных состояния объекта размерности $[n]$; Y – вектор наблюдений размерности $[m]$; U – вектор управлений размерности $[l]$; f – вектор внешних воздействий размерности $[q]$; X_0 – вектор начальных условий; A – матрица линеаризованной системы уравнений, описывающей объект управления, размерности $[n \times n]$; G – матрица внешних воздействий линеаризованной системы уравнений размерности $[n \times l]$; B – матрица управления линеаризованной системы уравнений размерности $[n \times q]$; C – матрица наблюдателя размерности $[m \times n]$.

Требуется найти вектор управляющих воздействий U, обеспечивающий снижение амплитуд упругих колебаний переменных состояния X для широкого класса внешних гармонических воздействий f.

Задача состоит в минимизации функционала $J(U) = \int_0^\infty \|X(\omega)\|^2 \chi(\omega) d\omega$, где ω – частота внешнего гармонического воздействия; $\chi(\omega)$ – весовая функция; $X(\omega)$ – вектор амплитуды гармонических колебаний переменных состояния.

Решение этой задачи в случае упругого объекта с сосредоточенными актуаторами и датчиками, измеряющими текущее состояние системы [6], приводит к линейным уравнениям относительно величины управляющих воздействий вида $AU = B$, где A – матрица податливости объекта по отношению к воздействию актуаторов.

Полученное оптимальное управление требует измерения всего вектора состояния и хорошей обусловленности матрицы A. И то и другое требование в упругих распределенных системах не выполняется. Ввиду бесконечного числа собственных форм, у них формально нарушено условие наблюдаемости, а обусловленность матрицы A зависит от соотношения размеров и в случае стержней, плоских объектов или оболочек в принципе не может быть хорошей.

Еще одним недостатком данной оптимальной постановки является программный характер оптимального управления, что в случае неточной идентификации модели распределенного объекта автоматически приведет к дополнительным ошибкам регулирования. К аналогичным результатам приводит использование H_2 и H_∞ критериев.

Поэтому более подходящей постановкой задачи представляется линейно-квадратичный критерий качества, учитывающий затраты на управление и автоматически обеспечивающий устойчивую систему управления линейной отрицательной обратной связью, статические ошибки регулирования в которой зависят только от величины коэффициентов обратных связей и в первом приближении не связаны с точностью идентификации. Прямое использование критерия приводит к системе нелинейных уравнений Лурье–Риккати.

Для преодоления вычислительных проблем предлагается использовать квазиоптимальный декомпозиционный подход. Помимо упрощения оптимизационных процедур он позволяет решить ряд других проблем при проектировании систем управления распределенными объектами.

Стандартный подход предполагает, что датчики обратных связей расположены в местах приложения управляющих воздействий. Таким образом, числа m и l совпадают, и можно построить m контуров локальной обратной связи, в каждом из которых организовать управление вида

$$U_j = -H_j Y_j, \tag{2}$$

где U_j – компонента вектора управления; Y_j – компонента вектора наблюдения; H_j – оператор системы управления в j-м контуре обратной связи.

Как правило, в контурах обратной связи используются ПИД-регуляторы, т. е. в пространстве переменных Лапласа $H_j(p)$ является дробной рациональной функцией со знаменателем и числителем второго порядка. При таком подходе часть объекта, управление которым производится в локальном контуре обратной связи, моделируется в виде сосредоточенной массы и упругих связей, что приближенно отражает реальное положение.

В данном случае появляется ряд проблем:

- Отсутствие учета взаимовлияния приводов, установленных на одном распределенном объекте, друг на друга и связанные с этим затраты дополнительной мощности и ошибки регулирования.
- Большое количество изолированных контуров обратных связей снижает помехозащищенность всей системы управления, т. к. контуры управления связаны через сам упругий объект, и влияние помех может нарастать с ростом числа контуров. Более того, возможны эффекты типа «самосинхронизации вибраторов». Уменьшение количества обратных связей автоматически приведет к увеличению ошибок, т. к. часть приводов окажется не задействованной.
- Не разработан общий подход в случае, когда количество датчиков обратных связей не совпадает с количеством приводов.

