

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н., президент РТУ МИРЭА

Кудж С.А. Профессор, д.т.н., ректор РТУ МИРЭА

Банис Ю.Й. Профессор, хабилированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Литва

Боков А.А. Старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., РТУ МИРЭА

Буш А.А. Профессор, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА

Вахрушев С.Б. Профессор, д.ф.-м.н., зав. лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ

Голованова Н.Б. Профессор, д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА

Гуляев Ю.В. Академик РАН, член Президиума РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Жуков Д.О. Профессор, д.т.н., зав. кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА

Кимель А.В. Доцент, к.ф. - м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды

Козлов Г.В. Профессор, д.ф.-м.н., заместитель руководителя аппарата генерального директора АО «Концерн ВКО „Алмаз-Антей“»

Кондратенко В.С. Профессор, д.т.н., зав. кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

Крамаров С.О. Профессор, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Сургутского государственного университета

Мишина Е.Д. Профессор, д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА

Пасечник С.В. Профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

Перно Ф. Профессор, проректор по научной работе, Центральная Школа г. Лилль, Франция

Романов М.П. Профессор, д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА

Савиных В.П. Член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Скотт Дж. Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания

Соколов В.В. Профессор, д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА

Тимошенко А.В. Профессор, д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА

Фетисов Ю.К. Профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА

Харин Ю.С. Член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, д.ф.-м.н., директор Научно-исследовательского института прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Беларусь

Цветков В.Я. Профессор, д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА

РЕДАКЦИЯ:

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н.; e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.х.н., доцент; e-mail: esipova@mirea.ru

Семерня Л.Г. Технический редактор; e-mail: semernya@mirea.ru

Середина Г.Д. Зав. редакцией, к.т.н.; e-mail: seredina@mirea.ru

Адрес редакции:

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88); e-mail: seredina@mirea.ru; <http://rtj.mirea.ru>

EDITORIAL BOARD

Alexander S. Sigov – Editor-in-Chief of the Journal, Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, President of RTU MIREA

Stanislav A. Kudzh – Professor, D.Sc. (Eng.), Rector of RTU MIREA

Yuras Banis – Professor, Habilitated Doctor of Sciences, Vice-Rector of Vilnius University, Lithuania

Tatyana M. Buslaeva – Professor, D.Sc. (Chem.), RTU MIREA

Alexander A. Bush – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA

Sergey B. Vakhrushev – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute RAS, Professor of the Department of Physical Electronics of SPbSPU

Nataliya B. Golovanova – Professor, D.Sc. (Economics), Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA

Yury V. Gulyaev – Academician of the Russian Academy of Sciences, Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS

Dmitry O. Zhukov – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA

Alexey V. Kimel – Associate Professor, Ph.D. (Phys.-Math.), Radboud University, Nijmegen, Netherlands

Gennady V. Kozlov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Deputy Head of the Office of the General Director of JSC Concern “VKO Almaz-Antey”

Vladimir S. Kondratenko – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

Sergey O. Kramarov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Surgut State University

Elena D. Mishina – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA

Sergey V. Pasechnik – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

Philippe Pernod – Professor, Dean of Research, Ecole Centrale de Lille, France

Mikhail P. Romanov – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA

Viktor P. Savinykh – Member-Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Eng.), President of Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Twice Hero of the Soviet Union

James F. Scott – Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, UK

Viktor V. Sokolov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Adviser on Scientific Work of RTU MIREA

Andrey V. Timoshenko – Professor, D.Sc. (Eng.), Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA

Yury K. Fetisov – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA

Yury S. Kharin – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Director of the Research Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Belarus

Viktor Y. Tsvetkov – Professor, D.Sc. (Eng.), Councilor of the Administration of RTU MIREA

EDITORIAL:

Tatyana M. Buslaeva – Professor, D.Sc. (Chem.). E-mail: buslaeva@mirea.ru

Olga V. Esipova – Executive Editor, Ph.D. (Chem.), Associate Professor. E-mail: esipova@mirea.ru

Larisa G. Semernya – Technical Editor. E-mail: semernya@mirea.ru

Galina D. Seredina – Managing Editor, Ph.D. (Engineering). E-mail: seredina@mirea.ru

Address:

86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia (office L-119)

Phone: +7(495)246-05-55 (#288); e-mail: seredina@mirea.ru; <http://rtj.mirea.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ. ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

- Vityukov V.K., Nefedov V.I., Simachkov D.S.*** 5
Non-contact method of measuring surface temperature

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен*** 18
Влияние фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией

- Легкий Н.М., Унченко И.В.*** 29
Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках

- Толкачев П.А., Сизых В.В., Стариковский А.И.*** 39
Модель оценки уровня паразитных фазовых флуктуаций в выходном сигнале синтезатора частот

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Ожерелкова Л.М., Савин Е.С.*** 49
Температурная зависимость нестационарной теплопроводности твердых тел

- Петрусевич Д.А.*** 61
Анализ математических моделей, используемых для прогнозирования эконометрических временных рядов

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

- Молчанов К.В.*** 74
Диалектическое изучение английского языка в свете труда «Наука логики» Гегеля: новодиалектическое познание, диалектическое программирование и процессы мышления

- Правила для авторов*** 83

CONTENTS

ROBOTIC SYSTEMS, TECHNOLOGIES FOR REMOTE SENSING AND NON-DESTRUCTIVE TESTING

- Bitukov V.K., Nefedov V.I., Simachkov D.S.*** 5
Non-contact method of measuring surface temperature

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Do Trung Tien*** 18
Effect of phase-shift interference on the noise immunity of correlation demodulator of signals with multiple phase shift keying

- Legkiy N.M., Unchenko I.V.*** 29
Formation of the direction diagram in phased antenna array

- Tolkachev P.A., Sizykh V.V., Starikovskiy A.I.*** 39
Model of evaluating the level of parasitic phase fluctuations in the output signal of the frequencies synthesizer

MATHEMATIC MODELING

- Ozherelkova L.M., Savin E.S.*** 49
The temperature dependence of unsteady heat conduction in solids

- Petrusevich D.A.*** 61
Analysis of mathematical models used for econometrical time series forecasting

PHILOSOPHICAL FOUNDATIONS OF TECHNOLOGY AND SOCIETY

- Molchanov K.V.*** 74
The dialectic study of the English language in the light of the work “Science of logic” by Hegel: New dialectic cognition, dialectical programming, and the processes of thinking

- Author Guidelines*** 83

NON-CONTACT METHOD OF MEASURING SURFACE TEMPERATURE

V.K. Bityukov[@],

V.I. Nefedov,

D.S. Simachkov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: bitukov@mirea.ru

A non-contact method is proposed for measuring the surface temperature of an object using a standard radiator and standard object having optico-physical properties identical to those of the monitored object. Placed co-planarly with the monitored object in the field of view of an optoelectronic system (OES) is a standard object, the temperature of which is regulated and measured, and a standard radiator, whose normal spectral emissivity and temperature are known. In addition, the OES has its three fixed points, at which it registers the normal emissivity of the standard object, monitored object, and standard radiator (SR). The main distinction of the proposed method from the known ones is that the limits or tolerances for the nature of reflection and the quantitative parameters of reflection of the monitored object make no difference. The obtained analytical expression is an equation of the non-contact method of measuring the surface temperature of the monitored object, which can be applied for any spectral range of operation of the OES. A metrological analysis of the proposed method is made using a monochromatic optoelectronic system working at wavelengths of 0.65, 2.0, 5.0, 14.0, and 50.0 μm for the temperature of the monitored object, T , equals to 400, 700, and 1000 K. Based on the analysis of the results the requirement for the implementation of the proposed method of measuring the surface temperature has been formulated, which says that the choice of an optoelectronic system for measuring the surface temperature of objects should be preceded by a methodological and metrological analysis of the optico-physical properties of the monitored object, the surrounding background, and the OES itself.

Keywords: pyrometry, non-contact/contactless method, measurement, temperature, mathematical model, monitored object, standard object, standard radiator, methodical and metrological analysis, monochromatic mode, optoelectronic system, background light.

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА

В.К. Битюков[@],
В.И. Нефедов,
Д.С. Симачков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: bitukov@mirea.ru

Предложен бесконтактный метод измерения температуры поверхности объекта с использованием эталонного излучателя и эталонного объекта, имеющего тождественные с контролируемым объектом оптико-физические свойства. В поле зрения оптико-электронной системы (ОЭС) планарно с контролируемым объектом установлены эталонный объект, температуру которого регулируют и измеряют, и эталонный излучатель, нормальная спектральная излучательная способность которого и температура известны. Причем ОЭС имеет три фиксированных положения, при которых она регистрирует нормальное излучение эталонного объекта, контролируемого объекта и эталонного излучателя. Принципиальное отличие предложенного метода от известных состоит в том, что на характер отражения и количественные параметры отражения контролируемого объекта не накладываются ограничения и не принимаются допущения. Получено аналитическое выражение, являющееся уравнением бесконтактного метода измерения температуры поверхности контролируемого объекта, и применимо для любого спектрального диапазона работы ОЭС. Выполнен метрологический анализ предложенного метода при использовании монохроматической ОЭС, работающей на длинах волн, равных 0.65, 2.0, 5.0, 14.0 и 50.0 мкм; температура T контролируемого объекта составляла 400, 700 и 1000 К. Анализ результатов позволил сформулировать требование к реализации предложенного метода измерения температуры поверхности, состоящее в том, что выбору оптико-электронной системы для измерения температуры поверхности объектов должен предшествовать методический и метрологический анализ оптико-физических свойств объекта контроля, окружающего его фона и самой ОЭС.

Ключевые слова: пирометрия, бесконтактный метод, измерение, температура, математическая модель, объект контроля, эталонный объект, излучатель, методический и метрологический анализ, монохроматический режим, оптико-электронная система, фоновая засветка.

Introduction

One of the current trends of scientific achievements application in technological processes is using non-contact methods (procedures) and techniques of monitoring the temperature state of objects at all stages of their life cycle and determining the physical properties of materials [1–4]. These procedures are associated with the non-contact measurement of temperature, T , of the surface of related objects, which is the main information parameter.

It should be noted that the implementation of pyrometric methods of temperature measurement is far from being a trivial task. It is the multiparameter description of electromagnetic energy radiated by the object that complicates the building of a physical model of the temperature measurement procedure and its mathematical description [1, 4, 5].

The physical complexity of non-contact methods (procedures) of measuring the temperature of an object is caused by the fact that the intrinsic thermal radiation is characterized not only by temperature, but also by spectral and temperature dependences of the normal emissivity ε_{λ_n} of the surface of the monitored object, by the state of the surface, and other factors. (Here and further λ is the wavelength of electromagnetic radiation; the index λ indicates spectral dependence of the corresponding parameter, and the index n indicates emissivity propagation along normal towards the surface of a monitored object).

It is worth noting that there is a wide range of semi-transparent materials often referred to as partially transparent materials for thermal radiation, which in certain regions of thermal radiation spectrum have a small absorption coefficient and can pass radiation falling upon them, or have intrinsic radiation, over long distances. These materials include almost all dielectrics and semiconductors: oxides, fluorides, chlorides, selenides, tellurides, germanium, silicon, gallium arsenide, indium antimonide, as well as most of organic substances. Non-contact temperature measurement of objects made of such materials requires specific methodological and technical support. So, we will not consider this issue here [6, 7].

The mathematical complexity of non-contact methods of temperature measurement is explained by the essential nonlinearity of the dependence of the monochromatic radiant flux density on the wavelength and temperature, which is defined by the Planck radiation law.

A non-contact measurement method

The optoelectronic systems available on the market of instruments and devices are not well fit to the quantitative measurement of the surface temperature of an object, in terms of both the optical-physical properties of the material from which the monitored object is made, and the background light, the optical-physical properties of an OES and the medium between the monitored object and the OES [8]. Thus, the methodological support of pyrometric and thermal imaging systems is a topical issue today.

The total thermal radiation of the object, the emissivity of which differs from “one”, consists of its intrinsic radiation and the radiation reflected by the object, depending on the optico-physical parameters of the monitored object, the surrounding background and the medium between the object and the optoelectronic system of temperature measurement.

One of the main factors influencing the metrological parameters of the results of measuring the surface temperature of the monitored object is its background light [9–15]. It is noteworthy that the background light sometimes makes it difficult to obtain reliable information [14, 15].

Based on the analysis of physical processes of the non-contact procedure of measuring the object temperature, T , several ways of reducing radiation effect of the background light have been formulated. They are:

1. The surface radiation reflected by the object is reduced. (This can be achieved either by covering the object with a coating having a reflection coefficient close to “zero” or by choosing such spectral range of the optoelectronic system, within which the reflection coefficient of the object is small.)
2. The background radiation is reduced. (This can be achieved when an object is placed in a chamber, the inner surface of which is coated, for example, by gold, which provides background radiation not exceeding 0.05 in a wide spectral range.)

3. The background temperature is lowered. (This can be realized in practice, for example, by putting the object inside a chamber, the cooling of which can be arranged.)

4. The measuring (reduction, compensation) of the background radiant flux reflected from the object and its further subtraction from the total radiation flux.

The first three approaches are rather well studied. And the fourth one will be analyzed here. To this end a method of measuring the surface temperature of a monitored object using a standard radiator is proposed in [16].

A perfect blackbody model is commonly taken as an SR [17, 18]. As a standard object it is suggested [16] that an additional object be taken, which has optico-physical and thermophysical properties identical with the monitored object. Provided the temperature measurement procedure is geometrically correct, that is, the monitored object, the standard object and the OES are properly located, the conditions of radiation and reflection of energy of the objects will be the same.

Fig. 1 shows a scheme of non-contact method of measurement of the surface temperature T of Monitored Object 2, the normal spectral emissivity ε_{λ_n} of the surface of which is known.

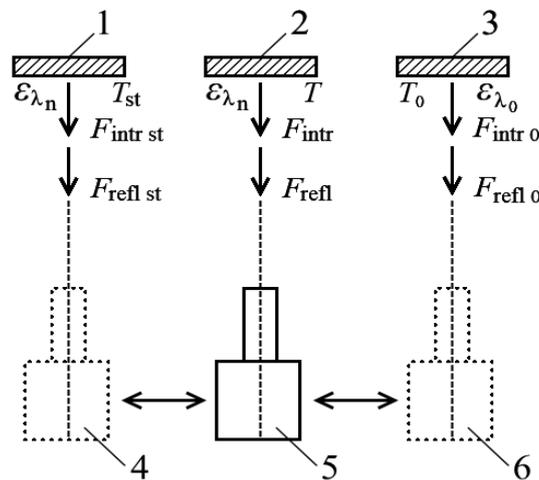


Fig. 1. The scheme of a non-contact method of measuring the surface temperature of an object using a standard radiator and a standard object.

In the field of view of OES 5, co-planarly with Monitored Object 2, is placed Standard Object 1, the temperature of which T_{st} is regulated and measured, as well as Standard Radiator 3 with the known normal spectral emissivity ε_{λ_0} and temperature T_0 . The OES has three set positions 4, 5 and 6, at which it registers the normal emissivity of the standard object, monitored object and SR.

The total integral radiation flux F_{Σ} produced by the monitored object is a sum of the intrinsic radiation flux F_{intr} and the reflected radiation flux F_{refl} , which can be written using the Planck law as the following expression:

$$F_{\Sigma} = F_{intr} + F_{refl} = \int_0^{+\infty} \frac{\varepsilon_{\lambda_n} \cdot C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} d\lambda + F_{refl}, \quad (1)$$

where $C_1 = 3.7413 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, and $C_2 = 1.4388 \text{ m} \cdot \text{K}$ – the first and second Planck constants.

In order to register radiation flux, an optoelectronic system is used. Usually it is either a pyrometer or a thermal imaging system with a related radiation receiver and data processing system.

The output signal of the OES is determined not only by the parameters accounted for in expression (1), but also by other parameters: K – OES design parameter, $\Delta\lambda$ – spectral range (from λ_1 to λ_2) of the OES operation, S_λ – the volt-watt sensitivity of the OES radiation receiver, τ_λ – transmissivity of the OES and the medium between the object and the OES [19, 20].

The total integral flux of the standard object $F_{\Sigma st}$ is also a sum of the intrinsic flux $F_{intr st}$ and the reflected flux $F_{refl st}$, i.e.

$$F_{\Sigma st} = F_{intr st} + F_{refl st} = \int_0^{+\infty} \frac{\varepsilon_{\lambda n} \cdot C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T_{st}) - 1)} d\lambda + F_{refl st} \quad (2)$$

Since the monitored object and the standard object have identical optico-physical and thermophysical properties, the radiation flux reflected by them are equal, that is, $F_{refl} = F_{refl st}$.

When the temperature of the standard object T_{st} decreases (it is regulated and measured), a quantitative structure change of the radiation flux $F_{\Sigma st}$ occurs. Specifically, the intrinsic radiation flux decreases compared with the reflected radiation flux. To make the analysis simpler, we can assume that the reflected characteristics of objects do not depend on their temperature. The temperature of the standard object T_{st} is lowered up to the temperature, at which the intrinsic radiation flux, $F_{intr st}$ is much less than the reflected radiation flux $F_{refl st}$, that is, $F_{intr st} \ll F_{refl st}$.

The expression (2) takes the following form:

$$F_{\Sigma st} = F_{refl st} \quad (3)$$

Then the difference between the flows F_Σ and $F_{\Sigma st}$, calculated by formulas (1) and (3), forms the output signal of the OES, ΔU , which is defined by this formula:

$$\Delta U = K \cdot \int_{(\Delta\lambda)} \frac{\varepsilon_{\lambda n} \cdot C_1 \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} d\lambda \quad (4)$$

The total radiation flux of the standard radiator, $F_{\Sigma 0}$, is the sum of the intrinsic radiation flux $F_{intr 0}$ and the reflected radiation flux $F_{refl 0}$. As a rule, the spectral normal emissivity $\varepsilon_{\lambda 0}$ of the SR is close to “one” (actually no less than 0.98). This allows to determine the output signal of the OES, U_0 , without an essential error, by the following expression:

$$U_0 = K \cdot \int_{(\Delta\lambda)} \frac{\varepsilon_{\lambda 0} \cdot C_1 \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T_0) - 1)} d\lambda \quad (5)$$

The ratio of the output signals of the OES, ΔU and U_0 , can be written as follows:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\int_{(\Delta\lambda)} \frac{\varepsilon_{\lambda_n} \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} d\lambda}{\int_{(\Delta\lambda)} \frac{\varepsilon_{\lambda_0} \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T_0) - 1)} d\lambda} \quad (6)$$

The obtained expression (6) is an equation for a non-contact method for the determination of the surface temperature of the monitored object, T .

In the monochromatic approximation, equation (6) can be used to obtain an analytical expression for determining the surface temperature of the object under test.

In the monochromatic approximation from equation (6) the analytical expression is derived, determining the temperature of the monitored object surface.

$$T = \frac{C_2}{\lambda \cdot \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}} \cdot \frac{e^{\frac{C_2}{\lambda T_0}} - 1}{\Delta U / U_0} \right)} \quad (7)$$

The proof of correctness of obtained equation (7) is that at $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}} = \frac{\Delta U}{U_0}$ the equality $T = T_0$ is fulfilled, that is, the temperature of the monitored object and the temperature of the standard radiator are equal. In terms of mathematics, this follows from equation (7). In terms of physics, it shows that no background light is available and ΔU is in fact an output signal of the OES, which is proportional to the intrinsic radiation flux of the monitored object.