Проведем декомпозицию. Собственные формы движения упругого объекта задают матрицу неособого преобразования S, такого, что SAS^{-1} имеет диагональный вид. Умножим правую и левую части системы (3) на матрицу S и сделаем замену вида $SX = q$, тогда получим систему

$$\begin{gathered} \dot{q} = SAS^{-1}q + SBU + SGf, \\ Y = CS^{-1}q, \\ q(0) = SX_0, \end{gathered} \tag{3}$$

где q – вектор коэффициентов собственных форм движения упругого объекта размерности $[n]$, который заменит вектор переменных состояния.

Некоторые сложности могут возникнуть при определении вектора q по данным датчиков Y. Однако мы полагаем, что количества датчиков достаточно для невырожденности информационной матрицы $(C^{\mathrm{T}}C)$. Тогда для определения вектора q воспользуемся обобщенной процедурой обращения матрицы C:

$$q = S(C^{\mathrm{T}}C)^{-1}C^{\mathrm{T}}Y, \tag{4}$$

где $S(C^{\mathrm{T}}C)^{-1}C^{\mathrm{T}}$ – матрица пересчета вектора наблюдений в модули собственных форм упругого объекта.

Управление будем выбирать в виде $U = kF(q^* - q)$, где q^* – задание на значение модулей формы; k – коэффициент усиления, который может быть в общем случае оператором (например, ПИД-регулятором); F – матрица такая, что SBF имеет диагональную структуру.

Допустим, что выбор такой матрицы F возможен. Тогда из системы (1) получим:

$$\begin{gathered} \dot{q} = \Lambda_A q + k\Lambda_B(q^* - q) + SGf, \\ q = S(C^{\mathrm{T}}C)^{-1}C^{\mathrm{T}}Y, \\ q(0) = SX_0, \end{gathered} \tag{5}$$

где $\Lambda_A = SAS^{-1}$ и $\Lambda_B = SBF$ – диагональные матрицы.

Уравнения (5) в отличие от уравнений (1) являются несвязанными, что позволяет при синтезе управления использовать только часть переменных вектора q, варьируя число переменных в зависимости от требований к качеству подавления вибраций. Для использования преимуществ декомпозиции проведем оптимизацию по каждому уравнению системы (5) отдельно. Это приведет к системе критериев вида

$$J_k\{U_k\} = \int_0^\infty (q_k^2 Q_k + U_k^2 R_k)dt, \ k = 1, \ldots, n,$$

где U_k, q_k – компоненты соответствующих векторов q, U; Q_k, R_k – весовые коэффициенты критерия, соответствующие номеру собственной формы распределенного упругого объекта. Минимизация критериев может быть проведена последовательно и позволяет получить динамические регуляторы первого порядка для каждой моды колебаний. Весовые коэффициенты позволяют учитывать жесткость каждой собственной формы, и их выбор возможен как по стандартным для линейно-квадратичного критерия правилам, так и с учетом ограничений на величину и частотный диапазон управляющих сигналов.

Сравнение различных подходов к подавлению вынужденных колебаний на модельном объекте

В качестве модельного объекта выбрана балка Бернулли, шарнирно опертая по концам. Колебания балки возбуждаются приложением в ее середине изгибающего момента M_B, изменяющегося случайным образом. Угол поворота касательной к средней линии балки $\varphi_j = \varphi(x_j, t)$ в каждый момент времени измеряется в десяти поперечных сечениях, выбранных равномерно по длине балки, исключая концы. В этих же сечениях могут быть приложены управляющие моменты M_j, с целью уменьшения амплитуды изгибных колебаний балки. Уравнения движения подробно описаны в [7].

Оптимизируем управление в нашей системе с помощью известного в литературе подхода: линейно-квадратичного регулятора [8].

Рассмотрим уравнение для главных координат:

$$\ddot{\beta} + N\dot{\beta} + \Omega^2\beta = \\ = M_B u'\left(\frac{l}{2}\right) + \sum_{j=1}^{10} M_j(x_j)u'(x_j), \tag{6}$$

где N – коэффициент демпфирования; $\Omega^2 = \frac{EI}{\rho A}\left(\frac{k\pi}{l}\right)^4$ – квадрат собственной частоты изгибных колебаний балки; M_B – внешний изгибающий момент.

Преобразуем (8) к динамической системе первого порядка:

$$\dot{X} = AX + BU + Gf, \\ Y = CX, \tag{7}$$

где $X(t) = \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}$ – вектор состояния; $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Omega^2 & -N \end{bmatrix}$ – матрица системы; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ u'(x) \end{bmatrix}$ – матрица управления.

В случае равномерного состояния закон управления, основанный на обратной связи, является линейным временным инвариантом состояний и может быть записан в следующей форме $U = -KX$, где K – регулятор, который нужно определить.

В рамках классического управления с помощью линейного-квадратичного регулятора (LQR) минимизируется следующий функционал:

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty (X^{\mathrm{T}}QX + U^{\mathrm{T}}RU)dt \to \min,$$

где Q и R представляют весовые коэффициенты на различных каналах состояния и управления. Соответствуя задаче оптимального управления, матрица Q должна быть симметричной и неотрицательной, а матрица R симметричной и положительно определенной.

Закон управления дается следующим выражением $U = -K_{\mathrm{LQR}}X$, с коэффициентом усиления $K_{\mathrm{LQR}} = R^{-1}B^{\mathrm{T}}P$.

Постоянная матрица P является решением уравнения Лурье–Риккати

$$A^{\mathrm{T}}P + PA + Q - PBR^{-1}B^{\mathrm{T}}P = 0.$$

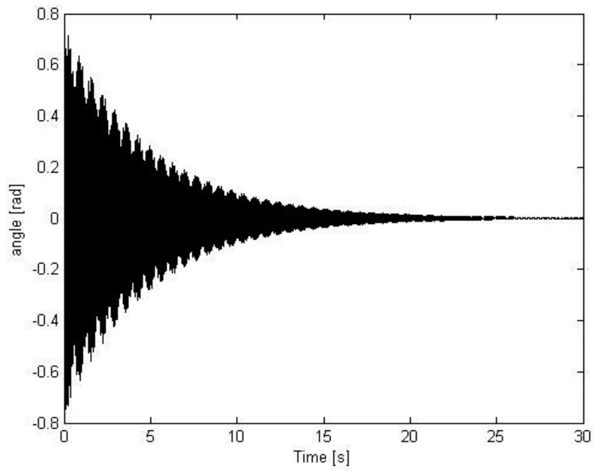


Рис. 1. Осциллограмма сигнала с датчика 2 при управлении с помощью линейно-квадратичного регулятора

Тогда уравнение состояния из системы (9) преобразуется к следующему виду:

$$\dot{X} = (A - BK_{LQR})X + Gf.$$

Результат управления колебаниями модельного объекта можно увидеть на рис. 1.

Необходимым условием применения квазиоптимальных подходов является низкая чувствительность результатов подавления колебаний с помощью синтезированных регуляторов к изменениям параметров объекта и точности задания коэффициентов регуляторов. Аналитическое исследование требует в случае нашего модельного объекта громоздких вычислений, поэтому целесообразно провести численное моделирование работы системы управления, построенной по принципу модальной декомпозиции, и сравнить результаты с применяемыми для этой цели локальными регуляторами. Тем более что в целом ряде источников [1–5] локальное управление рассматривается как более точное и робастное.

Для подавления случайных колебаний балки применим два других алгоритма управления.

Первый соответствует мехатронному подходу [9, 10] (рис. 2), в рамках которого организуется управление с обратной связью по измерениям углов:

$$M_j = -K_j \varphi(x_j, t), \qquad (8)$$

где K_j – коэффициент обратной связи в j-м сечении.

Второй алгоритм отражает суть модального контроля (рис. 3, 4), в котором управляющий момент в каждом сечении сформируем в виде

$$M_j(t) = -K_j \sum_{k=1}^{m} s_{k,j} p_k(t), \qquad (9)$$

где $p_k(t) = \sum_{j=1}^{10} \varphi(x_j, t)\vartheta_k(x_j)$ – скалярное

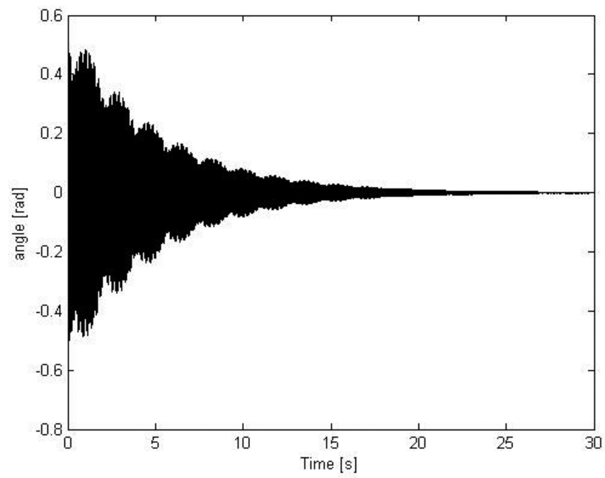


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с датчика 2 под управлением при локальном замыкании десяти контуров обратной связи