Metrological analysis

A metrological analysis of the proposed method has been carried out using the small perturbations method [19, 20] for the determination of the temperature of an object, implementing monochromatic OES, with $\lambda = 0.65, 2.0, 5.0, 14.0, \text{ and } 50.0 \mu\text{m}$ for the following parameters: the temperature T of the monitored object is equal to 400 K, 700 K, 1000 K; $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}} = 0.1, 0.5, 0.9$, and 1.0; $\frac{\Delta U}{U_0} = 0.1, 0.5, 0.9, 1.0$, and 1.5; the absolute error $\Delta\lambda$ of the wavelength of the OES, λ , equals to 0.01 μm for $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$; and 0.1 μm for the rest of the wavelengths λ ; the relative errors $\delta T_0 = 3\%$, $\delta \frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}} = 5\%$ and $\delta \frac{\Delta U}{U_0} = 2\%$ for the determination of T_0 , $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}}$ and $\frac{\Delta U}{U_0}$, respectively.

The selection of the temperature T_0 of the standard radiator is better to be made proceeding from the condition that $\frac{\Delta U}{U_0} \sim 1$, at which the signals ΔU and U_0 are commensurable. In this case, the distortions in the receiving and amplifying paths of the OES signals, ΔU and U_0 , will be identical. The use of the scale of ratios significantly reduces the systematic errors in determining the signals ΔU and U_0 .

The calculations, for which the results are presented in the table, have been obtained for the given parameters and the ratio of OES output signals $\frac{\Delta U}{U_0} = 1$.

The impact of inaccuracy of parameters knowledge on the determination of the error of temperature

$\lambda, \mu\text{m}$	T, K	$\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}}$	T_0, K	$\delta T_{\lambda}, \%$ $\Delta\lambda = 0.01$ or $\Delta\lambda = 0.1, \mu\text{m}$	$\delta T_{T_0}, \%$ $\delta T_0 = 3\%$	$\delta T_{\varepsilon}, \%$ $\delta(\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}}) = 5\%$	$\delta T_U, \%$ $\delta(\frac{\Delta U}{U_0}) = 2\%$	$\theta, \%$
0.65	400	0.1	384	-1.52	2.88	0.08	-0.03	3.6
		0.5	395	-1.52	2.96	0.09	-0.04	3.7
		0.9	399	-1.52	2.99	0.09	-0.04	3.7
		1.0	400	-1.52	3.00	0.09	-0.04	3.7
	700	0.1	652	-1.52	2.79	0.14	-0.06	3.5
		0.5	685	-1.52	2.93	0.15	-0.06	3.6
		0.9	698	-1.52	2.99	0.15	-0.06	3.7
		1.0	700	-1.52	3.00	0.15	-0.06	3.7
	1000	0.1	906	-1.52	2.71	0.20	-0.08	3.4
		0.5	970	-1.52	2.91	0.21	-0.09	3.6
		0.9	995	-1.52	2.99	0.22	-0.09	3.7
		1.0	1000	-1.52	3.00	0.22	-0.09	3.7
2.0	400	0.1	355	-4.76	2.65	0.24	-0.10	6.0
		0.5	385	-4.76	2.89	0.26	-0.11	6.1
		0.9	398	-4.76	2.98	0.27	-0.11	6.2
		1.0	400	-4.76	3.00	0.27	-0.11	6.2
	700	0.1	572	-4.76	2.44	0.39	-0.16	5.9
		0.5	656	-4.76	2.81	0.45	-0.18	6.1
		0.9	693	-4.76	2.97	0.47	-0.19	6.2
		1.0	700	-4.76	3.00	0.48	-0.19	6.2
	1000	0.1	758	-4.76	2.26	0.52	-0.21	5.8
		0.5	912	-4.76	2.73	0.62	-0.25	6.1
		0.9	986	-4.76	2.96	0.67	-0.27	6.2
		1.0	1000	-4.76	3.00	0.68	-0.27	6.2
5.0	400	0.1	303	-1.96	2.26	0.52	-0.21	3.4
		0.5	365	-1.96	2.73	0.62	-0.25	3.8
		0.9	394	-1.96	2.96	0.67	-0.27	4.0
		1.0	400	-1.96	3.00	0.68	-0.27	4.0
	700	0.1	450	-1.96	1.94	0.77	-0.31	3.2
		0.5	600	-1.96	2.58	1.02	-0.41	3.6
		0.9	683	-1.96	2.93	1.15	-0.46	4.1
		1.0	700	-1.96	3.00	1.18	-0.47	4.2
	1000	0.1	561	-1.96	1.76	0.95	-0.38	3.1
		0.5	812	-1.96	2.50	1.35	-0.54	3.8
		0.9	967	-1.96	2.91	1.58	-0.63	4.3
		1.0	1000	-1.96	3.00	1.62	-0.65	4.4

End of the table

$\lambda, \mu\text{m}$	T, K	$\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}}$	T_0, K	$\delta T_{\lambda}, \%$ $\Delta\lambda = 0.01$ or $\Delta\lambda = 0.1, \mu\text{m}$	$\delta T_{T_0}, \%$ $\delta T_0 = 3\%$	$\delta T_{\varepsilon}, \%$ $\delta(\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}}) = 5\%$	$\delta T_U, \%$ $\delta(\frac{\Delta U}{U_0}) = 2\%$	$\theta, \%$
14.0	400	0.1	214	-0.71	1.71	1.02	-0.41	2.4
		0.5	319	-0.71	2.48	1.47	-0.59	3.3
		0.9	385	-0.71	2.91	1.73	-0.69	3.9
		1.0	400	-0.71	3.00	1.78	-0.71	4.0
	700	0.1	290	-0.71	1.56	1.36	-0.54	2.5
		0.5	504	-0.71	2.43	2.12	-0.84	3.8
		0.9	663	-0.7	2.91	2.53	-1.00	4.5
		1.0	700	-0.71	3.00	2.61	-1.03	4.6
	1000	0.1	349	-0.7	1.54	1.59	-0.63	2.7
		0.5	674	-0.71	2.46	2.55	-1.01	4.1
		0.9	937	-0.71	2.92	3.03	-1.19	4.9
		1.0	1000	-0.71	3.00	3.12	-1.23	5.0
50.0	400	0.1	118	-0.20	1.56	1.85	-0.73	2.8
		0.5	254	-0.20	2.51	2.98	-1.17	4.5
		0.9	371	-0.20	2.93	3.47	-1.37	5.2
		1.0	400	-0.20	3.00	3.56	-1.40	5.4
	700	0.1	159	-0.20	1.69	2.30	-0.91	3.3
		0.5	410	-0.20	2.63	3.59	-1.41	5.1
		0.9	643	-0.20	2.95	4.03	-1.58	5.8
		1.0	700	-0.20	3.00	4.10	-1.61	5.9
	1000	0.1	196	-0.20	1.81	2.61	-1.03	3.7
		0.5	563	-0.20	2.70	3.91	-1.54	5.5
		0.9	913	-0.20	2.96	4.29	-1.68	6.0
		1.0	1000	-0.20	3.00	4.34	-1.70	6.11

The calculated results showing the effect of the errors of knowledge of the initial parameters on the error of determining the temperature T are presented as rather small relative errors δT_{λ} , δT_{T_0} , δT_{ε} , and δT_U . The selected values of errors almost comply with those obtained using modern measuring instruments. Therefore, the results presented in the table can be considered as evaluation data. Since these functions are almost linear for small variations of arguments, the obtained results can be used, with appropriate weighting factors, in real measurement conditions.

The total systematic error θ of determination of the surface temperature of an object with a confidence probability of 0.95 is calculated by the formula $\theta = 1,1 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (\delta T_i)^2}$, %, where m is the number of varying parameters ($m = 4$) [21].

While analyzing the obtained results, certain facts have been established.

The relative errors $\delta\lambda$ of knowledge of the wavelength λ of the OES operation are almost equal to the relative errors δT_{λ} of determining the object temperature T . For example, the relative errors $\delta\lambda$ equaling 1.5, 5.0, 2.0, 0.7, and 0.2% for the wavelength λ equaling 0.65, 2.0, 5.0, 14.0,

and 50.0 μm give relative errors δT_λ of determining the object temperature T equaling 1.5, 4.8, 2.0, 0.7, and 0.2%, respectively.

The similar case is with the effect of the inaccuracy of knowledge of the standard radiator temperature T_0 on the error of determination of the monitored object temperature T . Moreover, at $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}} = \frac{\Delta U}{U_0}$, the relative errors δT_0 и δT_{T_0} are equal. For the rest modes of determining the temperature of an object, the difference between the errors of δT_0 and δT_{T_0} does not exceed several percent. For example, at $\frac{\Delta U}{U_0} = 1$ and $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}} = 0.9$, a three-percent relative error in determining the temperature T_0 of the standard radiator gives an error of δT_{T_0} equaling $\sim 2.9\%$, which does not depend on the level of the measured temperature T . This means that δT_0 and δT_{T_0} are nearly equal.

The influence of the inaccuracy of knowledge of the ratio of emissivity $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}}$ of the monitored object and the standard radiator on the error in determining the temperature T of the monitored object significantly depends on the wavelengths of the OES operation. For example, at $T = 700$ K, $\frac{\Delta U}{U_0}$ and $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}} = 0.9$, a five-percent relative error in the determination of $\frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{\lambda_0}}$ results in δT_ε equaling 0.15, 0.47, 1.15, 2.53 and 4.03% for wavelengths λ equaling 0.65, 2.0, 5.0, 14.0, and 50.0 μm, respectively.

In the implementation of the proposed method of temperature measurement an important parameter is the ratio q of the registered by the OES intrinsic radiation flux $\Phi_{\text{intr st}}$ of the monitored object, the coefficient of reflection of which is R_λ , and the background radiation flux $\Phi_{\text{refl st}}$ reflected by the monitored object, the temperature of which is T_b , and the emission is $\varepsilon_{b_\lambda}^*$ [22]. The expression for q can be written in the following form:

$$q = \frac{\Phi_{\text{intr st}}}{\Phi_{\text{refl st}}}$$

or

$$q = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda_n} \frac{C_1 \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\text{st}}}\right) - 1 \right)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot \varepsilon_{b_\lambda}^* \frac{C_1 \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_b}\right) - 1 \right)} d\lambda} \quad (8)$$

For monochromatic mode of the OES, the expression (8) takes this form:

$$q = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda_n} \frac{C_1 \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{st}}\right) - 1 \right)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} \cdot \varepsilon_{b_{\lambda}}^* \frac{C_1 \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_b}\right) - 1 \right)} d\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{b_{\lambda}}^* \cdot R_{\lambda}} \cdot \frac{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_b}\right) - 1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{st}}\right) - 1} \quad (9)$$

Assuming that $R_{\lambda} = 1 - \varepsilon_{\lambda_n}$, the obtained expression for q can be written as follows:

$$q = \frac{\varepsilon_{\lambda_n}}{\varepsilon_{b_{\lambda}}^* \cdot (1 - \varepsilon_{\lambda_n})} \cdot \frac{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_b}\right) - 1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{st}}\right) - 1} \quad (10)$$

The calculation of the function $q=f(T_{st})$ made by formula (10) at $T_b=300$ K is shown in Fig. 2.

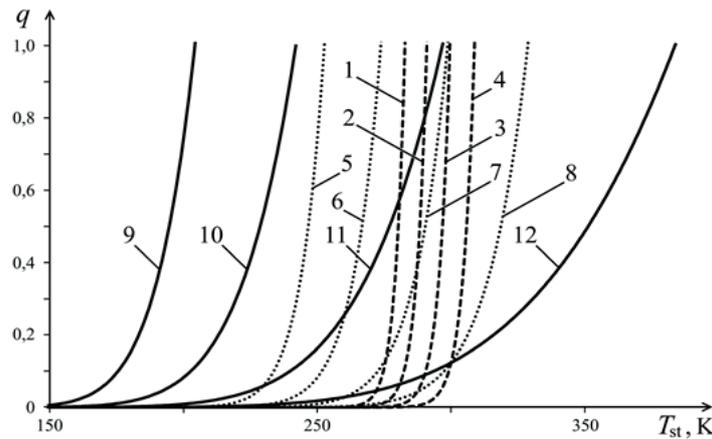


Fig. 2. The dependence of the ratio of the registered by the OES intrinsic radiation flux of the object and surrounding background radiation flux reflected by it on the temperature of the standard object T_{st} :

$\lambda = 0.65 \mu\text{m}$: 1 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$; 2 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$; $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.5$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$;

3 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.5$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$; $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$; 4 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$

$\lambda = 2.0 \mu\text{m}$: 5 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$; 6 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$ and $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.5$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$;

7 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.5$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$ and $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$; 8 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$

$\lambda = 5.0 \mu\text{m}$: 9 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$; 10 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$ and $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.5$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$;

11 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.5$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$ and $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.1$; 12 – $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $\varepsilon_{b_{\lambda}}^* = 0.9$.

At least two conclusions can be made from Fig. 2.

Conclusion One. The less the background radiation, the deeper cooling of the object is required. For example, at $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $q = 0.05$ for $\varepsilon_{b_{\lambda}}^*$ equaling 0.1 and 0.9, the object has

to be cooled to temperatures of 169 K and 194 K, respectively. And at $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $q = 0.05$ for $\varepsilon_{b_\lambda}^*$ equaling 0.1 and 0.9, the object has to be cooled to temperatures of 227 K and 274 K, respectively.

Conclusion Two. The more radiation of the object, the greater the steepness of the curve $S = \frac{dq}{dT_{st}}$ of the function $q=f(T_{st})$. For example, at $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.9$ and $\varepsilon_{b_\lambda}^*$ equaling 0.1 and 0.9, the steepness of the curve S is 0.041 1/K and 0.029 1/K, respectively. And at $\varepsilon_{\lambda_n} = 0.1$ and $\varepsilon_{b_\lambda}^*$ equaling 0.9, the steepness of curve S is 0.020 1/K and 0.013 1/K, respectively.

Findings

A mathematical model of the method is proposed for determining the surface temperature of an object using a standard radiator and a standard object which has optico-physical properties identical with the monitored object. The proposed method differs from the known ones in that the nature of reflection and qualitative parameters of reflection from the monitored object do not depend on any limits or tolerances.

Applying the small perturbations method, a metrological analysis of the proposed method of determining the surface temperature for monochromatic optoelectronic systems has been made.

Optoelectronic instrument making has been rapidly developing as a knowledge-intensive manufacturing area [23–26]. And in order to choose a certain OES to be used for measuring the surface temperature of objects, a methodological and metrological analysis of the optico-physical properties of the monitored object, its surrounding background and the OES itself has to be made.

The results presented in this article have been obtained within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and High Education of Russian Federation (Assignment No. 8.5577.2017/8.9) for the implementation of the project on the subject “Study of noise characteristics and pulsations of microcircuits of mobile sources of secondary power supply”.

References:

1. Bityukov V.K. The diagnosing of radio electronic equipment by the intrinsic infrared radiation. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems). 1991; 2: 227-235. (in Russ.)
2. Underwood R., Gardiner T., Finlayson M., Bell S., de Podesta M. An improved non-contact thermometer and hygrometer with rapid response. *Metrology*. 2017; 54(1): S9-S15.
3. Abad B., Borca-Tasciuc D.-A., Martin-Gonzalez M.S. Non-contact methods for thermal properties measurement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 76(September): 1348-1370.
4. Ionov A.B. Metrological problems of pyrometry: An analysis and the prospects for solving them. *Metrologiya* (Measurement Techniques). 2013; 56(6): 658-663 (in Russ.).
5. Bityukov V.K., Khudak Yu.I., Gusein-zade N.G. Analytical derivation of the Stefan-Boltzmann law for integral radiance from Planck’s law for spectral radiance. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2018; 45(2): 46-50.
6. Bityukov V.K., Petrov V.A. Noncontact temperature measurement of dielectrics and semiconductors. Part I. *Russian Microelectronics*. 2004; 33(6): 329-341.

7. Tsvetkov V.B., Seregin V.F., Veber A.A., Pyrkov Yu.N., Rusanov S.Ya. Method of the study of optical properties of opaque and translucent materials in a temperature range up to 1600 °C. *Trudy instituta obshchey fiziki im. A.M. Prokhorova* (Proceedings of the A.M. Prokhorov Institute of General Physics). 2014; 70: 47-58. (in Russ.)
8. Frunze A.V. Metrological problems in modern energy pyrometry. *Metrologiya* (Measurement Techniques). 2018; 1: 42-47.
9. Kovaleva V.V., Averianova D.E. Analysis of background radiation on pyrometer operation. *Interexpo Geo-Siberia*. 2011; 5(1): 176-178. (in Russ.)
10. Chernysheva N.S., Ionov B.P., Ionov A.B. Experimental setup for studying the effect of dustiness in case of con-tact temperature measurements. *Omskiy nauchnyy vestnik* (Omsk Scientific Bulletin). 2018; 2(158): 110-115. (in Russ.)
11. Butkovsky A.G., Poskachev A.A., Chubarov E.P. Methods and facilities for automatic temperature measurements through natural radiation of the object with due regard for radiation variations. *Avtomatika i telemekhanika* (Automation and Remote Control). 1975; 4: 153-163. (in Russ.)
12. Tymkul V.M., Shelkovoy D.S. Employment of three-spectral pyrometer under the influence of thermal background radiation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* (Russian Journal of Instrument Engineering). 2012; 55(9): 67-73. (in Russ.)
13. Firago V.A. Determination of the surface temperature of metals in the area of exposure to powerful laser radiation. Collected articles: Quantum Electronics. *Proceed. of the XI International Scientific and Technical Conference*. 2017. P. 180-183.
14. Karachinov V.A., Toritsin S.B., Karachinov D.V. Investigation of the characteristics of a television pyrometer with a built-in temperature calibrator. *Measurement Techniques*. 2008. 51(7): 762-766.
15. Sidoryuk O.E. Pyrometry in conditions of intense background radiation. *Pribory i tekhnika eksperimenta* (Instruments and Experimental Techniques). 1995; 38(4): 201-204. (in Russ.)
16. Bityukov V.K. The technique for multi-channel signal registration, and the device for its implementation: Pat. 1804592 Russian Federation. № 4915206/10, 02/28/1991; publ. 03/23/1993. (in Russ.)
17. Bityukov V.K., Gorbunov R.A., Maryin S.V., Simachkov D.S., Frunze A.V. Metrological assurance of national pyrometry. *Uchebnyi experiment v obrazovanii* (Training Experiment in Education). 2018; 1 (85): 53-76. (in Russ.)
18. Smurov I.Yu., Dubenskaya M.A., Zhirnov I.V., Teleshevsky V.I. Determination of the true temperature during selective laser melting of metal powders based on measurements with an infrared camera. *Measurement Techniques*. 2016; 59(9): 971-974.
19. Bityukov V.K., Zhukov A.N., Simachkov D.S. A method of contactless measurement of surface temperature of radio electronic objects. *Rossiyskiy technologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(4): 21-32. (in Russ.)
20. Bityukov V.K., Simachkov D.S. Contactless measurement of the surface temperature of objects from their infrared radiation. *Measurement Techniques*. 2018; 60(10): 1038-1045.
21. Borisov Yu.I., Nefedov V.I., Bityukov V.K., Sigov A.S. Metrology, Standardization and Certification. Moscow: Forum Publ., 2009. 338 p. (in Russ.)
22. Bityukov V.K. On one method of accounting for background radiation in contactless

thermal monitoring. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* (Russian Journal of Instrument Engineering). 1991; 34(11): 90-96. (in Russ.)

23. Belozеров А.Ф., Омелаев А.И., Филиппов В.Л. Modern directions in the use of IR radiometers and thermal viewers in scientific research and technology. *Opticheskii zhurnal* (Journal of Optical Technology). 1998; 65(6): 16-21. (in Russ.)

24. Frunze A.V. About new ways of pyrometry development. *Pribory* (Instruments). 2012; 7(145): 54-59. (in Russ.)

25. Frunze A.A., Frunze A.V. On inaccuracies of measurements of real objects temperature by energy pyrometers. *Datchiki i sistemy* (Sensors and Systems). 2014; 3(178): 41-43. (in Russ.)