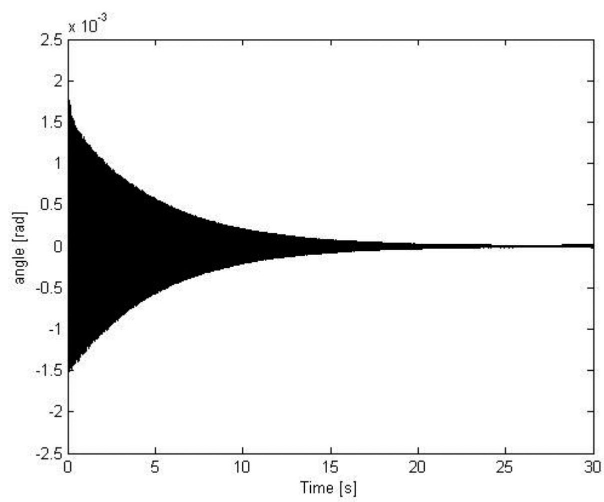


Рис. 3. Осциллограмма сигнала с датчика 2 при модальном управлении по четырем формам (четыре контура обратной связи)

Весовые коэффициенты $s_{k,j}$ заданы с точностью до четырех значащих цифр после запятой

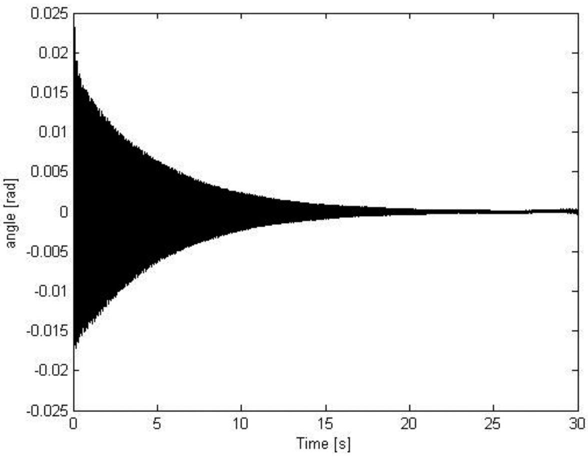


Рис. 4. Осциллограмма сигнала с датчика 2 при модальном управлении по четырем формам (четыре контура обратной связи) Весовые коэффициенты $s_{k,j}$ заданы с точностью до знака

произведение вектора, образованного значениями углов в сечениях, где установлены датчики, и вектора k-й формы колебаний, составленного из значений, вычисленных в тех же сечениях; $s_{k,j}$ – весовые коэффициенты; $m \leq 10$.

Коэффициенты обратной связи как в случае локального, так и в случае модального управления будем брать одинаковыми во всех сечениях и равными $K_j = 100$ Нм/рад.

Рассмотрим результаты применения предлагаемого квазиоптимального подхода. На рис. 5, 6 представлены результаты подавления широкополосных случайных колебаний при последовательной LQR оптимизации по различному числу собственных форм колебаний.

Результаты моделирования показывают значительные преимущества модального управления по сравнению с классическим подходом, основанном на использовании линейно-квадратичного регулятора. В свою очередь модальное управление при меньшем числе контуров обратной связи четыре против десяти оказывается эффективнее локального управления. Даже в том случае, когда коэффициенты распределения усилий актуаторов по формам заданы с точностью до знака, удается получить более высокую степень подавления колебаний, чем при локальном управлении по десяти контурам с обратной связью.

Проведено исследование различных подходов подавления колебаний упругой балки, вызванных приложением внешнего изгибающего момента, изменяющегося по случайному закону.