26. Frunze A.V. Metrological problems of modern spectral pyrometry. *Metrologiya* (Measurement Techniques). 2018; 2: 35-48.

About the authors:

Vladimir K. Bityukov, D.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Telecommunications and Radio Engineering, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Viktor I. Nefedov, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Telecommunications and Radio Engineering, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Denis S. Simachkov, Senior Lecturer of the Chair of Telecommunications and Radio Engineering, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Сведения об авторах:

Битюков Владимир Ксенофонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникаций и радиотехники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Нефедов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникаций и радиотехники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Симачков Денис Сергеевич, старший преподаватель кафедры телекоммуникаций и радиотехники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

For citation: Bityukov V.K., Nefedov V.I., Simachkov D.S. Non-contact method of measuring surface temperature. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 5-17. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-5-17

Для цитирования: Битюков В.К., Нефедов В.И., Симачков Д.С. Бесконтактный метод измерения температуры поверхности объекта // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 5–17. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-5-17

**ВЛИЯНИЕ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОЙ ПОМЕХИ
НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КОРРЕЛЯЦИОННОГО
ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ
ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

**Г.В. Куликов[@],
Нгуен Ван Зунг,
До Чунг Тиен**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru*

Энергетические и спектральные преимущества сигналов с фазовой манипуляцией предопределили их широкое применение в современных цифровых навигационных, связных и телевизионных системах. Использование таких сигналов заложено в коммуникационных стандартах DVB-S, DVB-S2/S2X, ГЛОНАСС, CDMA, WiFi IEEE 802.11 и др. Для повышения пропускной способности радиоканалов применяют многопозиционную фазовую манипуляцию (М-ФМ), что способствует увеличению количества возможных фазовых состояний сигнала и, как следствие, информационной емкости канального символа. Однако такое увеличение существенно влияет на помехоустойчивость приема сигналов М-ФМ. В статье методами статистической радиотехники проанализирована помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии шумовой и фазоманипулированной помехи. Проведены расчеты вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум, интенсивности помехи, относительной скорости передачи помехи и от ее расстройки относительно центральной частоты спектра полезного сигнала. Показано, что сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией весьма значительно подвержены влиянию фазоманипулированной помехи. С увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. Степень снижения помехоустойчивости приема зависит от величины относительной скорости передачи помехи и ее интенсивности. Поражающее действие фазоманипулированной помехи наиболее заметно проявляется при ее попадании в главный лепесток спектра сигнала. По мере увеличения относительной скорости передачи помеха становится более широкополосной и псевдошумовой, и ее влияние сказывается даже при весьма больших частотных расстройках, несколько снижаясь в области главного лепестка спектра сигнала. Наблюдаемое снижение представляется закономерным, так как анализируемый алгоритм приема сигналов М-ФМ оптимален к воздействию именно шумовой помехи.

Ключевые слова: вероятность битовой ошибки, фазоманипулированная помеха, многопозиционная фазовая манипуляция, помехоустойчивость.

EFFECT OF PHASE-SHIFT INTERFERENCE ON THE NOISE IMMUNITY OF CORRELATION DEMODULATOR OF SIGNALS WITH MULTIPLE PHASE SHIFT KEYING

**G.V. Kulikov@,
Nguyen Van Dung,
Do Trung Tien**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: kulikov@mirea.ru

The energy and spectral advantages of signals with phase shift keying predetermined their widespread use in modern digital navigation, communications and television systems. The use of such signals is the base of communication standards of DVB-S, DVB-S2 / S2X, GLONASS, CDMA, WiFi IEEE 802.11 and others. To increase the capacity of radio channels, multiple phase shift keying (MPSK) is applied. This increases the number of possible phase states of the signal and, thus, the information capacity of the channel symbol. However, such an increase greatly affects the noise immunity of MPSK signal reception. In the article the noise immunity of receiving signals with multiple phase shift keying in the presence of noise and phase-shift interference is analyzed by the methods of statistical radio engineering. The dependencies of bit error probability on the signal-to-noise ratio, on the interference intensity, on the relative transmission speed of the interference, and on its detuning relative to the center frequency of the spectrum of the useful signal are calculated. It is shown that signals with multiple phase shift keying are very strongly influenced by phase-shift interference, and this influence increases with increasing signal positionality. The degree of reduction of the noise immunity of the reception depends on the magnitude of the relative transmission rate of the interference and its intensity. The damaging effect of the phase-shift interference is most pronounced when it hits the main lobe of the signal spectrum. As the relative transmission rate increases, the interference becomes more broadband and pseudo-noise, and it affects even with very large frequency detuning somewhat decreasing in the region of the main lobe of the signal spectrum. This decrease seems natural, since the analyzed algorithm for receiving MPSK signals is optimal for the effects of noise interference.

Keywords: bit error rate, phase-shift interference, multiple phase-shift keying, noise immunity.

Введение

Энергетические и спектральные преимущества сигналов с фазовой манипуляцией предопределили их широкое применение в современных цифровых навигационных, связных и телевизионных системах. Использование таких сигналов заложено в коммуникационных стандартах DVB-S, DVB-S2/S2X, ГЛОНАСС, CDMA, WiFi IEEE 802.11 и др. Для повышения пропускной способности радиоканалов применяют многопозиционную фазовую манипуляцию (М-ФМ), увеличивая количество M возможных фазовых состояний сигнала и, тем самым, информационную емкость канального символа. Однако такое увеличение M сильно влияет на помехоустойчивость приема сигналов

М-ФМ. Характеристики помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ на фоне белого гауссовского шума хорошо изучены [1, 2]. Показано [1], что минимально достижимая вероятность ошибки при оптимальной когерентной обработке такого сигнала определяется выражением:

$$P_M = 2Q(\sqrt{2E_s / N_0} \sin \frac{\pi}{M}), \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt,$$

где E_s – энергия канального символа;

N_0 – спектральная плотность мощности шума.

В реальных радиосистемах передачи информации в канале связи, наряду с шумовой помехой, обычно присутствуют и другие виды помех, как непреднамеренных, так и специально организованных. Одной из часто встречающихся является фазоманипулированная помеха. Помехи такого типа могут возникать в результате работы в зоне приема дополнительной радиостанции, передающей дискретную информацию. Опасное влияние такой помехи на качество приема информации подтверждено рядом исследований [3–10].

Цель настоящей работы – оценка влияния фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией.

В самом общем виде сигнал М-ФМ на k -ом тактовом интервале длительности T_s можно записать следующим образом:

$$s_{k,i}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_c), \quad \varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, t \in ((k-1)T_s, kT_s], i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

где $A_0 = \sqrt{2E_s / T_s}$ – амплитуда сигнала;

ω_0 – несущая частота;

φ_c – начальное фазовое смещение сигнального созвездия сигнала, которое для простоты дальнейшего изложения и упрощения расчетов можно положить равным нулю.

Считаем, что на входе приемника присутствует реализация

$$x(t) = s_{k,i}(t) + s_{\Pi}(t) + n(t),$$

включающая в себя, кроме полезного сигнала (1), фазоманипулированную помеху $s_{\Pi}(t)$ и белый гауссовский шум $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 :

$$\langle n(t) \rangle = 0; \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1).$$

Одна посылка фазоманипулированной помехи длительностью T_{Π} может быть записана следующим образом:

$$s_{\Pi}(t) = \mu A_0 a_j \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\Pi})t + \varphi_{\Pi}], t \in ((j-1)T_{\Pi}, jT_{\Pi}], j = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где $a_j = \pm 1$ – случайный символ помехи;

$\Delta\omega_{\Pi}$ – расстройка помехи относительно центральной частоты спектра сигнала М-ФМ;

φ_{Π} – случайная начальная фаза помехи, равномерно распределенная на полуинтервале $(-\pi, +\pi]$.

На длительности T_s одного тактового интервала сигнала (рис. 1) в общем случае укладывается $N = T_s / T_{\Pi}$ тактовых интервалов помехи (2).

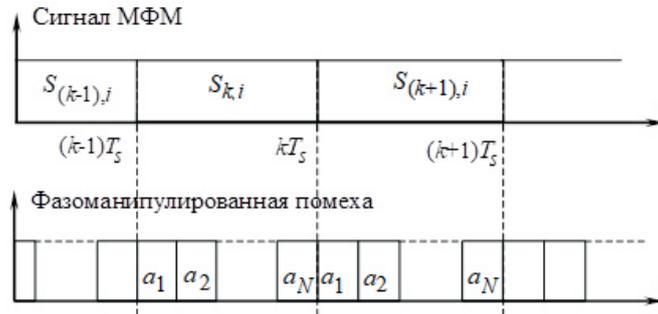


Рис. 1. Временные соотношения между полезным сигналом и фазоманипулированной помехой.

Результаты расчетов

Методика расчета вероятности битовой ошибки при приеме сигналов М-ФМ на фоне нефлуктуационной помехи с использованием статистических параметров распределений случайных процессов на выходах корреляторов приемника подробно изложена в [11, 12]. Здесь лишь упомянем, что при условии фиксации начальной фазы помехи φ_{Π} все распределения являются нормальными. Приведем результаты расчета этих параметров.

Среднее значение процесса на входе порогового устройства, соответствующего i -му интегратору, определяется следующим образом:

$$m_i = \frac{2E_s}{N_0} \left\{ (1 - \cos \varphi_i) - \frac{2\mu}{N} \sin \frac{\varphi_i}{2} \frac{\sin \Delta}{\Delta} \left[\cos(\varphi_{\Pi} - \frac{\varphi_i}{2}) \sum_{j=1}^N a_j \sin(2j-1)\Delta + \sin(\varphi_{\Pi} - \frac{\varphi_i}{2}) \sum_{j=1}^N a_j \cos(2j-1)\Delta \right] \right\},$$

а дисперсия:

$$D_i = \frac{4E_s}{N_0} (1 - \cos \varphi_i),$$

здесь использовано обозначение $\Delta = \frac{\Delta \omega_{\Pi} T_s}{2N}$.

Методика [11, 12] позволяет определить вероятности символьной и битовой ошибок, условные по фазе φ_{Π} и комбинациям $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_j, \dots, a_N\}$, перебором всех возможных сигнальных посылок М-ФМ с учетом симметричности сигнального созвездия:

$$P_{es}(\varphi_{\Pi}, \mathbf{a}) = 1 - \prod_{i=1}^{M-1} \left[1 - Q\left(\frac{m_i}{\sqrt{D_i}}\right) \right], \tag{3}$$

$$P_{eb}(\varphi_{\Pi}, \mathbf{a}) = P_{es}(\varphi_{\Pi}, \mathbf{a}) / \log_2 M.$$

Необходимо заметить, что вычисление вероятности битовой ошибки по формуле (3) справедливо при достаточно больших отношениях сигнал/шум и сигнал/помеха [1].

Для получения безусловной вероятности битовой ошибки необходимо провести усреднение величины $P_{eb}(\varphi_{\Pi}, \mathbf{a})$ по фазе $\varphi_{\Pi} \in (-\pi, \pi)$ и 2^N возможным сочетаниям помеховых символов \mathbf{a} :

$$P_{eb} = \frac{1}{2^N} \sum_{\mathbf{a}} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_{eb}(\varphi_{\Pi}, \mathbf{a}) d\varphi_{\Pi}$$

Вывести аналитическое выражение в этом случае не удастся, поэтому для получения окончательных результатов можно воспользоваться численным усреднением.

На рис. 2 показаны рассчитанные зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум $E_b/N_0 = E_s/(N_0 \log_2 M)$, пересчитанного на один бит информации, при разных интенсивностях фазоманипулированной помехи, $\Delta\omega_{\text{П}} = 0$, и двух значениях относительной скорости передачи помехи N . Сплошные кривые соответствуют $N = 2$, а пунктирные – $N = 5$.

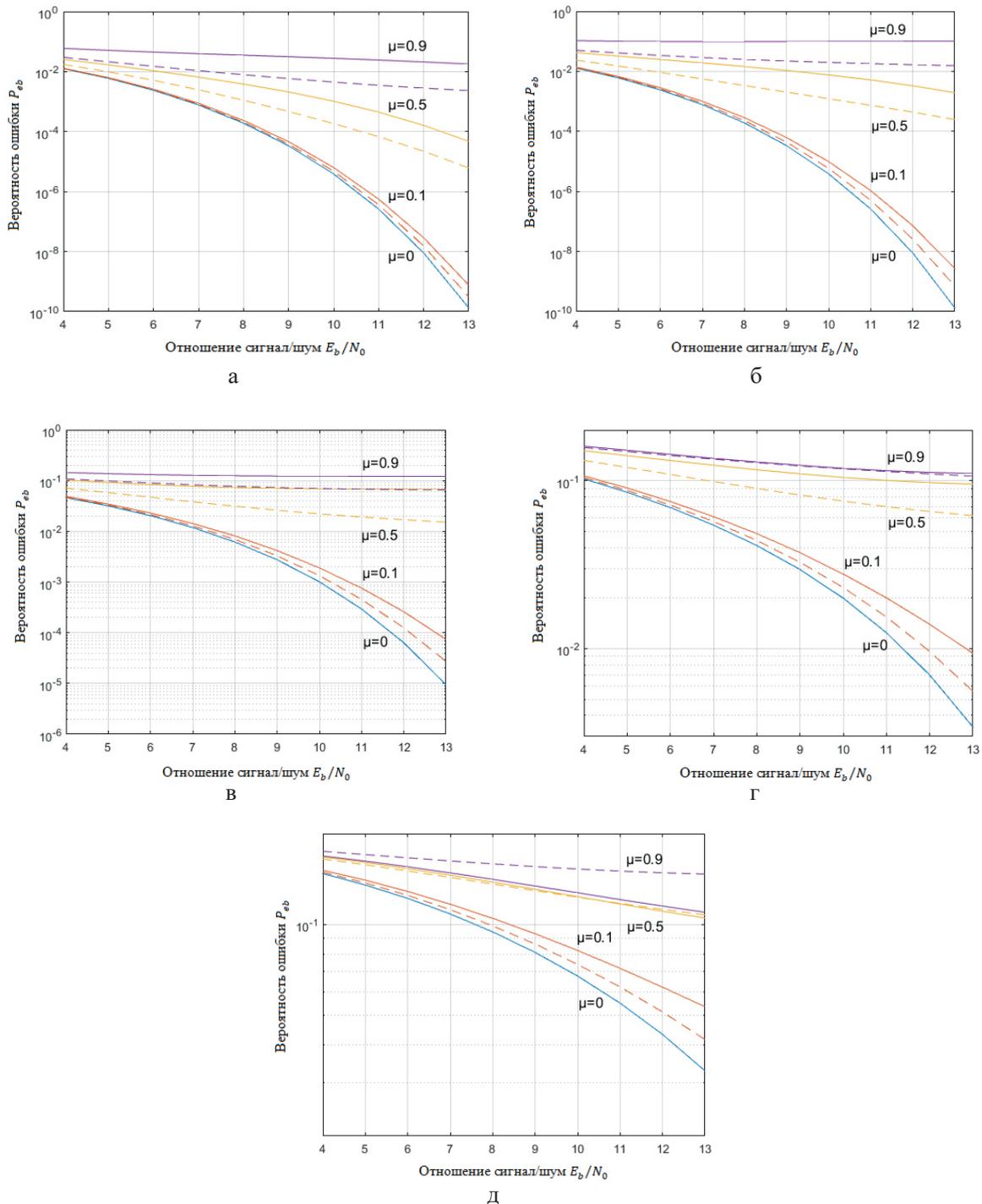


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при наличии фазоманипулированной помехи: а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

Видно (рис. 2), что наличие фазоманипулированной помехи может значительно снижать помехоустойчивость приема сигналов. Степень этого снижения зависит от величины N и интенсивности μ . Так, например, для $M = 8$ при $P_{eb} = 10^{-2}$: если для $\mu = 0.1$ энергетический проигрыш по сравнению со случаем только шумовой помехи составляет всего 0.5 дБ, то для $\mu = 0.5$ он превышает 7 дБ. Это подтверждается и графиком, приведенным на рис. 3. Результаты получены при значении $E_b / N_0 = 13$ дБ и $N = 2$ (сплошные линии), $N = 5$ (пунктирные линии). При увеличении μ от 0 до 1 вероятность ошибки увеличивается более, чем на четыре порядка.

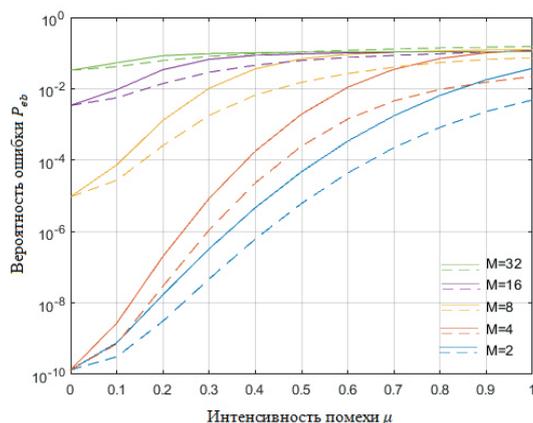


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от интенсивности фазоманипулированной помехи.

Частотные свойства поражающего действия фазоманипулированной помехи наглядно иллюстрируются графиками, приведенными на рис. 4. Здесь показаны кривые вероятности ошибки в зависимости от параметра $\Delta\omega_{\pi}T_s$ при $\mu = 0.5$, при $N = 2$ (сплошные) и $N = 5$ (пунктирные). Видно, что при повышении относительной скорости передачи фазоманипулированной помехи N она становится более широкополосной, и ее влияние сказывается даже при весьма больших расстройках, несколько снижаясь в области главного лепестка спектра сигнала.

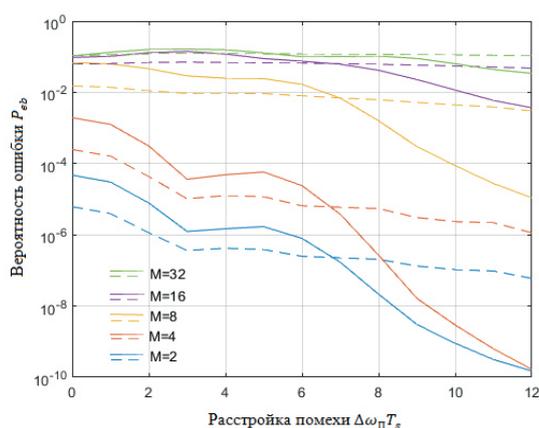


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстройки фазоманипулированной помехи.

Степень снижения поражающего действия фазоманипулированной помехи при больших величинах N можно проанализировать по графикам, показанным на рис. 5. Здесь приведены кривые P_{eb} для случая прицельного действия помехи ($\Delta\omega_{\pi}T_s = 0$) и отношения сигнал/шум $E_b / N_0 = 13$ дБ. Очевидно, что в пределе при $N \rightarrow \infty$ такая помеха становится

псевдошумовой, и графики асимптотически приближаются (снижаются) к некоторому горизонтальному уровню. Это снижение представляется закономерным, так как анализируемый алгоритм приема сигналов М-ФМ оптимален к воздействию именно шумовой помехи.

Подчеркнем, что при больших интенсивностях помехи для $M \geq 8$ при нечетных N вероятность ошибки выше, чем при четных, возможно вследствие разной комбинации частотных составляющих дискретного спектра помехи, поражающих полезный сигнал.

Для повышения помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ на фоне фазоманипулированной помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех [13–18].

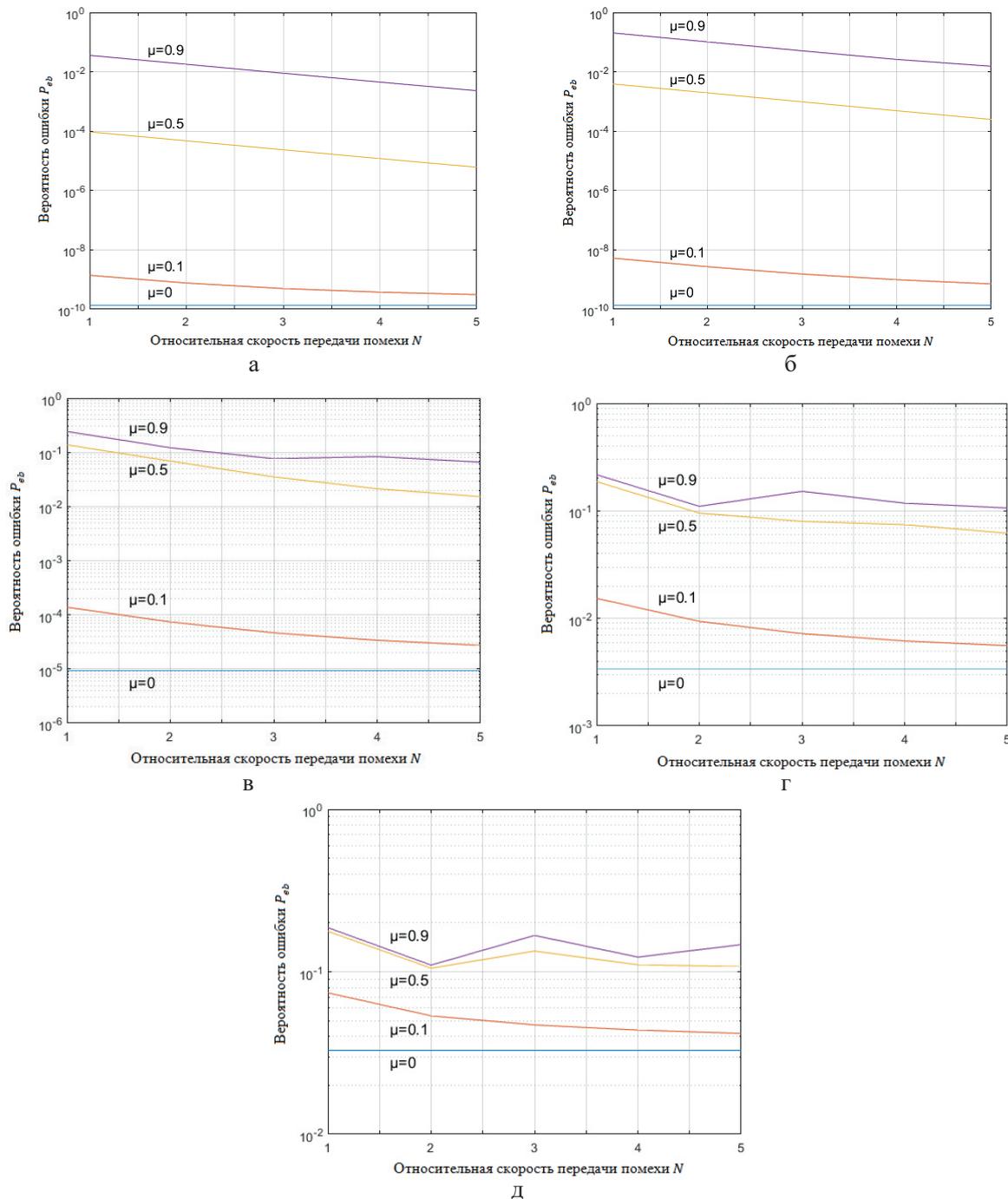


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки от относительной скорости фазоманипулированной помехи: а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

Выводы

По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией весьма заметно подвержены влиянию фазоманипулированной помехи. По мере увеличения позиционности сигналов это влияние усиливается. Степень снижения помехоустойчивости приема зависит от величины относительной скорости передачи помехи и ее интенсивности.
2. При увеличении относительной скорости передачи фазоманипулированной помехи ее эффективность снижается, скорее всего, из-за того, что она становится шумоподобной. Однако, с другой стороны, такая помеха является более широкополосной.
3. Поражающее действие фазоманипулированной помехи наиболее сильно проявляется при ее попадании в главный лепесток спектра сигнала.
4. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ на фоне фазоманипулированной помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех.

Литература:

1. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
2. Боккер П. Передача данных. Техника связи в системах телеобработки данных: в 2-х т. Т. I. Основы: пер. с нем. / под ред. Д.Д. Кловского. М.: Связь, 1980. 264 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
4. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П., Шестопалов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
5. Куликов Г.В. Анализ влияния псевдослучайной фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с минимальной частотной манипуляцией // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 8. С. 973–976.
6. Галев А.В., Косолапов А.С. Исследование влияния структурных помех на помехоустойчивость систем с широкополосными шумоподобными сигналами при когерентном приеме // Наука и образование. 2012. № 4. 77-30569/400050 (15 с.).
7. Алексеев А.А., Чучин Е.В. Модели качества приема сигналов в условиях белого шума и воздействия структурных помех // Ученые записки: Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2012. № 1. С. 70–79. URL: <http://www.scientific-notes.ru/index.php?page=6&new=23>
8. Мальцев Г.Н., Травкин В.С. Оптимальный прием сложных фазоманипулированных сигналов в спутниковых радиоканалах в условиях внутрисистемных структурных помех // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 36–42.
9. Иванов М.С., Федосеев В.Е. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи // Вестник Воронежского технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 108–112.
10. Ложкин К.Ю., Стиценко А.И. Помехоустойчивость некогерентного и когерентного приема ДФРМ-сигнала в условиях воздействия фазоманипулированной, гармониче-

ской или гауссовской помех // Журнал Сибирского федерального университета. 2017. Т. 10. № 2. С. 260–270.

11. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Научные технологии. 2018. № 11. С. 32–38.

12. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 5–12.

13. Петров Е.П., Петров И.Е., Абатуров С.Г. Защита приемных устройств мобильной связи с шумоподобными сигналами от мощных подобных и гармонических помех // T-Comm. 2010. № 4. С. 21–25.

14. Петров Е.П., Алешкин Е.А. Метод подавления подобных помех с неизвестной амплитудой и задержкой сигнала в системах связи с шумоподобными сигналами // T-Comm. 2016. Т. 10. № 11. С. 34–39.

15. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. [и др]. Теория обнаружения сигналов / под ред. Бакута П.А. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.

16. Авдеев В.В., Паршин Ю.Н., Минаева И.А. Эффективность цифрового компенсатора мощной негауссовской помехи // Радиотехника. 1984. №8. С. 33–35.

17. Иванов М.С., Федосеев В.Е. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи // Вестник Воронежского технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 108–112.

18. Иванов М.С., Федосеев В.Е. Синтез демодулятора с оптимальной компенсацией структурной прерывистой помехи // Вестник Воронежского технического университета. 2010. Т. 6. № 10. С. 91–95.

References:

1. Proakis J. Digital communications. Ed. Klovsky D.D. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 2000. 800 p. (in Russ.)

2. Bocker P. Transmission of data. Communication techniques in data teleprocessing systems: in 2 volumes. V. I. Basics. Ed. Klovsky D.D. Moscow: Svyaz' Publ., 1980. 264 p. (in Russ.).

3. Varakin L.E. Communication system with noise-like signals. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1985. 384 p. (in Russ.).

4. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Shestopalov V.I. Noise immunity of radio communication systems with spreading of the signal spectrum by the method of pseudo-random adjustment of the operating frequency. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 2000. 384 p. (in Russ.)

5. Kulikov G.V. Analysis of the influence of a pseudo-random phase-shift interference on the noise immunity of a correlation signal demodulator with a minimum frequency shift keying. *Radiotekhnika i elektronika* (Journal of Communications Technology and Electronics). 2002; 47(8): 973-976. (in Russ.)

6. Galev A.V., Kosolapov A.S. Research of influence of smart jamming on error probability of direct-sequence spread-spectrum systems at coherent reception. *Nauka i obrazovanie*

(Science and Education). 2012; 4: 77-30569/400050 (15 p.) (in Russ.)

7. Alekseev A.A., Chuchin E.V. Models of quality of reception of signals in the conditions of white noise and influence of structural hindrances. *Uchenye zapiski* (Scientific notes): The online academic journal of Kursk State University. 2012; 1: 70-79. (in Russ.). URL: <http://www.scientific-notes.ru/index.php?page=6&new=23>

8. Maltsev G.N., Travkin V.S. Optimal reception of complex phase-manipulated signals in satellite channels under internal structural noise. *Informatsionno-upravliayuschie sistemy* (Information and Control Systems). 2006; 5: 36-42. (in Russ.)

9. Ivanov M.S., Fedoseev V.E. Technique and results of the analysis of the potential noise stability of reception of the digital signal against the manipulated structural hindrance. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* (Bulletin of Voronezh State Technical University). 2010; 6(11): 108-112. (in Russ.)

10. Lozhkin K.Yu., Stitsenko A.I. The immunity of non-coherent and coherent reception of a signal DQPSK in the conditions of influence of PSK, harmonic or Gaussian noise. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo Universiteta* (Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies). 2017; 10(2): 260-270. (in Russ.)

11. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase-shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukyomkie tekhnologii* (Science Intensive Technologies). 2018; 11: 32-38. (in Russ.)

12. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung. Analysis of noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying under the influence of scanning interference. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 5-12. (in Russ.)

13. Petrov E.P., Petrov I.E., Abaturov S.G. Protecting mobile receivers with noise-like signals from powerful and harmonic interference. *T-Comm*. 2010; 4: 21-25. (in Russ.)

14. Petrov E.P., Aleshkin E.A. Method of suppression of signal-similar interference with unknown amplitude and time delay in communication systems with noise-shaped signals. *T-Comm*. 2016; 10(11): 34-39. (in Russ.)

15. Akimov P.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A. [et al.] Signal detection theory. Ed. Bakut P.A. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1984. 440 p. (in Russ.)

16. Avdeev V.V., Parshin Yu.N., Minaeva I.A. Efficiency of the digital compensator for powerful non-Gaussian interference. *Radiotekhnika* (Radio Engineering). 1984; 8: 33-35. (in Russ.)

17. Ivanov M.S., Fedoseev V.E. Technique and results of the analysis of the potential noise stability of reception of the digital signal against the manipulated structural hindrance. *Vestnik Voronezhskogo tekhnicheskogo universiteta* (Bulletin of the Voronezh Technical University). 2010; 6(11): 108-112. (in Russ.)

18. Ivanov M.S., Fedoseev V.E. Synthesis of the demodulator with optimum indemnification of the structural faltering hindrance. *Vestnik Voronezhskogo tekhnicheskogo universiteta* (Bulletin of the Voronezh Technical University). 2010; 6(10): 91-95. (in Russ.)

Об авторах:

Куликов Геннадий Валентинович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Нгуен Ван Зунг, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

До Чунг Тиен, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Gennady V. Kulikov, D.Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Nguyen Van Dung, Postgraduate Student of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Do Trung Tien, Postgraduate Student of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен. Влияние фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 18–28. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-18-28

For citation: Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Do Trung Tien. Effect of phase-shift interference on the noise immunity of correlation demodulator of signals with multiple phase shift keying. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 18-28. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-18-28

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ В ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

**Н.М. Легкий^{1,@},
И.В. Унченко^{1,2}**

¹*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

²*Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт, Калужская область, г. Жуков 249192, Россия*

@Автор для переписки, e-mail: legki@mirea.ru

В статье изложены результаты исследования фазового и временного методов формирования диаграммы направленности фазированных антенных решеток. Проведен их сравнительный анализ на примере восьмиэлементной эквидистантной антенной линейки на базе широкополосных щелевых излучателей Вивальди. Рассмотрены практические реализации построения устройств формирования диаграмм направленности фазированных антенных решеток на фазовращателях для фазового метода формирования диаграммы и на линиях задержки. Приведены характеристики наиболее часто используемых в фазированных антенных решетках фазовращателей фирмы Analog Devices и экспериментальных линий задержек, приведены их характеристики. Оценена широкополосность обоих типов антенных решеток на основе результатов проведенного математического моделирования. Отмечено, что фазовый метод формирования диаграммы направленности не получил большого распространения в широкополосных системах, что обусловлено наличием зависимости фазы сигнала от частоты и, как следствие, узким диапазоном работы фазовращателей. В линиях задержки время задержки для всех каналов не зависит от частотной составляющей сигнала, что позволяет говорить о сверхширокополосности устройств формирования диаграммы направленности, построенных на принципах временной задержки. Показано, что максимальная длина пути задержки сигнала для крайних излучателей зависит только от максимального расчетного угла отклонения луча. Фазированные антенные решетки, построенные с использованием линий задержек, имеют не только большую широкополосность, но и большее затухание сигналов. При изготовлении фазированных антенных решеток с небольшим количеством антенных элементов в линейке использование линий задержек в качестве фазосдвигающих элементов дает значительный выигрыш в характеристиках при незначительном проигрыше в мощности.

Ключевые слова: антенны, фазированные антенные решетки, ФАР, диаграмма направленности, формирование диаграммы направленности, фазовращатели, линии задержки.

FORMATION OF THE DIRECTION DIAGRAM IN PHASED ANTENNA ARRAY

N.M. Legkiy^{1,@}

I.V. Unchenko^{1,2}

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Kaluga Radio Engineering Research Institute, Kaluga region, Zhukov 249192, Russia

@Corresponding author e-mail: legki@mirea.ru

The article presents the results of the study of phase and temporal methods in the formation of the direction diagram of phased antenna array, and carries out a comparative analysis using an eight-element equidistant antenna array based on Vivaldi wideband slot-hole emitters as example. The practical implementations of constructing devices for forming phased antenna array direction diagrams on phase shifters for the phase diagram generation method and on delay lines, for the temporal method, are considered. The characteristics of the most frequently used Analog Devices phase shifters in the phased antenna arrays, as well as experimental delay lines are given. The results of the mathematical modeling allowed estimating the bandwidth of both types of antenna arrays. Authors note that the phase method of beamforming is not widely used in broadband systems due to the dependence of the phase of a signal on the frequency and, as a consequence, the narrow range of operation of phase shifters. In delay lines, the delay time for all channels does not depend on the frequency component of the signal, which suggests that the beamforming devices based on the principles of time delay are ultra-wideband, and the maximum length of the signal delay path for extreme emitters depends only on the maximum calculated angle of beam deflection. Phased antenna arrays built using delay lines have not only greater bandwidth, but also greater attenuation of signals. In the manufacture of phased antenna arrays with a small number of antenna elements in the range, the use of delay lines as phase-shifting elements gives a significant gain in performance with a slight loss in power.

Keywords: antennas, phased arrays, radiation pattern, beamforming, phase shifters, delay line.

Введение

В последние годы наблюдается необходимость в расширении рабочей полосы антенн различных радиосистем: радиолокационных, связи и других типов, а также повышения частот их работы, что вызывает известные трудности при построении любой современной системы, использующей электронное управление лучом. Неотъемлемой частью бортовой радиоаппаратуры стали широкополосные фазированные антенные решетки (ФАР), в то время как системы с механическим отклонением луча и комплексы на их основе постепенно вытесняются. Вместе с тем на рынке представлены аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), позволяющие вести прямое цифровое диаграммообразование (ЦДО) в нижней полосе частот, с тенденцией к повышению частоты и расширению полос.

Целью настоящей статьи является рассмотрение способов построения устройств формирования диаграмм направленности для фазированных антенных решеток (ФАР).

Методы электронного отклонения луча

В состав любой системы связи или радиолокационной системы (РЛС) с электрическим сканированием входит антенна, приемо-передатчик, диаграммообразующее устройство (ДОУ). Изменение положения луча в ФАР осуществляется изменением фазы сигнала, поступающего на вход соответствующего излучателя антенной решетки. Существуют фазовый, временной и частотный методы сканирования в ФАР, они подробно описаны в [1]. Необходимые значения распределения фаз между каналами рассчитываются в зависимости конструкции антенной решетки, определяющей диаграмму направленности, угла обзора и необходимого числа положений луча. Существуют также редко используемый метод переключения лучей и набирающее популярность цифровое формирование диаграммы направленности [2, 3]. Широкополосность таких антенных решеток определяется частотными характеристиками основных составляющих решетки – излучателей, фазовращателей, линий задержки. Широкополосные излучатели на основе симметричных щелевых линий (излучатель Вивальди) уже хорошо известны, их разновидности подробно представлены в [4]. Общие тенденции развития широкополосных ФАР на основе фазовращателей отражены в [5, 6].

Расчет фазовых задержек для эквидистантной антенной линейки

Рассмотрим варианты формирования луча на примере эквидистантной антенной линейки (АЛ), состоящей из N элементов, расположенных с шагом d и с фронтом волны, падающим под углом θ (рис. 1).

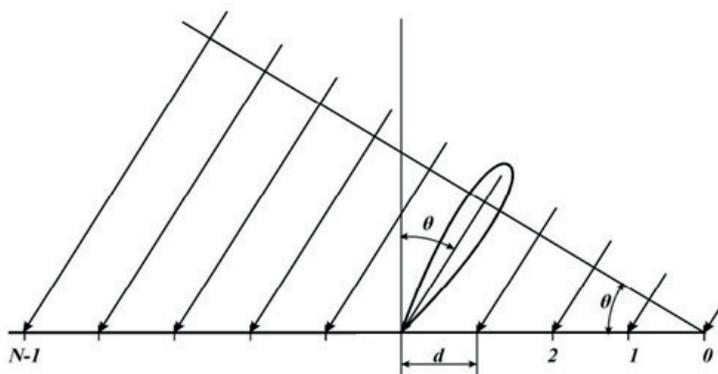


Рис. 1. Эквидистантная антенная линейка.

Фаза сигнала для каждого излучателя АЛ рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{N-1} = \varphi_0 + (N-1) \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot d \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где: λ – длина волны;

φ_0 – начальная фаза;

$\varphi_{(N-1)}$ – фазовый сдвиг сигнала на соответствующем излучателе.

С целью моделирования решетки из восьми элементов рассмотрим широкополосный щелевой излучатель Вивальди. Диаграмма направленности такого излучателя приведена на рис. 2.

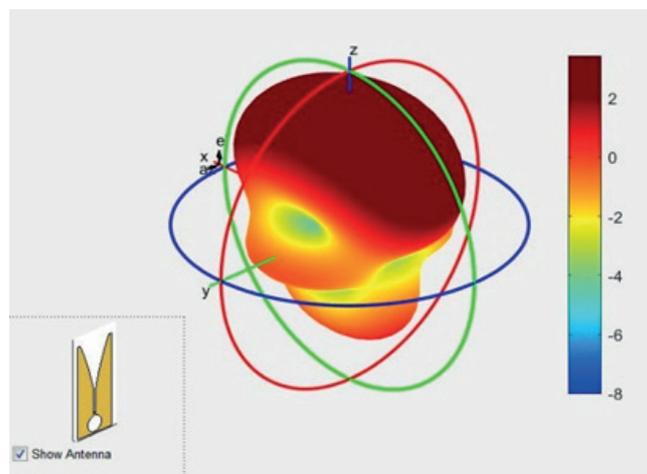


Рис. 2. Диаграмма направленности излучателя Вивальди.

Для отклонения луча от нормали восьмиканальной АЛ, состоящей из антенн Вивальди с $d = \lambda/2$ на $\pm 50^\circ$ с шагом 10° , при $\varphi_0 = 0^\circ$ для пяти промежуточных положений потребуется по пять значений фазы для крайних излучателей, и для остальных излучателей, не считая синфазного направления, когда фаза сигнала во всех каналах равна нулю – по десять значений.

Идеальные значения фаз сигнала для каждого канала приведены в табл. 1.

Таблица 1. Точные значения фаз сигнала для каждого канала антенной линейки (в град.)