Полученные результаты моделирования показали, что применение разработанных квазиоптимальных алгоритмов модального контроля способствует более точному управлению системой по сравнению с клас-

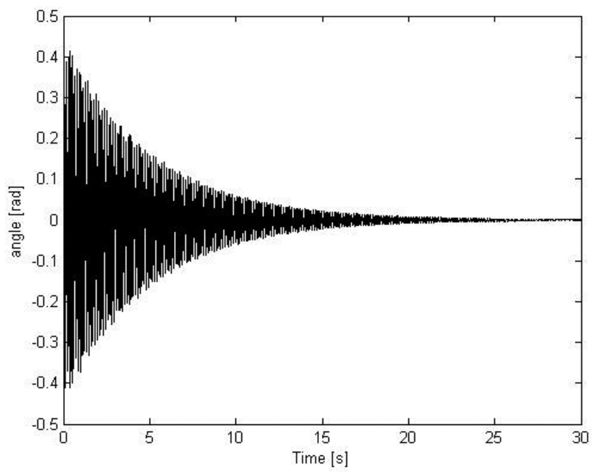


Рис. 5. Осциллограмма сигнала с датчика 2 при модальном управлении по одной форме (один контур обратной связи) Весовые коэффициенты $s_{k,j}$ заданы с точностью до знака

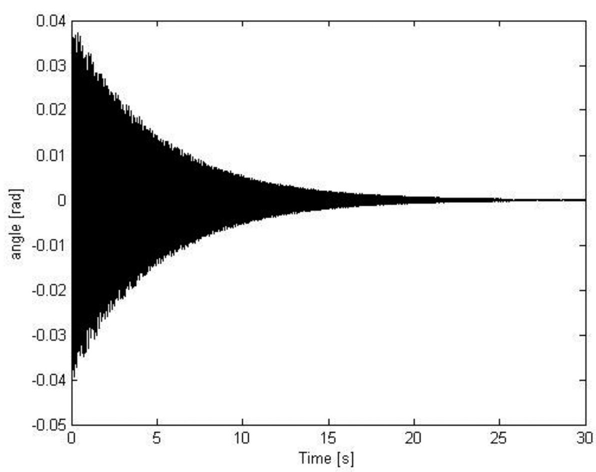


Рис. 6. Осциллограмма сигнала с датчика 2 при модальном управлении по трем формам (три контура обратной связи) Весовые коэффициенты $s_{k,j}$ заданы с точностью до знака

сическим оптимальным подходом на базе линейно-квадратичного регулятора. Также выяснено, что при сопоставимом числе обратных связей и тех же коэффициентах усиления K_j эффективность модального управления на порядок выше эффективности управления с локальными обратными связями.

На модельном объекте удалось также установить робастность модального управления.

Высокая степень подавления вибраций была достигнута с помощью модального управления даже в том случае, когда весовые коэффициенты $s_{k,j}$ задавались с точностью до знака, доказывая тем самым робастность предложенного оптимального алгоритма.

Предложен квазиоптимальный алгоритм последовательной настройки контуров модального управления. Применение такого алгоритма на практике позволяет экспериментальным путем определить количество собственных форм, необходимое для подавления вынужденных случайных колебаний с заданной точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stavroulakis G.E., Foutsitzi G., Hadjigeorgiou E., Marinova D., Baniotopoulos C.C.** Design and robust optimal control of smart beams with applicationon vibrations suppression // Advances in Engineering Software. 2005. Vol. 36. Pp. 806—813.

2. **Shia W., Alsarheed M., Schuster E., Walker M.L., Leuer J., Humphreys D.A., Gates D.A.** Multivariable model-based shape control for the National Spherical Torus Experiment (NSTX) // Fusion Engineering and Design. 2011. Vol. 86. Pp. 1107—1111.

3. **Stavroulakis G.E., Marinova D.G., Hadjigeorgiou E., Foutsitzi G., Baniotopoulos C.C.** Robust active control against wind-induced structural vibrations // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2006. Vol. 94. Pp. 895—907.

4. **Fisco N.R., Adeli H.** Smart structures: Part 2. Hybrid control systems and control strategies Scientia Iranica // Transactions A: Civil Engineering. 2011. Vol. 18. Pp. 285—295.

5. **Kucuk I. et al.** Optimal control of a distributed parameter system with applications to beam vibrations using piezoelectric actuators // J. of the Franklin Institute [электронный ресурс] / URL: http://dx.doi.org/ 10.1016/j.jfranklin.2012.10.008

6. **Захаров М.Г., Первозванский А.А.** Особенности построений высокоточных систем управления полем перемещения упругих тел // Машиноведение. 1988. № 4. С. 84—89.