φ/θ	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 50^\circ$
φ_1	182.7346	190.8553	204.1154	222.1120	244.2982
φ_2	5.4692	21.7107	48.2309	84.2240	128.5965
φ_3	188.2038	212.5660	252.3463	306.3360	12.8947
φ_4	10.9384	43.4213	96.4617	168.4480	257.1929
φ_5	193.6730	234.2766	300.5771	30.5600	141.4912
φ_6	16.4076	65.1320	144.6926	252.6720	25.7894
φ_7	199.1422	255.9873	348.8080	114.7840	270.0876

Построение диаграммообразующего устройства на фазовращателях

Изменение фазы сигнала при классическом построении ДОУ осуществляется путем разделения сигнала на несколько каналов с помощью делителей мощности при независимом изменении фазы управляемым фазовращателем в каждом канале. Структура такого ДОУ приведена на рис. 3. Чтобы получить приближенные к идеальным значения уровней фазовых сдвигов, потребуется включить в тракт каждого канала несколько фазовращателей. В табл. 2 приведены характеристики фазовращателей Analog Devices.

Как видно из табл. 1 и 2, можно подобрать приближенные значения фазовых задержек в каналах для построения устройства диаграммообразования с использованием одних только фазовращателей. Результаты моделирования изменения положения луча в диаграмме направленности эквидистантной АЛ при работе восьмиканального ДОУ, построенного на фазовращателях НМС649А, приведены на рис. 4.

Таблица 2. Характеристики фазовращателей Analog Devices [7]

Наименование	Частота, ГГц	Вносимые потери, Дб	Биты управления	Дискрет фазы (в град.)	Фазовая ошибка
HMC936A	1.2–1.4	5	6	5.625	1.2
HMC543A	8–12	6.5	4	22.5	4
HMC648A	2.9–3.9	5	6	5.625	1.2
HMC1133	4.8–6	4	–	–	–
HMC649A	3–6	8	6	5.625	4
HMC647A	2.5–3.1	4	6	5.625	1.5
HMC642A	9–12.5	7	6	5.625	4.5

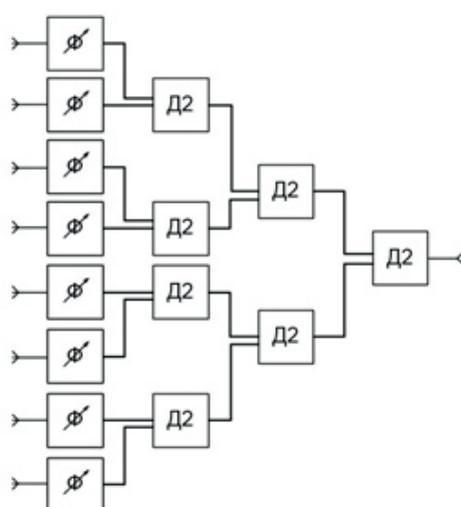


Рис. 3. Структура устройства формирования диаграммы с фазовращателями.

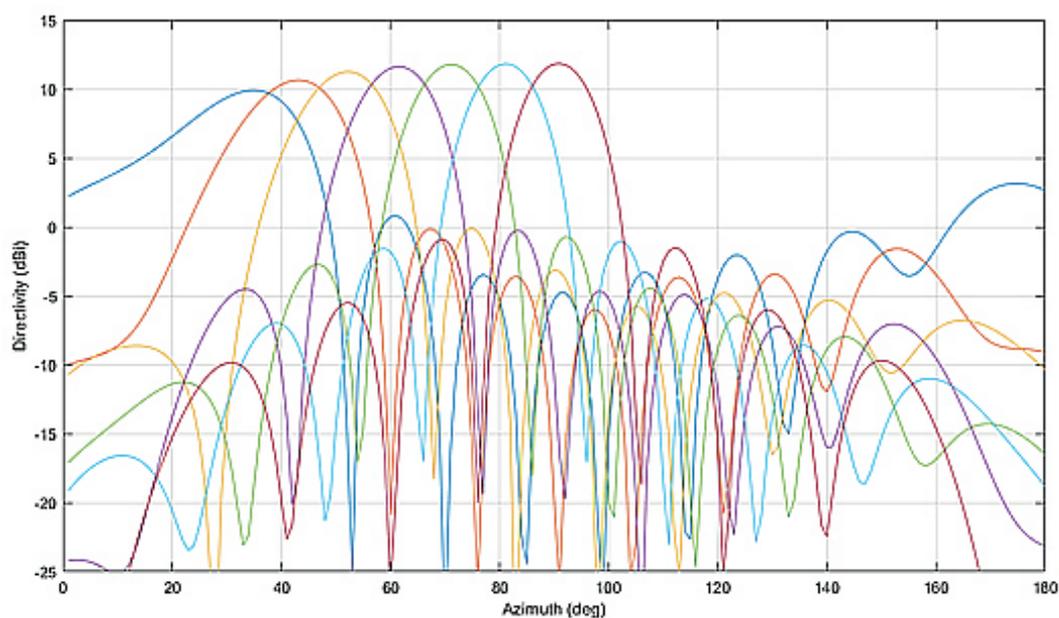


Рис. 4. Изменение положения луча АЛ при работе ДОУ на фазовращателях.

К недостаткам таких ДОУ можно отнести их очевидную относительную узкополосность. По причине зависимости фазы сигнала от частоты и, как следствие, узкого диапазона работы фазовращателей такие ДОУ не получили большого распространения в широкополосных системах. Тем не менее, в узкополосных системах, включающих в себя несколько ФАР разного диапазона частот (в нижнем диапазоне частот затруднительно построение ФАР с широким перекрытием частот), фазовращатели эффективно применяются при построении ДОУ, в том числе и многолучевых.

Построение диаграммообразующего устройства на линиях задержки

При использовании линий задержек для построения ДОУ удобно оперировать не фазовым сдвигом сигнала, а задержкой сигнала по времени на величину Δt . Из выражения (1) очевидно, что:

$$\Delta t = \left(\frac{d}{c} \right) \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

где: c – скорость распространения сигнала;

d – шаг антенной линейки.

Время задержки для всех каналов можно записать в виде:

$$t_{N-1} = t_0 + (N-1) \cdot \left(\frac{d}{c} \right) \cdot \sin \theta. \quad (3)$$

Следует обратить внимание, что из этой формулы исключена частотная составляющая. Это позволяет говорить о сверхширокополосности ДОУ, построенных на принципах временной задержки, причем максимальная длина пути задержки сигнала для крайних излучателей должна составлять:

$$L_z = (N-1) \cdot d \cdot \sin \theta_{\max} \quad (4)$$

где θ_{\max} – максимальный расчетный угол отклонения луча.

В случае построения устройства ДОУ, работающих на принципах временной задержки сигнала, мы будем использовать управляемые четырехрядные (ЛЗ1) и однорядные (ЛЗ2) линии задержки отечественной разработки – монолитные интегральные схемы (МИС) на подложке из GaAs. Технология GaAs-монолитных интегральных схем СВЧ в последние годы применяется все более активно [8–11]. Общий вид двух типов линии задержки в виде МИС, установленных в тракте ДОУ, приведен на рис. 5. Основные параметры этих МИС приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики применяемых линий задержки

Наименование	Номинальные значения дискретов электрической длины, мм	Вносимое затухание, дБ	Диапазон частот, ГГц
ЛЗ1	1.5; 3; 6; 12	Не более 10	1–18
ЛЗ2	24	Не более 4	1–18

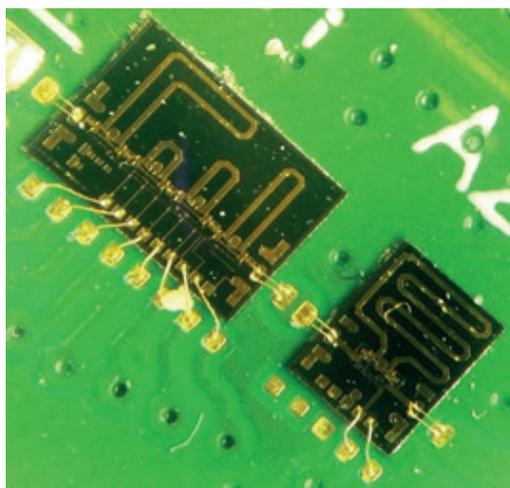


Рис. 5. Линии задержки в виде микроволновой монолитной интегральной схемы в тракте формирования диаграммы направленности ФАР.

Для управления задержкой сигнала в ДОУ на МИС ЛЗ1, ЛЗ2 изменим классическую схему построения ДОУ, установив более грубую одноразрядную ЛЗ2 перед последним делителем мощности для управления грубой задержкой в двух каналах одновременно. Структурная схема такого ДОУ представлена на рис. 6. Подчеркнем, что перспективные оптоэлектронные ДОУ [12] строятся на оптических линиях задержки по тем же принципам временной задержки сигнала, что и ДОУ СВЧ-диапазона. Результаты моделирования изменения положения луча в диаграмме направленности (ДН) эквидистантной АЛ при работе восьмиканального ДОУ, построенного на линиях задержки ЛЗ1, ЛЗ2, приведены на рис. 7.

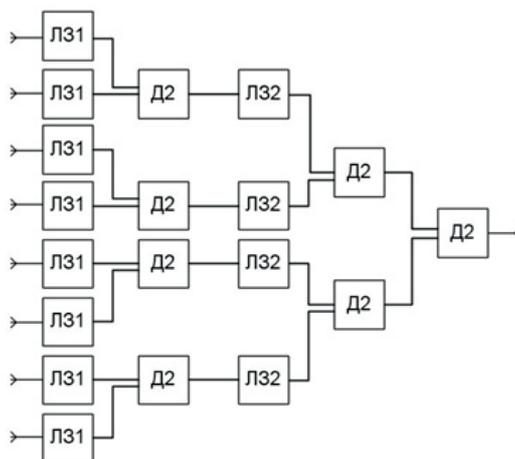


Рис. 6. Структура ДОУ с линиями задержки.

Сопоставление характеристик ДОУ, выполненных с фазовращателями (рис. 4) и с линиями задержки (рис. 7), позволяет сделать вывод, что оба способа построения устройства формирования удовлетворяют поставленной задаче, но при этом ДОУ на линиях задержки имеет более широкий диапазон работы. К недостаткам такого ДОУ следует отнести большие затухания в каналах по сравнению с ДОУ на фазовращателях. Необходимо отметить более низкую разрядность ЛЗ по сравнению с фазовращателями, хотя на

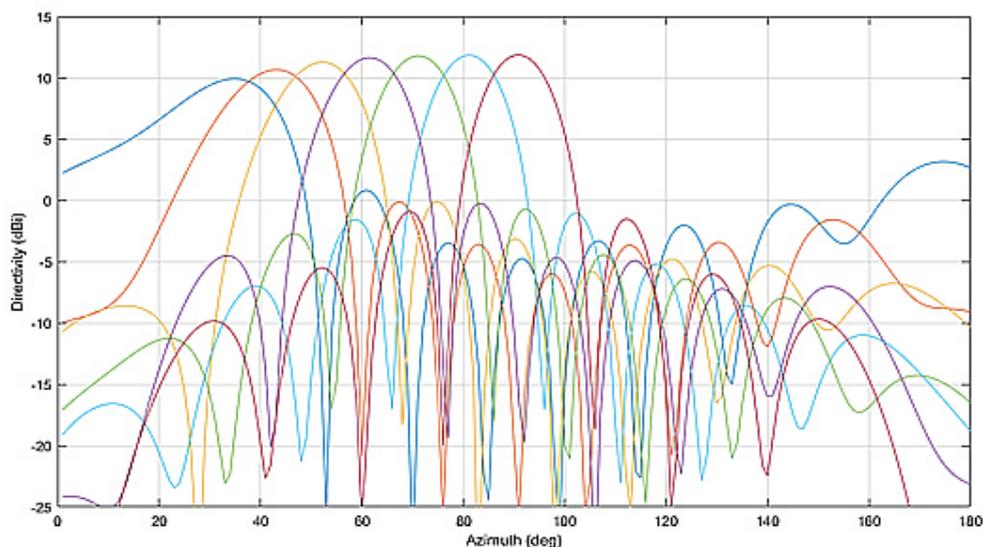


Рис. 7. Изменение положения луча АЛ при работе ДООУ с линиями задержки.

ДН восьмиэлементной АЛ это не сказалось, но при построении многоэлементных АФАР может играть важную роль.

Приведенные схемы ДООУ могут быть использованы для построения многолучевых антенных решеток (МАР) с независимым управлением лучами. Реализация таких МАР потребует лишь просуммировать соответствующие выходные каналы идентичных ДООУ.

Литература:

1. Справочник по радиолокации: в 4 т. / под ред. М.И. Сколника. М.: Сов. Радио, 1977. Т. 2: Радиолокационные антенны и устройства. 438 с.
2. Слюсар В.И. Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2002. № 1. С. 46–52.
3. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М.: Радиотехника, 2010. 144 с.
4. Воскресенский Д.И., Котов Ю.В., Овчинникова Е.В. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток (обзор работ) // Антенны. 2005. № 11 (102). С. 7–21.
5. Викулов И. Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2017. № 5 (165). С. 126–134.
6. Лопатенко Э.В., Марусич А.А. Формирование диаграммы направленности АФАР с двумя независимо управляемыми лучами и низким уровнем боковых лепестков // Вопросы радиоэлектроники. 2005. Т. 1. № 1. С. 144–158.
7. <https://www.analog.com/ru/products/rf-microwave/phase-shifters-vector-modulators/digital-phase-shifter.html> (по состоянию на 01.03.2019).
8. Викулов И., Кичаева Н. Технология GaAs-монокристаллических схем СВЧ в зарубежной военной технике // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 2 (76). С. 56–61.
9. Викулов И. Монокристаллические интегральные схемы СВЧ технологическая основа АФАР // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2012. № 7 (121). С. 60–73.
10. Masse D. Report provides data on shipments and market values for airborne AESA // Microwave J. 2011. V. 54. № 9. P. 43.

11. Hindle P. GaAs foundry services outlook // *Microwave J.* 2010. V. 53. № 6. P. 146.
12. Зайцев Д.Ф. Нанопотоника и ее применение. М.: АКТЕОН, 2011. 427 с.

References:

1. Handbook of radar: in 4 volumes. Ed. M.I. Skolnik. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1977. V. 2: Radar antennas and devices. 438 p. (in Russ.)
2. Slusar V.I. Digital diagram forming circuitry. Modular solutions. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2002; 1: 46-52. (in Russ.)
3. Grigoriev L.N. Digital beamforming in phased antenna arrays. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 144 p. (in Russ.)
4. Voskresenskiy D.I., Kotov Yu.V., Ovchinnikova E.V. Development trends of broadband phased antenna arrays (review). *Antenny* (Antennas). 2005; 11(102): 7-21. (in Russ.)
5. Vikulov I. Radio-electronic systems with AFAR: Directions of development and application. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2017; 5(165): 126-134. (in Russ.)
6. Lopatenko E.V., Marusich A.A. Forming a pattern of an AFAR with two independently controlled rays and a low level of side lobes. *Voprosy radioelektroniki* (Questions of Radio Electronics). 2005; 1(1): 144-158. (in Russ.)
7. <https://www.analog.com/ru/products/rf-microwave/phase-shifters-vector-modulators/digital-phase-shifter.html> (as of 03/01/2019).
8. Vikulov I., Kichayeva N. Technology of GaAs-monolithic microwave circuits in foreign military equipment. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2007; 2(76): 56-61. (in Russ.)
9. Vikulov I. Monolithic integrated circuits microwave is technological basis of AESA. *Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes* (Electronics: Science, Technology, Business). 2012; 7(121): 60-73. (in Russ.)
10. Masse D. Report provides data on shipments and market values for airborne AESA. *Microwave J.* 2011; 54(9): 43.
11. Hindle P. GaAs foundry services outlook. *Microwave J.* 2010; 53(6): 146.
12. Zaitsev D.F. Nanophotonics and its application. Moscow: "AKTEON" Publ., 2011. 427 p. (in Russ.)

Об авторах:

Легкий Николай Михайлович, доктор технических наук, заведующий кафедрой инженерной экологии техносферы Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Унченко Иван Владимирович, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); инженер АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» (249192, Калужская область, Жуков, ул. Ленина, 2).

About the authors:

Nikolay M. Legkiy, D.Sc. (Engineering), Head of the Chair of Environmental Engineering of the Technosphere, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Ivan V. Unchenko, Postgraduate Student of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia); Engineer of Kaluga Radio Engineering Research Institute (2, Lenin st., Zhukov, Kaluga region, 249192, Russia).

Для цитирования: Легкий Н.М., Унченко И.В. Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 29–38. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38

For citation: Legkiy N.M., Unchenko I.V. Formation of the direction diagram in phased antenna array. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 29-38. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38

**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПАРАЗИТНЫХ ФАЗОВЫХ
ФЛУКТУАЦИЙ В ВЫХОДНОМ СИГНАЛЕ
СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ**

**П.А. Толкачев[@],
В.В. Сизых,
А.И. Стариковский**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: tolkachevpa@mail.ru

В работе рассматривается актуальная проблема расчета уровня паразитных флуктуаций фазы выходного сигнала синтезатора частот когерентного синтеза, построенного на основе фазовой автоподстройки частоты. За основу построения модели оценки уровня паразитных флуктуаций фазы берется модель распределения выходных шумов в виде степенной функции по принципу генератора Лисона. Описанные принципы работы синтезаторов частот с делителем с дробно-переменным коэффициентом деления, включенным в петлю обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты, дают возможность понять природу появления так называемых дробовых шумов. Проведенный анализ характеристик всех элементов, входящих в состав синтезаторов частот, позволяет убедиться в возможности представления шумовых составляющих каждого отдельного блока в виде степенной функции с предварительно определенными коэффициентами. Разработанная модель спектральной плотности в виде степенной функции может быть предложена для оценочного расчета уровня шумов в синтезаторах частот на этапе выбора их структуры или оценочного расчета. В качестве подтверждения адекватности теоретических расчетов представлены результаты моделирования фазовых шумов предложенным алгоритмом для различных элементов схемы. Приведено сравнение полученных результатов с моделированием аналогичного синтезатора частот в пакете имитационного моделирования ADIsimPLL от компании Analog Devices. Подобное моделирование позволяет не только получить уровень побочных составляющих в спектре выходного сигнала в зависимости от выбранной структуры синтезатора частот, но и оценить степень влияния на него каждого конкретного элемента схемы.

Ключевые слова: синтезатор частот, фазовый шум, фазовая автоподстройка частоты, степенная функция, проектирование цифровых устройств.

MODEL OF EVALUATING THE LEVEL OF PARASITIC PHASE FLUCTUATIONS IN THE OUTPUT SIGNAL OF THE FREQUENCIES SYNTHESIZER

P.A. Tolkachev[@],
V.V. Sizykh,
A.I. Starikovskiy

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author e-mail: tolkachevpa@mail.ru

The article describes the actual problem of calculating the level of parasitic fluctuations of the phase of the output signal of the frequency synthesizer of indirect synthesis based on phase-locked loop. The basis for constructing a polynomial model is the model of output noise distribution based on the Leeson generator principle. The described principles of operation of frequency synthesizers with a divider with a fractionally variable division factor allow us to understand the nature of the appearance of the so-called shot noise. The analysis of the characteristics of all the elements included in the frequency synthesizers makes it possible to ensure that the noise components of each individual unit can be represented as a polynomial. The possibility of using the developed polynomial model for estimating the noise level in frequency synthesizers at the stage of selecting the structure of the proposed implementation structure is proposed. As a demonstration of the adequacy of theoretical calculations, the results of phase noise simulation by the polynomial method for all circuit components are presented, as well as a comparison of the results obtained with the simulation of a similar frequency synthesizer in the «ADIsimPLL» simulation package from Analog Devices. Such a simulation allows not only to obtain the level of side components in the spectrum of the output signal, but also to estimate the degree of influence of each specific element of the circuit.

Keywords: frequency synthesizer, phase noise, phase-locked loop, polynomial model, digital device design.

Введение

На протяжении длительного времени основным инструментом оценки характеристик проектируемого инженером устройства являлось либо использование опыта разработки и знание характеристик однотипных технических средств, либо длительные и трудоемкие математические расчеты. В связи с изобретением и популяризацией ЭВМ трудоемкость математических расчетов существенно сократилась, и на первое место вышли программные средства оптимизации и системы автоматизированного проектирования – так называемые САПР или CAD (англ. *Computer-Aided Design*). Большинство крупных производителей электронной элементной базы, такие, как Analog Devices, Agilent Technologies и др., стали предлагать САПР собственного производства, ориентированные на использование при разработках продуктов, выпускаемых данным конкретным производителем, тем самым вынуждая потребителя пользоваться только собственной продукцией. Подобное явление не только ограничивает потенциальный выбор возможной элементной базы, но также резко снижает спрос на универсальные САПР,

включающие в себя широкий набор элементной базы различных производителей, вследствие дороговизны их приобретения и поддержки.

Отсюда очевидно, что разработка простых алгоритмов определения базовых характеристик на основе данных, которые производитель указывает в спецификации к своей продукции, является весьма актуальной проблемой. В настоящей статье в качестве такой базовой характеристики рассмотрен уровень паразитных девиаций фазы выходного сигнала синтезатора частот (СЧ). Сегодня базовым способом оценки паразитных девиаций фазы выходного сигнала СЧ считается способ «аддитивности», согласно которому все шумы, создаваемые или добавляемые структурными элементами схемы, достаточно малы в сравнении с уровнем оцениваемого сигнала, и в соответствии с правилом наложения разрешается складывать их с соответствующими входными или выходными воздействиями [1]. Тем не менее, когда система имеет достаточно сложную структуру или большое количество нелинейных элементов, использование подобного способа затруднительно. В таких случаях, чтобы оценить шумы СЧ, в основе которых элементная база, не использующаяся в САПР, большинство разработчиков будет вынуждено применять имеющееся бесплатное узкоспециализированное программное обеспечение. Наряду с этим придется модернизировать средства проектирования, что не всегда оправдано с точки зрения трудозатрат.

1. Разложение шумов для элементов системы в виде степенной функции

Синтезаторы частот с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) находят самое обширное применение в радиоэлектронной аппаратуре. Они используются в качестве функциональных узлов в различных системах – от радиолокации и радионавигации до радиометрологии и прецизионных измерений. Поскольку СЧ в качестве функционального узла входят в обширный круг систем, при их конструировании неизбежно возникают задачи, связанные с оценкой получаемых параметров на самых ранних этапах проектирования. Касательно оценки шумовых характеристик большинство специалистов сходятся во мнении, что самое большое затруднение при оценке уровня помех вызывает помеха, производимая работой делителя с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД) [2]. В представленной статье предстоит найти модель СЧ с ДДПКД, позволяющую облегчить расчет фазовых шумов СЧ, имея в распоряжении лишь технические характеристики элементной базы.

Чтобы рассчитать спектральную плотность мощности (СПМ) фазовых флуктуаций выходного сигнала СЧ, необходимо задаться структурой проектируемого устройства и рассчитать шумовые характеристики всех элементов, входящих в состав СЧ (подобные коэффициенты указываются в спецификации на элементную базу). В любой используемой современными производителями элементной базе всегда присутствуют различные источники шумов, которые имеют электрическую природу. Подобные источники в большинстве своем генерируют белый и фликкер-шум [3]. При определенном расположении управляемого генератора в структурной схеме будет происходить или фазовая модуляция внешними источниками шума, или частотная – внутренними источниками. Показано [4], что СПМ паразитных девиаций фазы сигнала генераторов возможно отобразить в виде модели генератора Лисона:

$$S(f) = \gamma_{\alpha} f^{\alpha} \quad (1)$$

График функции представлен на рис. 1.

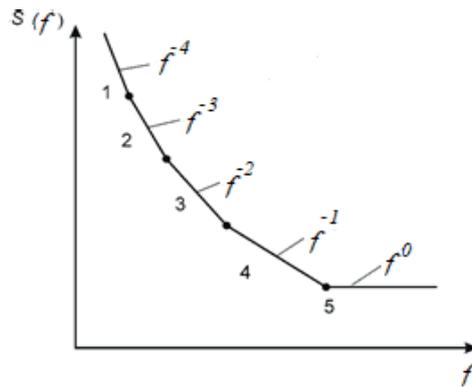


Рис. 1. Типичное распределение спектральной плотности мощности фазовых флуктуаций источников колебаний.

В наиболее распространенном виде показатель степени может принимать значения 0, 1, 2, 3, 4, что характеризует различную природу возникновения шумов (табл. 1) [5]. Постоянная γ_α – это мера уровня шума. Степенные функции служат общепризнанными моделями для описания спектральных плотностей шума, полученных на ограниченном частотном интервале преобразований Фурье.

Таблица 1. Представление шумов в зависимости от степени частотной компоненты

$S(f)$	Название
$\gamma_4 f^4$	Частотный шум случайных блужданий
$\gamma_3 f^3$	Частотный фликкер-шум
$\gamma_2 f^2$	Белый частотный шум
$\gamma_1 f^1$	Фазовый фликкер-шум
$\gamma_0 f^0$	Белый фазовый шум

Проектирование СЧ предполагает возможность производства различных структурных элементов схемы в виде обособленного цифрового модуля (ЦМ) [6]. Производство элементной базы позволяет изготавливать такие элементы схемы, как импульсный частотно-фазовый детектор (ИЧФД), токовая подкачка (ТП), ДПКД/ДДПКД в виде ЦМ.

Согласно заявленным производителями сведениям касательно интегральных микросхем СЧ, эквивалентная СПМ паразитных девиаций фазы ЦМ, состоящего из различных делителей и ИЧФД, представима в следующем виде:

$$S_{\text{ЦМ}}(f) = \frac{B_1 \cdot f}{f_0^2} + \frac{B_0}{f_0} \quad (2)$$

где f_0 – частота дискретизации;

f – отстройка от частоты несущего колебания;

B_1, B_0 – константы, зависящие от типа микросхемы [7].

Иностранные производители интегральных микросхем в Datasheet на свои изделия чаще всего записывают значения таких величин, как Normalized Phase Noise Floor и Normalized $1/f$ Noise. Это не что иное, как усредненное значение белого фазового шума и фазового фликкер-шума. В связи с этим становится возможным представление шумовых характеристик ЦМ в виде степенной функции (2) [8].

2. Применение степенного разложения к блокам схемы

СПМ внешних и внутренних воздействий в СЧ ИФАПЧ возможно представить в виде степенных функций отдельных частот для каждого конкретного элемента схемы:

$$S^{\Phi\text{НЧ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\Phi\text{НЧ}} \cdot f^i, S^{\text{ЦМ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\text{ЦМ}} \cdot f^i, S^{\text{ОГ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\text{ОГ}} \cdot f^i, S^{\text{УГ}}(f) = \sum_{i=0}^4 \gamma_i^{\text{УГ}} \cdot f^i \quad (3)$$

где $S^{\text{ОГ}}(f)$ и $S^{\text{УГ}}(f)$ – СПМ девиаций фазы сигналов опорного и управляемого генераторов;

$S^{\text{ЦМ}}(f)$ – фазовый шум ЦМ, пересчитанный на его вход;

$S^{\Phi\text{НЧ}}(f)$ – шум ФНЧ;

γ_i – коэффициенты аппроксимации, определяемые из спецификации на используемые радиоэлементы.

Составим выражение, определяющее выходной уровень фазовых шумов. В качестве исходных данных возьмем линеаризованную схему СЧ, изображенную на рис. 2.

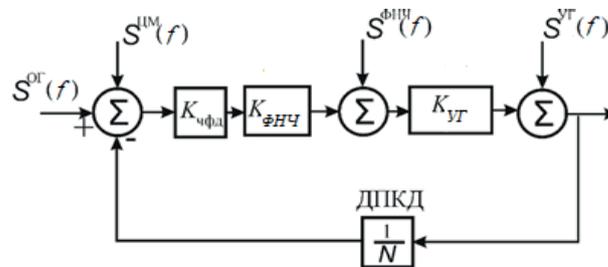


Рис. 2. Схема расчета выходного уровня шума в СЧ с ИФАПЧ.

На рис. 2 представлена типовая схема СЧ с ИФАПЧ. Для расчета передаточной функции всей схемы выразим комплексные коэффициенты передачи каждого блока через передаточные функции:

$$S(f) = (S^{\text{ОГ}}(f) + S^{\text{ЦМ}}(f)) \cdot |K_1(j\omega)|^2 + S^{\text{УГ}}(f) \cdot |K_2(j\omega)|^2 + S^{\Phi\text{НЧ}}(f) \cdot |K_3(j\omega)|^2 \quad (4)$$

$$K_1(j\omega) = \frac{G(j\omega) \cdot N}{1 + G(j\omega)}, K_2(j\omega) = \frac{1}{1 + G(j\omega)}, K_3(j\omega) = \frac{K_{\text{УГ}}}{j\omega \cdot (1 + G(j\omega))}, \quad (5)$$

$$G(j\omega) = \frac{K_{\text{чФД}}(j\omega) \cdot K_{\text{УГ}}(j\omega) \cdot K_{\text{ФНЧ}}(j\omega)}{N \cdot j\omega},$$

где $K_1(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фазового шума сигнала ОГ;

$K_2(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фазового шума сигнала УГ;

$K_3(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи шума ФНЧ;

$G(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи системы ИФАПЧ;

$K_{\text{чФД}}$ – крутизна характеристики ЧФД;

$K_{\text{УГ}}$ – крутизна характеристики УГ;

$K_{\text{ФНЧ}}$ – коэффициент передачи ФНЧ;

N – коэффициент деления делителя.

Проведем исследование типового синтезатора частоты, построенного на базе микросхемы ADF4118. Для этого составим модель СЧ, реализованного по типовой схеме, с указанием всех известных источников шума (рис. 3).

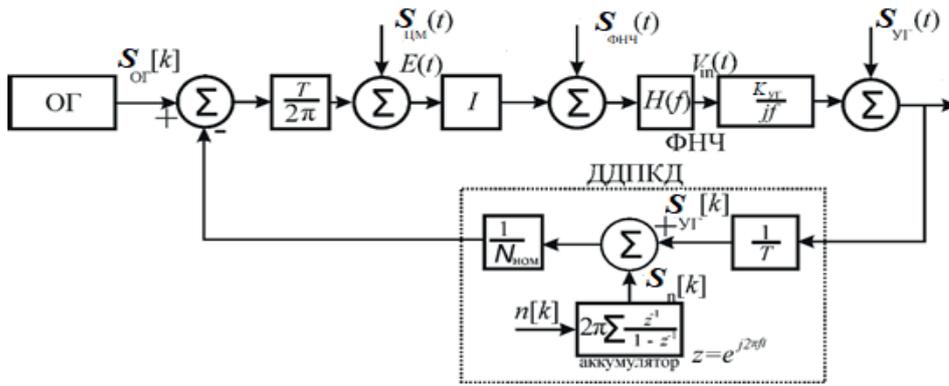


Рис. 3. Модель синтезатора частот в частотной области с известными источниками шума.

Выразим коэффициент передачи системы, изображенной на рис. 3. Согласно теории управления коэффициент замкнутой системы имеет вид:

$$G(f) = \frac{A(f)}{1 + A(f)}, \quad (6)$$

где $A(f)$ – коэффициент разомкнутой системы, который имеет вид:

$$A(f) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) IH(f) \left(\frac{S_{уГ}}{jf} \right) \left(\frac{1}{N_{ном}} \right) \quad (7)$$

При этом передаточная функция аккумулятора ДДПКД для $f \ll \frac{1}{T}$ запишется, как:

$$\frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{e^{-j2\pi fT}}{1 - e^{-j2\pi fT}} \approx \frac{1 - j2\pi fT}{1 - (1 - j2\pi fT)} \approx \frac{1}{j2\pi fT} \quad (8)$$

Преобразуем модель, изображенную на рис. 3, к более удобному для расчета виду, представленному на рис. 4.

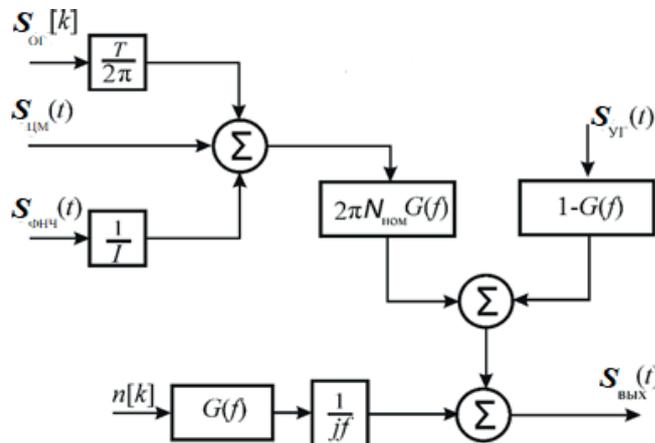


Рис. 4. Модель синтезатора частот для расчета шумовых характеристик.

При выборе пассивного петлевого фильтра следует иметь в виду, что наибольший вклад в итоговый уровень шума системы будет иметь используемое сопротивление [8].

Для генераторов одним из основных параметров является уровень шумов при отстройке от центральной частоты на определенную величину. При использовании таких данных возможно воссоздать характеристику распределения СПМ паразитных флукутаций фазы [9], таким образом, подобрав коэффициенты степенной функции. Для подтверждения теоретических выводов используем коэффициенты, приведенные в табл. 2 [10].

Таблица 2. Теоретические значения коэффициентов [10]

Компонент	Коэффициент γ_α	Значение
Опорный генератор	γ_2	10^{-14}
	γ_1	10^{-13}
	γ_0	10^{-10}
	γ_{-1}	10^{-7}
Цифровой модуль	γ_2	10^{-16}
	γ_1	10^{-13}
ФНЧ	γ_2	10^{-11}
Управляемый генератор	γ_2	10^{-14}
	γ_1	10^{-14}
	γ_0	10^{-10}
	γ_{-1}	10^{-5}

На рис. 5 изображен итоговый уровень моделирования паразитных флукутаций фазы на выходе СЧ. Как видно из рис. 5, наибольший вклад в итоговый уровень фазовых шумов в выходном сигнале СЧ вносит работа цифрового модуля.

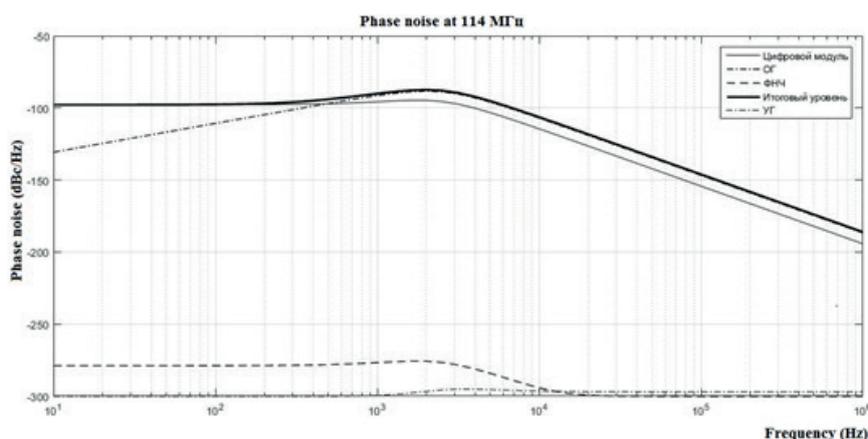


Рис. 5. Итоговый уровень шумов образованных работой компонентов схемы.

3. Сравнение полученных результатов моделирования

Сравним результаты, полученные с помощью представленного алгоритма, с результатами моделирования СЧ на микросхеме ADF4118 в узкоспециализированном пакете моделирования ADIsimPLL от фирмы Analog Devices [9] (рис. 6).

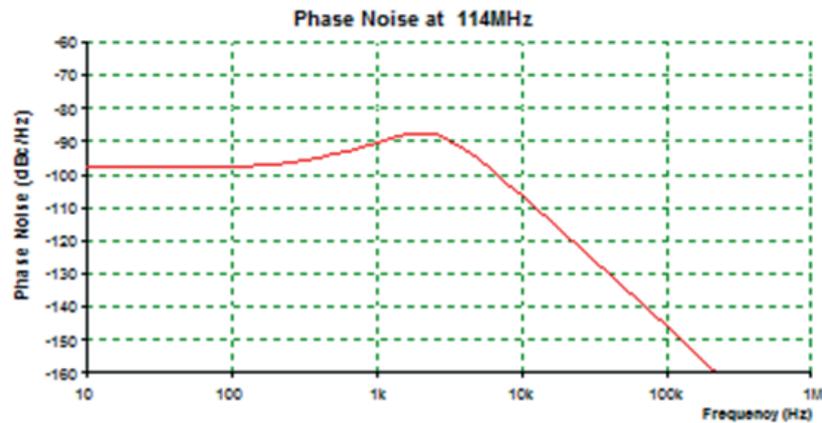


Рис. 6. Результат расчета фазовых шумов для СЧ, построенного на основе микросхемы ADF 4118 в программе ADIsimPLL.

Из этого сравнения (рис. 5 и 6) можно сделать вывод о целесообразности и простоте использования полученной модели при расчете фазовых шумов для интегральных микросхем различных производителей, не прибегая к использованию узкоспециализированного программного обеспечения.

Заключение

Представленная модель расчета уровня паразитных фазовых флуктуаций позволяет на этапе проектирования оценить уровень средней плотности мощности шума в выходном сигнале СЧ без использования специализированного программного обеспечения. Для использования модели достаточно определить структуру проектируемого СЧ и подходящую элементную базу.

Литература:

1. Качармина Е.Г., Толкачев П.А., Шахтарин Б.И. Полиномиальная модель расчета уровня шумов в синтезаторах частот // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 2. С. 41–47.
2. Norsworthy S.R., Schreier R., Temes G.C. Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation. IEEE PRESS, 1997. P. 165–192.
3. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты. М.: Радио и связь, 1989. 232 с.
4. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. С. 9–13.
5. Limkumnerd S., Eungdamrong D. Mathematical models and simulations of phase noise in phase-locked loops // Songklanakarin J. Sci. Technol. 2007. V. 29. № 4. P. 1017–1028.
6. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование: пер. с англ. / Под ред. А.С. Галина. М.: Связь, 1979. 384 с.
7. Шахтарин Б.И. Синтезаторы частот. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. С. 20–23.
8. Drucker E. Model PLL dynamics and phase-noise performance // Microwaves & RF. 2000. V. 39. № 2. P. 88–96.
9. Толкачев П.А. Методики увеличения качества спектра выходного сигнала для син-

тезатора частот косвенного синтеза с делителем с переменным коэффициентом деления // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 7. С. 309–313.

10. Woogeun Rhee, Ni Xu, Bo Zhou, Zhihua Wang. Fractional-N frequency synthesis: overview and practical aspects with FIR-embedded design // J. Semicond. Technol. and Sci. 2013. V. 13. № 2. P. 170–183.

References:

1. Kacharina E.G., Tolkachev P.A., Shakhtarin B.I. Polynomial model for computing noise levels in frequency synthesizers. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* (Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering). 2018; 2: 41-47. (in Russ.)

2. Norsworthy S.R., Schreier R., Temes G.C. Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation. IEEE PRESS, 1997: 165-192.