7. **Беляев А.К., Котов В.В., Полянский В.А., Смирнова Н.А.** Биоморфное управление в задаче об активном подавлении колебаний // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2014. Т. 1. № 1. С. 96—106.

8. **Первозванский А.А.** Курс теории автоматического управления: учеб. пособ. М.: Наука. Гл. ред. физматлит, 1986. 616 с.

9. **Nguyen Q., Tong L.** Shape control of smart composite plate with non-rectangular piezoelectric actuators // Composite Structures. 2004. Vol. 66. Pp. 207—214.

10. **Kekana M.** A static shape control model for piezo-elastic composite structures // Composite Structures. 2003. Vol. 59. Pp. 129—135.

REFERENCES

1. **Stavroulakis G.E., Foutsitzi G., Hadjigeorgiou E., Marinova D., Baniotopoulos C.C.** Design and robust optimal control of smart beams with applicationon vibrations suppression, *Advances in Engineering Software*, 2005, Vol. 36, Pp. 806—813.

2. **Shia W., Alsarheed M., Schuster E., Walker M.L., Leuer J., Humphreys D.A., Gates D.A.** Multivariable model-based shape control for the National Spherical Torus Experiment (NSTX), *Fusion Engineering and Design*, 2011, Vol. 86, Pp. 1107—1111.

3. **Stavroulakis G.E., Marinova D.G., Hadjigeorgiou E., Foutsitzi G., Baniotopoulos C.C.** Robust active control against wind-induced structural vibrations, *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn*, 2006, Vol. 94, Pp. 895—907.

4. **Fisco N.R., Adeli H.** Smart structures: Part 2. Hybrid control systems and control strategies Scientia Iranica, *Transactions A: Civil Engineering*, 2011, Vol. 18, Pp. 285—295.

5. **Kucuk I. et al.** Optimal control of a distributed parameter system with applications to beam vibrations using piezoelectric actuators, *Journal of the Franklin Institute*. Available: http://dx.doi.org/ 10.1016/j.jfranklin.2012.10.008

6. **Zakharov M.G., Pervozvanskiy A.A.** Osobennosti postroyeniy vysokotochnykh sistem upravleniya polem peremeshcheniya uprugikh tel, *Mashinovedeniye*, 1988, No. 4, Pp. 84—89. (rus)

7. **Belyayev A.K., Kotov V.V., Polyanskiy V.A.,**

Smirnova N.A. Biomorfnoye upravleniye v zadache ob aktivnom podavlenii kolebaniy, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 2014, Vol. 1. No. 1. Pp. 96–106. (rus)

8. **Pervozvanskiy A.A.** *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Nauka Gl. red. fizmatlit Publ., 1986, 616 p. (rus)

9. **Nguyen Q., Tong L.** Shape control of smart composite plate with non-rectangular piezoelectric actuators, *Composite Structures*, 2004, Vol. 66, Pp. 207–214.

10. **Kekana M.** A static shape control model for piezo-elastic composite structures, *Composite Structures*, 2003, Vol. 59, Pp. 129–135.

КОТОВ Виталий Владимирович – *аспирант кафедры физики и математического моделирования в механике Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: kotov.vitaliy@gmail.com

KOTOV, Vitaly V. *St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: kotov.vitaliy@gmail.com

АРСЕНЬЕВ Дмитрий Германович – *проректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: imop@imop.spbstu.ru

ARSENIEV, Dmitriy G. *St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: imop@imop.spbstu.ru

ПОЛЯНСКИЙ Владимир Анатольевич – *профессор кафедры физики и математического моделирования в механике Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: vapol@mail.ru

POLYANSKIY, Vladimir A. *St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: vapol@mail.ru

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»

«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL. COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

№ 5 (205) 2014

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 30.10.2014. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,79. Уч.-изд. л. 12,79. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикациях представлены в РИНЦ, в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала – 6 номеров в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук – 8–15 страниц формата А-4; аспирантов – 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул – в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – TNR, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5—7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу **http://journals.spbstu.ru**

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться ДОСРОЧНО.

Более подробную информацию можно получить:
на сайте журнала http://ntv.spbstu.ru
по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10^{00} до 18^{00} Галина Александровна
или по e-mail: infocom@spbstu.ru