3. Levin V.A., Malinovsky V.N., Romanov S.K. Frequency synthesizers with a pulse phase locked loop system. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989. 232 p. (in Russ.)

4. Ryzhkov A.V., Popov V.N. Frequency synthesizers in radio technology. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1991: 9-13 (in Russ.)

5. Limkumnerd S., Eungdamrong D. Mathematical models and simulations of phase noise in phase-locked loops. *Songklanakarinn J. Sci. Technol.* 2007; 29(4): 1017-1028.

6. Manasevich V. Frequency synthesizers. Theory and design. Moscow: Svyaz' Publ., 1979. 384 p. (in Russ.)

7. Shakhtarin B.I. Frequency Synthesizers. Moscow: Goryachaya liniya-Telecom Publ., 2007: 20-23. (in Russ.)

8. Drucker E. Model PLL dynamics and phase – noise performance. *Microwaves & RF.* 2000; 39(2): 88-96.

9. Tolkachev P.A. The increasing of output signal for the frequency synthesizers of indirect synthesis with a variable division coefficient divider. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* (Automation. Modern Technologies). 2017; 71(7): 309-313. (in Russ.)

10. Woogeun Rhee, Ni Xu, Bo Zhou, Zhihua Wang. Fractional-N frequency synthesis: overview and practical aspects with FIR-embedded design. *J. Semicond. Technol. and Sci.* 2013; 13(2): 170-183.

Об авторах:

Толкачев Павел Анатольевич, аспирант кафедры специального приборостроения и систем Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Сизых Вадим Витальевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специального приборостроения и систем Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Стариковский Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Pavel A. Tolkachev, Postgraduate Student of the Chair of Special Instrumentation and Systems, Institute of Complex Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Vadim V. Sizykh, D.Sc. (Engineering), Docent, Professor of the Chair of Special Instrumentation and Systems, Institute of Complex Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Anatoly I. Starikovskiy, Ph.D. (Engineering), Docent, Professor of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Толкачев П.А., Сизых В.В., Стариковский А.И. Модель оценки уровня паразитных фазовых флуктуаций в выходном сигнале синтезатора частот // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 39–48. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-39-48

For citation: Tolkachev P.A., Sizykh V.V., Starikovskiy A.I. Model of evaluating the level of parasitic phase fluctuations in the output signal of the synthesizer of frequencies. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 39-48. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-39-48

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Л.М. Ожерелкова[@],
Е.С. Савин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: lilom@list.ru

Предложена математическая модель процесса нестационарной теплопроводности твердых тел в случае, когда в уравнении теплопроводности нельзя пренебречь зависимостью теплофизических характеристик среды (теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности) от температуры. На основании экспериментальных данных, по температурным зависимостям теплоемкости и коэффициента теплопроводности получены уравнения теплопроводности для случаев высоких ($T \gg \theta$) и низких ($T \ll \theta$) температур (θ – температура Дебая). Установлено, что в обоих случаях полученные зависимости имеют степенной характер, и это позволяет привести исходное уравнение теплопроводности к виду, допускающему применение классического метода разделения переменных при решении соответствующих краевых задач для уравнения теплопроводности. Решение уравнения теплопроводности рассматривается в приближении, в котором длина свободного пробега фононов ограничена и не зависит от температуры, так что температурное поведение коэффициента теплопроводности определяется только температурной зависимостью теплоемкости. Получены точные аналитические решения для краевых задач, моделирующих теплопроводность в диэлектриках и металлах, находящихся в поликристаллическом состоянии. Рассмотрены решения, относящиеся к областям с фиксированными и движущимися границами. При решении краевых задач с движущимися границами в рамках предложенной модели теплопроводности использовано функциональное преобразование специального вида, позволяющее свести исходную задачу к задаче с фиксированными границами, но с преобразованным уравнением теплопроводности. Полученные результаты могут быть использованы в инженерных исследованиях кинетики целого ряда физических и химико-технологических процессов в твердых телах и жидкостях: диффузии, седиментации, вязкого течения, замедления нейтронов, течения жидкостей через пористую среду, электрических колебаний, сорбции, сушки, горения и др.

Ключевые слова: уравнение нестационарной теплопроводности, температура Дебая, высокие и низкие температуры, фиксированные и движущиеся границы.

THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF UNSTEADY HEAT CONDUCTION IN SOLIDS

L.M. Ozherelkova[@],
E.S. Savin

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: lilom@list.ru

A mathematical model of the process of unsteady thermal conductivity of solids is proposed in the case where the dependence of the thermal characteristics of the medium (heat capacity, density and thermal conductivity coefficient) on temperature cannot be neglected in the heat conduction equation. Based on the experimental data equations of thermal conductivity are obtained for the cases of high ($T \gg \theta$) and low ($T \ll \theta$) temperatures (θ is the Debye temperature). Both in the case of high and low temperatures, the temperature dependences of the heat capacity and the thermal conductivity coefficient are power-law, which allows us to bring the original heat conduction equation to a form that allows the use of the classical method of variable separation in solving the corresponding boundary value problems for the heat conduction equation. The solution of the thermal conductivity equation is considered in the approximation, in which the free path of phonons is limited and does not depend on temperature, so that the temperature behavior of the thermal conductivity coefficient is determined only by the temperature dependence of the heat capacity. Exact analytical solutions for boundary value problems modeling thermal conductivity in dielectrics and metals in the polycrystalline state are obtained. The solutions relating to both areas with fixed and moving boundaries are considered. In order to solve boundary value problems with moving boundaries, in the framework of the proposed model of thermal conductivity, the functional transformation of a special kind is used. This allows reducing the original problem to the problem with fixed boundaries, but with the transformed heat conduction equation. The obtained results can be used in engineering studies of the kinetics of some physical and chemical processes in solids and liquids – diffusion, sedimentation, viscous flow, neutron deceleration, fluid flow through a porous medium, electrical oscillations, sorption, drying, combustion, etc.

Keywords: equation of unsteady thermal conductivity, Debye temperature, high and low temperatures, fixed and moving boundaries.

Введение

В общем случае в уравнении нестационарной теплопроводности твердых тел при отсутствии внутренних источников тепловыделения [1]:

$$C\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}T) \quad (1)$$

теплофизические характеристики среды C , ρ и λ (C – теплоёмкость, ρ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности) зависят от координат и температуры.

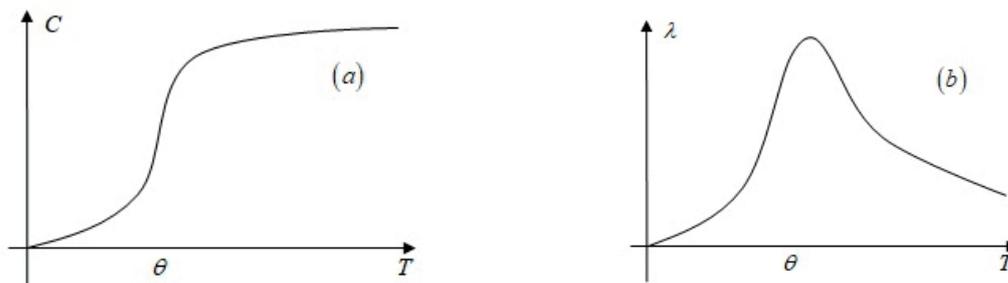
В основном рассматривают случаи, когда в уравнении (1) все коэффициенты считаются постоянными и равными средним их значениям. Такое предположение справедливо, если теплофизические свойства материала меняются незначительно (изотропное гомогенное твердое тело, узкий температурный интервал). На практике, однако, для ряда материалов неоднородность физических свойств оказывается настолько значительной, а изменение свойств по координатам столь существенно, что в (1) необходимо учитывать зависимость коэффициентов переноса от пространственных координат [1]. Зависимость коэффициентов переноса от температуры, когда процесс теплопроводности протекает в большом интервале изменения температуры, исследована в меньшей степени [2]. В последнем случае поток тепла становится нелинейным, и для определения температурного поля необходимо решать краевые задачи для нелинейного дифференциального уравнения, что связано с большими вычислительными трудностями.

В представленной работе рассматривается задача определения температурной зависимости нестационарной теплопроводности твердых тел.

Уравнение теплопроводности при решении данной задачи будет иметь вид¹:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

В настоящее время полученные теоретические зависимости $C(T)$ и $\lambda(T)$ хорошо согласуются с экспериментальными данными во всей температурной области. В качестве примера на рисунке приведены типичные зависимости теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры [3–6]. Видно, что в подавляющем числе случаев температурная зависимость $C(T)$ и $\lambda(T)$ при высоких ($T \gg \theta$) и низких ($T \ll \theta$) температурах носит степенной характер: $C = aT^\beta$; $\lambda = bT^\alpha$. В каждом из температурных интервалов показатели α и β имеют свое значение.



Типичная температурная зависимость теплоемкости (a) и коэффициента теплопроводности (b) для твердых тел. θ – температура Дебая [3].

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим нестационарную теплопроводность твердых тел с фиксированными и подвижными границами.

1. Фиксированные границы

В температурных интервалах ($T \gg \theta$, $T \ll \theta$) для однородного стержня длины l с принятыми температурными зависимостями теплофизических параметров уравнение (2) принимает вид:

¹В дальнейшем зависимостью $\rho(T)$ по сравнению с зависимостями $C(T)$ и $\lambda(T)$ будем пренебрегать.

$$A \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha T^{\alpha-\beta-1} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + T^{\alpha-\beta} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где $A = \rho a / b$ – постоянная.

Пусть теперь на конце стержня $x = l$ поддерживается постоянная температура $T = 0$, а второй конец $x = 0$ изолирован, так что через него никакого изменения теплового потока не происходит. Этим предположениям отвечают граничные условия:

$$T(l, t) = 0; \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

В начальный момент $t = 0$ распределение температуры в области $0 \leq x \leq l$ задается функцией $f_0(x)$:

$$T(x, 0) = f_0(x) \quad (5)$$

Граничные условия накладывают ограничения на функцию $f_0(x)$:

$$f_0(l); \quad \frac{\partial f_0(0)}{\partial x} = 0$$

Частные решения уравнения (3) будем искать в виде произведения двух функций: $T(x, t) = \Phi(x)G(t)$. Выражение (3) преобразуется к виду:

$$AG^{\beta-\alpha-1} \frac{\partial G}{\partial t} = \alpha \Phi^{\alpha-\beta-2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \Phi^{\alpha-\beta-1} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad (6)$$

Граничные условия при этом принимают вид:

$$\Phi(l, t) = 0; \quad \frac{d\Phi(0, t)}{dx} = 0 \quad (7)$$

Согласно (6), в исходном уравнении теплопроводности (3) переменные x и t разделились. С параметром разделения, равным постоянной величине γ^2 , уравнение (6) разобьется на два:

$$AG^{\beta-\alpha-1} \frac{dG}{dt} = -\gamma^2 \quad (8)$$

$$\Phi \frac{d^2 \Phi}{dx^2} + \alpha \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)^2 = -\gamma^2 \Phi^{\beta-\alpha+2} \quad (9)$$

Решением временного уравнения (8) при $\alpha \neq \beta$ является функция

$$G(t) = \left[\frac{\beta-\alpha}{A} (C_1 - \gamma^2 t) \right]^{\frac{1}{\beta-\alpha}}, \quad (10)$$

где C_1 – постоянная.

После введения новой переменной $\Phi(x) = u^{\frac{1}{\alpha+1}}$ уравнение (9) принимает вид ($\alpha \neq -1$):

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + (\alpha + 1)\gamma^2 u^{\frac{\beta+1}{\alpha+1}} = 0 \quad (11)$$

Граничные условия (7) становятся следующими:

$$u(l) = 0, \quad \frac{du(0)}{dx} = 0 \quad (12)$$

Рассмотрим конкретные случаи, позволяющие получить решение уравнения (11) в явном виде.

Тепло в твердых телах переносится частицами и квазичастицами (электронами, фононами, спиновыми волнами, экситонами и др.). В металлах фактически большую часть тепла переносят свободные электроны, а решетке принадлежит лишь малая часть вклада в теплопроводность. В диэлектриках тепло переносится фононами – квантами поля колебаний атомов кристаллической решетки. Температурная зависимость теплоемкости диэлектриков хорошо изучена теоретически и экспериментально [7, 8]. Для оценки температурной зависимости коэффициента теплопроводности можно воспользоваться известной из кинетической теории газов формулой:

$$\lambda = Cvl_*,$$

где C – теплоемкость газа (в нашем случае газа фононов);

v – средняя величина тепловой скорости частиц (фононов);

l_* – их эффективная длина свободного пробега.

Величина скорости v имеет порядок величины скорости звука. Температурная зависимость v по сравнению с зависимостями $C(t)$ и $l_*(t)$ незначительна. Следовательно, температурная зависимость λ определяется произведением теплоемкости кристалла C и эффективной длины свободного пробега l_* . Эта зависимость будет различна для моно- и поликристаллов.

Монокристаллы, в отличие от поликристаллических и стеклообразных твердых тел, в целом обладают дальним порядком, и препятствовать распространению теплового потока будут только столкновения фононов друг с другом. Поскольку при высоких температурах ($T \gg \theta$) полное число фононов в кристалле пропорционально T , то вероятность рассеяния отдельного фонона, вносящего вклад в тепловой поток, тем выше, чем больше число других фононов, на которых он может рассеяться, поэтому длина свободного пробега должна падать с повышением температуры. Кроме того, поскольку при высоких температурах удельная теплоемкость подчиняется закону Дюлонга и Пти и не зависит от температуры, следует ожидать, что и теплопроводность будет падать с повышением температуры в пределе высоких температур.

В поликристаллических материалах также происходит рассеяние фононов границами зерен, причем эффективность этого процесса выше эффективности фононных столкновений. Вероятность рассеяния границами зерен не зависит от длины волны фонона, так что в таких веществах в широком интервале температур l_* постоянна и, следовательно-

но, теплопроводность пропорциональна теплоемкости. Таким образом, в области температур $T \gg \theta$ и $T \ll \theta$ для поликристаллов и стекол можно принять $\alpha = \beta$. В этом случае решение временного уравнения (8) будет иметь вид:

$$G(t) = C_1 e^{-\frac{\gamma^2}{A} t} \quad (13)$$

Выполнив интегрирование в (11), получим координатное решение:

$$u(x) = A_1 \cos(\gamma\sqrt{\alpha+1} x) + B_1 \sin(\gamma\sqrt{\alpha+1} x), \quad (14)$$

где A_1, B_1 – постоянные, $\alpha > -1$.

Из второго граничного условия (12) следует $B_1 = 0$, и, чтобы выполнялось первое условие (12), необходимо $\gamma\sqrt{\alpha+1} l = \pi(2n-1)/2$ ($n = 1, 2, \dots$). Обозначив $C_1 A_1 \equiv a_n$, частное решение исходного уравнения получим в виде:

$$T_n(x, t) = e^{-\frac{\gamma_n^2}{A} t} \left[a_n \cos(\gamma_n \sqrt{\alpha+1} x) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}, \quad (15)$$

Общее решение возьмем в форме ряда:

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_n^2}{A} t} \left[a_n \cos(\gamma_n \sqrt{\alpha+1} x) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (16)$$

Коэффициенты a_n в (16) находятся из начального условия

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos(\gamma_n \sqrt{\alpha+1} x) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} = f_0(x) \quad (17)$$

Разложим функции, входящие в это уравнение, в ряд Фурье по косинусам:

$$\left[\cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} = \sum_{m=1}^{\infty} b_m(n) \cos \frac{\pi(2m-1)x}{2l} \quad f_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} \quad (18)$$

$$b_m(n) = \frac{2}{l} \int_0^l \left[\cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \cos \frac{\pi(2m-1)x}{2l} dx \quad C_n = \frac{2}{l} \int_0^l f_0(x) \cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} dx$$

С учетом выражений (18) уравнение (17) переписывается в виде:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^{\frac{1}{\alpha+1}} \sum_{m=1}^{\infty} b_m(n) \cos \frac{\pi(2m-1)x}{2l} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} \quad (19)$$

Умножая обе части уравнения (19) на $\cos \frac{\pi(2k-1)x}{2l}$ ($k = 1, 2, \dots$) и интегрируя по x от 0 до l , получим систему алгебраических уравнений для нахождения коэффициентов a_n :

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^{\frac{1}{\alpha+1}} b_k(n) = C_k \quad (20)$$

Вопрос о разрешимости данной бесконечной системы в общем виде не ставится, исследование возможно в частных случаях, при конкретных входных параметрах задачи.

В области высоких температур ($T \gg \theta$) для диэлектриков, находящихся в поликристаллическом состоянии, теплоемкость и коэффициент теплопроводности не зависят от температуры, так что $\alpha = 0$, и из (16) следует:

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_n^2 t}{A}} a_n \cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} \quad (21)$$

Выражение (21) совпадает с результатом, полученным в [9].

В диэлектриках перенос тепла осуществляется фононами, и при низких температурах ($T \ll \theta$) теплоемкость C и коэффициент теплопроводности λ пропорциональны T^3 [3]. Соответственно, тогда $\alpha = 3$, так что решение (16) примет вид:

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_n^2 t}{A}} \left[a_n \cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (22)$$

В металлах при низких температурах ($T \ll \theta$) теплоемкость может быть записана в виде суммы двух слагаемых, одно из которых описывает вклад электронов проводимости, а второе – вклад решетки [7, 8]:

$$C(T) = A_1 T + A_2 T^3, \quad (23)$$

где A_1, A_2 – постоянные, характерные для данного металла.

Первое слагаемое (электронная часть теплоемкости) линейно зависит от температуры T и поэтому доминирует при достаточно низких температурах $T \ll (A_1/A_2)^{1/2}$. В этой же области температур коэффициент теплопроводности $\lambda = A_3 T$, где A_3 – постоянная.

Следовательно, параметр $\alpha = 1$, и решение будет иметь вид:

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_n^2 t}{A}} \left[a_n \cos \frac{\pi(2n-1)x}{2l} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

2. Движущиеся границы

Существуют различные подходы при решении краевых задач теплопроводности в области с произвольно движущейся границей [10, 11]. К нашей задаче применимо функциональное преобразование специального вида, основанное на введении подвижной системы координат, в которой подвижная граница становится неподвижной. В результате исходное уравнение теплопроводности преобразуется к виду, допускающему применение классического метода разделения переменных. Рассмотрим поликристаллические материалы, для которых характерна температурная независимость эффективной длины свободного пробега фононов, так что, согласно (12), температурное поведение коэффициента теплопроводности определяется только теплоемкостью. Для случая высоких ($T \gg \theta$) и низких ($T \ll \theta$) температур зависимость теплоемкости от температуры носит степенной характер $C \sim T^\alpha$, где α – параметр, имеющий различное значение в разных частях температурного интервала. В этих условиях уравнение теплопроводности записывается так:

$$A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (25)$$

Граничные условия выберем в виде

$$T(l, t) = T_0, \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0, \quad (26)$$

где по условию $l = l(t) = l_0 f(t)$, $f(t)$ – заданная функция времени. Начальное условие выберем в виде $T(x, 0) = f_0(x)$.

Введение новой переменной $y = x/f(t)$ преобразует (25) к виду:

$$A \left[f^2 \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{y}{2} \frac{d}{dt} (f^2) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\alpha}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (27)$$

Функция $T(y, t)$ удовлетворяет граничным условиям на неподвижных границах:

$$T(l_0, t) = T_0, \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial y} = 0 \quad (28)$$

Начальное условие – $T(y, 0) = f_0(y)$.

Для произвольного вида функции $f(t)$ точное решение уравнения (27) невозможно. Приближенное решение может быть найдено, в частности, по теории возмущений – в случае, если $f(t)$ слабо зависит от времени. Из вида выражения (27) следует, что при специальном выборе $f(t)$, а именно, если f^2 линейно зависит от времени, переменные y и t разделяются. Таким особым случаем, в частности, является функция

$$f(t) = \sqrt{1 + \frac{t}{t_0}}, \quad (29)$$

где t_0 – произвольная постоянная.

Такой выбор $f(t)$ удовлетворяет, в частности, начальному условию $f(0) = 1$, т. е. $l(0) = l_0$.

Подставляя (29) в (27) и перенося начало отсчета времени заменой $t + t_0 = \tau$, получаем:

$$A \left(\frac{\tau}{t_0} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{y}{2t_0} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\alpha}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (30)$$

Представим функцию $T(y, \tau)$ в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от времени, другая – от координаты:

$$T(y, \tau) = G(\tau)F(y) \quad (31)$$

В уравнении (30) с функцией $T(y, \tau)$ вида (31) переменные разделяются, и мы получаем два уравнения для нахождения $F(y)$ и $G(\tau)$:

$$A \frac{\tau}{t_0} \frac{1}{G} \frac{dG}{d\tau} = -\gamma^2, \quad (32)$$

$$\frac{d^2 F}{dy^2} + \frac{\alpha}{F} \left(\frac{dF}{dy} \right)^2 + \frac{A}{2t_0} y \frac{dF}{dy} = -\gamma^2 F, \quad (33)$$

где γ^2 – параметр разделения.

Решением временного уравнения (32) является функция

$$G(\tau) = C_1 \tau^{\frac{-\gamma^2}{A} t_0} \quad (34)$$

Уравнение (33) после введения новой переменной $F = u^{\frac{1}{\alpha+1}}$ ($\alpha \neq -1$) становится линейным:

$$\frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{A}{2t_0} y \frac{du}{dy} + (\alpha+1)\gamma^2 u = 0 \quad (35)$$

Введение переменных $u = \varphi \exp(-t)$, $y = (4t_0 t/A)^{\frac{1}{2}}$ приводит уравнение (35) к стандартному виду вырожденного гипергеометрического уравнения:

$$t \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(\frac{1}{2} - t\right) \frac{d\varphi}{dt} - \left[\frac{1}{2} - \frac{t_0}{A}(\alpha+1)\gamma^2\right] \varphi = 0 \quad (36)$$

Согласно [12], его решением является функция

$$\varphi(t) = C_2 \Phi\left(a_1, \frac{1}{2}; t\right) + C_3 t^{1/2} \Phi\left(a_1 + \frac{1}{2}, \frac{3}{2}; t\right),$$

где C_2, C_3 – постоянные;

$\Phi(a, b; c)$ – вырожденная гипергеометрическая функция;

$$a_1 = \frac{1}{2} - \frac{t_0}{A}(\alpha+1)\gamma^2.$$

Для функции $u(y)$ получаем ($k = A/4t_0$):

$$u(y) = e^{-ky^2} \left[C_2 \Phi\left(a_1, \frac{1}{2}; ky^2\right) + C_3 \sqrt{k} y \Phi\left(a_1 + \frac{1}{2}, \frac{3}{2}; ky^2\right) \right] \quad (37)$$

Используя граничное условие $\left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$, так что $\partial u / \partial y = 0$, получим $C_3 = 0$.

Выражение (37) принимает вид:

$$u = C_2 e^{-ky^2} \Phi\left(a_1, \frac{1}{2}; ky^2\right) \quad (38)$$

Коэффициент C_2 находится из второго граничного условия ($u(t_0) = T_0$):

$$C_2^{-1} = \frac{1}{T_0} e^{-kl_0^2} \Phi\left(a_1, \frac{1}{2}; kl_0^2\right)$$

Так как решение уравнения (25) должно быть ограниченной функцией для любых значений координаты x ($0 \leq x \leq l(t)$), то и функция $u(y)$ должна быть ограниченной при всех значениях координаты y ($0 \leq y \leq l_0$). Необходимо, чтобы вырожденная гипергеометрическая функция $\Phi(a, b; c)$ была полиномом степени $|a|$. Выполнение этого условия требует, чтобы

первый аргумент a функции $\Phi(a, b; c)$ принимал целые отрицательные значения (или ноль). Таким образом, должно быть $a_1 = -n$ ($n = 0, 1, \dots$). С учетом явного вида a_1 , получим:

$$\gamma \equiv \gamma_n = \sqrt{\frac{A(n+1/2)}{t_0(\alpha+1)}}$$

Частное решение будет иметь вид:

$$u_n(y) = C_2 e^{-ky^2} \Phi\left(-n, \frac{1}{2}; ky^2\right) \quad (39)$$

Выражение (39) представим через более простую функцию – четный полином Эрмита [13]:

$$H_{2n}(z) = (-1)^n \frac{(2n)!}{n!} \Phi\left(-n, \frac{1}{2}; z^2\right) \quad (40)$$

Принимая во внимание (40), для координатной функции $F(y)$ получим:

$$F_n^{\alpha+1}(y) = C_2 \left[\frac{(-1)^n n!}{(2n)!} \right] e^{-ky^2} H_{2n}(\sqrt{k}y) \quad (41)$$

Для общего решения $T(y, \tau)$, являющегося суперпозицией частных решений (34) и (41), находим:

$$T(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \tau^{-\frac{\gamma_n^2 t_0}{A}} \left[e^{-ky^2} H_{2n}(\sqrt{k}y) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}, \quad (42)$$

где $C_n = C_1 \left[\frac{(-1)^n n! C_2}{(2n)!} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}$

Коэффициенты C_n находятся из начального условия $T(y, \tau_0) = f_0(y)$:

$$\sum_{n=1}^{\infty} C_n \tau_0^{-\frac{\gamma_n^2 t_0}{A}} \left[e^{-ky^2} H_{2n}(\sqrt{k}y) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} = f_0(y) \quad (43)$$

Разложим функции, входящие в (43), в ряд Фурье по косинусам:

$$\left[e^{-ky^2} H_{2n}(\sqrt{k}y) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} = \sum_{m=1}^{\infty} b_m(n) \cos \frac{\pi m y}{l_0}$$

$$b_m(n) = \frac{2}{l_0} \int_0^{l_0} \left[e^{-ky^2} H_{2n}(\sqrt{k}y) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \cos \frac{\pi m y}{l_0} dy$$

$$f_0(y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \frac{\pi n y}{l_0}, \quad C_n = \frac{2}{l_0} \int_0^{l_0} f_0(y) \cos \frac{\pi n y}{l_0} dy$$

Поступив далее так же, как и в первом случае, для нахождения коэффициентов a_n получим систему алгебраических уравнений вида (20).

Заключение

К настоящему времени наиболее полно изучено решение уравнения нестационарной теплопроводности для случая высоких температур ($T \gg \theta$), поскольку в данной области температур теплофизические характеристики уравнения (теплоемкость C и коэффициент теплопроводности λ), согласно экспериментальным и теоретическим данным, не зависят от температуры и считаются постоянными. В общем случае температурной зависимости $C(T)$ и $\lambda(T)$ общее решение уравнения теплопроводности получить не удастся. В рассматриваемом нами частном случае, когда зависимость C и λ от температуры в определенных частях температурного интервала носит степенной характер, получено точное аналитическое решение уравнения нестационарной теплопроводности как с фиксированными, так и с движущимися границами.

Полученные результаты можно применить в современных инженерных исследованиях в машиностроительной, энергетической, атомной промышленности, в технологических процессах химической, строительной, текстильной, пищевой, геологической и других отраслей.

Литература:

1. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений. М.: Ленанд, 2018. 1072 с.
2. Голодная В.В., Савин Е.С. Нестационарная теплопроводность цепных структур при низких температурах // Тонкие химические технологии. 2017. Т. 12. № 4. С. 91–97.
3. Займан Дж. Электроны и фононы. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 488 с.
4. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. СПб.: Лань, 2011. 288 с.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
6. Бутягин П.Ю. Химическая физика твердого тела. М.: Издательство МГУ, 2006. 272 с.
7. Василевский А.С. Физика твердого тела. М.: Дрофа, 2010. 208 с.
8. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. 2. М.: Мир, 1979. 422 с.
9. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 3. М.: Физматлит, 2008. 728 с.
10. Карташов Э.М., Антонова И.В. Гиперболические модели нестационарной теплопроводности // Тонкие химические технологии. 2016. Т.11. № 2. С. 74–80.
11. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. М.: Либроком, 2018. 656 с.
12. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Физматлит, 2001. 576 с.
13. Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложения. СПб.: Лань, 2010. 368 с.

References:

1. Kartashov E.M., Kudinov V.M. Analytical methods of heat conduction theory and its applications. M.: Lenand Publ., 2018. 1072 p. (in Russ.)
2. Golodnaya V.V., Savin E.S. Unsteady thermal conductivity of chain structures at low temperatures. *Tonkie khimicheskie tekhnologii (Fine Chemical Technologies)*. 2017; 12(4): 91-97. (in Russ.)

3. Ziman J.M. Electrons and phonons. M.: Izdatel'stvo inostrannoy literatury (Foreign Literature Publishing House), 1962. 488 p. (in Russ.)
4. Epifanov G.I. Physics of the solid state. St. Petersburg: Lan' Publ., 2011. 288 p. (in Russ.)
5. Kittel C. Introduction to solid state physics. Moscow: Nauka Publ., 1978. 792 p. (in Russ.)
6. Butyagin P.Yu. The chemical physics of solid body. Moscow: MSU Publishing House, 2006. 272 p. (in Russ.)
7. Vasilevsky A.S. Physics of the solid state. M.: Drofa Publ., 2010. 208 p. (in Russ.)
8. Ashcroft N., Mermin N. Physics of the solid state. V. 2. Moscow: Mir Publ., 1979. 422 p. (in Russ.)
9. Fichtenholz G.M. Course of differential and integral calculus. V. 3. Moscow: Fizmatlit Publ., 2008. 728 p. (in Russ.)
10. Kartashov E.M., Antonova I.V. Hyperbolic models of unsteady thermal conductivity. *Tonkie khimicheskie tekhnologii (Fine Chemical Technologies)*. 2016; 11(2): 74-80. (in Russ.)
11. Kartashov E.M., Kudinov V.M. Analytical theory of heat conduction and applied thermoelasticity. Moscow: Librokom Publ., 2018. 656 p. (in Russ.)
12. Zaytsev V.F., Polyinin A.D. Ordinary differential equations. Moscow: Fizmatlit Publ., 2001. 576 p. (in Russ.)
13. Lebedev N.N. Special functions and their applications. St. Petersburg: Lan' Publ., 2010. 368 p. (in Russ.)

Об авторах:

Ожерелкова Лилия Мухарамовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей и прикладной математики Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Савин Евгений Степанович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией кафедры высшей и прикладной математики Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

About the authors:

Liliya M. Ozherelkova, Ph.D. (Eng.), Docent, Associate Professor of the Chair of Higher and Applied Mathematics, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia).

Evgeniy S. Savin, Ph.D. (Phys.-Math.), Head of Laboratory of the Chair of Higher Mathematics and Applied Mathematics, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia).

Для цитирования: Ожерелкова Л.М., Савин Е.С. Температурная зависимость нестационарной теплопроводности твердых тел // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 49–60. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60

For citation: Ozherelkova L.M., Savin E.S. The temperature dependence of unsteady heat conduction in solids. *Rossiyskiy tekhnologicheskij zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 49-60. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Д.А. Петрусевич

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: petrusevich@mirea.ru

В представленной работе рассмотрена структура благосостояния граждан Российской Федерации за период 2000–2018 гг. В первой части статьи проанализированы данные репрезентативной выборки Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения (РМЭЗ, RLMS) по индивидам в 2008–2017 гг., построены квантили 10%–95% по заработной плате с учетом годовой инфляции и проанализированы их колебания и изменения за 10 лет. Во второй части статьи приведен временной ряд индекса реальной заработной платы из набора динамических рядов макроэкономической статистики РФ в 2000–2018 гг. Выполнено моделирование временного ряда с помощью математических моделей $ARIMA(p, d, q)$: построен стационарный временной ряд по данным индекса заработной платы. Результаты прогноза модели, найденной автоматически среди моделей $ARIMA(p, d, q)$ с показателями $d \leq 5$, $p \leq 5$, сопоставлены с прогнозами моделей, полученных при $p = 6$ или $q = 6$ по двум метрикам. Указано значение информационного критерия Акаике (AIC) для построенных моделей. Предложены модели с $p = 6$ и $q = 6$, которые дают прогноз лучший, чем автоматически подобранная модель с показателями $d \leq 5$, $p \leq 5$. Это связано с сезонными факторами, присущими индексу заработной платы, из-за которых при прогнозировании следует учитывать данные 6-ти- и 12-ти-месячной давности. Показано, что индекс заработной платы достигает пика приблизительно раз в 6 месяцев, что связано с отпускными выплатами, приходящимися, в основном, на конец года и на летние месяцы. Дальнейшие исследования могут быть направлены на более совершенную по качеству декомпозицию временного ряда на тренд, сезонную составляющую и шум, а также на сравнение методик вычисления коэффициентов моделей $ARIMA$ в разных статистических пакетах.

Ключевые слова: Российский мониторинг экономического положения населения, РМЭЗ, RLMS, квантили, индекс реальной заработной платы, $ARIMA$, стационарность, временные ряды, прогнозирование, информационный критерий Акаике.

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS USED FOR ECONOMETRICAL TIME SERIES FORECASTING

D.A. Petrusevich

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: petrusevich@mirea.ru

In the paper changes of the Russian citizens' welfare are explored. The time lapse of the data is: 2000–2018. In the first part of the paper the representative individual samples of “The Russian Longitudinal Monitoring Survey – Higher School of Economics (RLMS-HSE)” data of the 2008–2017 time period are analyzed. The 10%–95% quantiles of the salary have been constructed with the regard to year inflation, and their behavior has been analyzed. In the second part the monthly wage index based on the dynamic series of macroeconomic statistics of the Russian Federation data (2000–2018) has been explored. The mathematical models of the wage of this time lapse have been presented. They are based on the ARIMA (p, d, q) models with $d \leq 5$, $p \leq 5$. Forecasts of these models have been compared to predictions of the models with parameters $p = 6$ or $q = 6$. The constructed models have made better forecast than the automatically fitted ARIMA model with $d \leq 5$, $p \leq 5$. They have been compared using two metrics, and also the Akaike information criterion (AIC) has been considered. The seasonal factors of the wage index have been taken into account. It has been shown that the lags of 6 and 12 months are connected to the today wage index; there are maxima of this value situated at the end of the year or in summer. It's explained with the vacations which traditionally take place in summer, and also officially held vacations in January. The further research is going to target the trend – seasonal – noise decomposition of time series. Statistical packages which are often in use have got different methods to compute the ARIMA coefficients. That fact is also going to be under research.

Keywords: Russian Longitudinal Monitoring Survey, RLMS, quantiles, real salary index, ARIMA, stationarity, time series, prediction, forecast, Akaike informational criterion.

В представленном исследовании рассмотрено изменение структуры благосостояния граждан Российской Федерации за период 2000–2018 гг.: в первой части статьи проанализированы данные репрезентативной выборки Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения (РМЭЗ, RLMS) по индивидам. Каждый год в этом исследовании представлен данными определенной «волны»: 26-й волне соответствует 2017 году, данные 25-й волны относятся к 2016 году и т. д. В рамках работы рассмотрена информация, начиная с 18-й волны (соответствующей 2008 году), до 26-й волны (за 2017 год) [1]. Во второй части рассмотрен временной ряд индекса реальной заработной платы из набора динамических рядов макроэкономической статистики РФ [2] за периоды 2000–2013 гг., 2000–2018 гг.

В первой части исследования собрана статистика по таким показателям, как, например, заработная плата, семейное положение, наличие высшего образования; есть ли в

компании, где работает индивид, иностранное или государственное участие, и т. д. На этапе предобработки данных были исключены записи, в которых отсутствуют показатели по заработной плате респондента, и учтена годовая инфляция. Для оставшейся выборки граждан построены квантили 10%–90% с шагом 10%, а также квантиль 95% по заработной плате (рассматривался «усредненный индивид», заработная плата у которого выше, чем у соответствующей доли респондентов в выборке). На взгляд автора, не имеет смысла проводить анализ данных ранее 2008 года, поскольку характер развития российской экономики изменился, и прогнозы [3, 4], которые построены по более ранним данным, окажутся несостоятельными. Оперирование средними показателями заработной платы также не создаст объективного представления о действительности, так как усреднение в рамках одной математической модели информации об условно «богатых» и об условно «бедных» дает результат, далекий и от тех, и от других. Графики зависимости квантилей от года представлены на рис. 1–3.

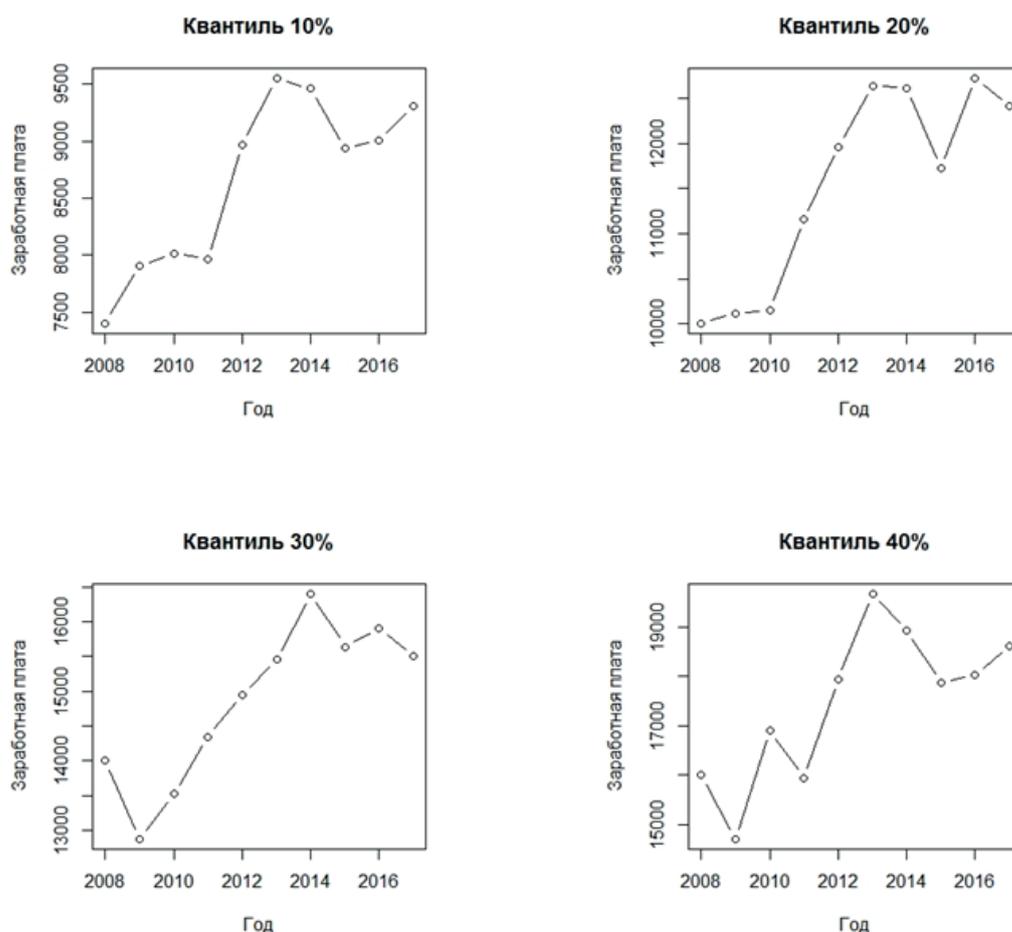


Рис. 1. Зависимость квантилей 10%, 20%, 30%, 40% по заработной плате от года (по данным репрезентативной выборки Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения (РМЭЗ, RLMS) по индивидам).

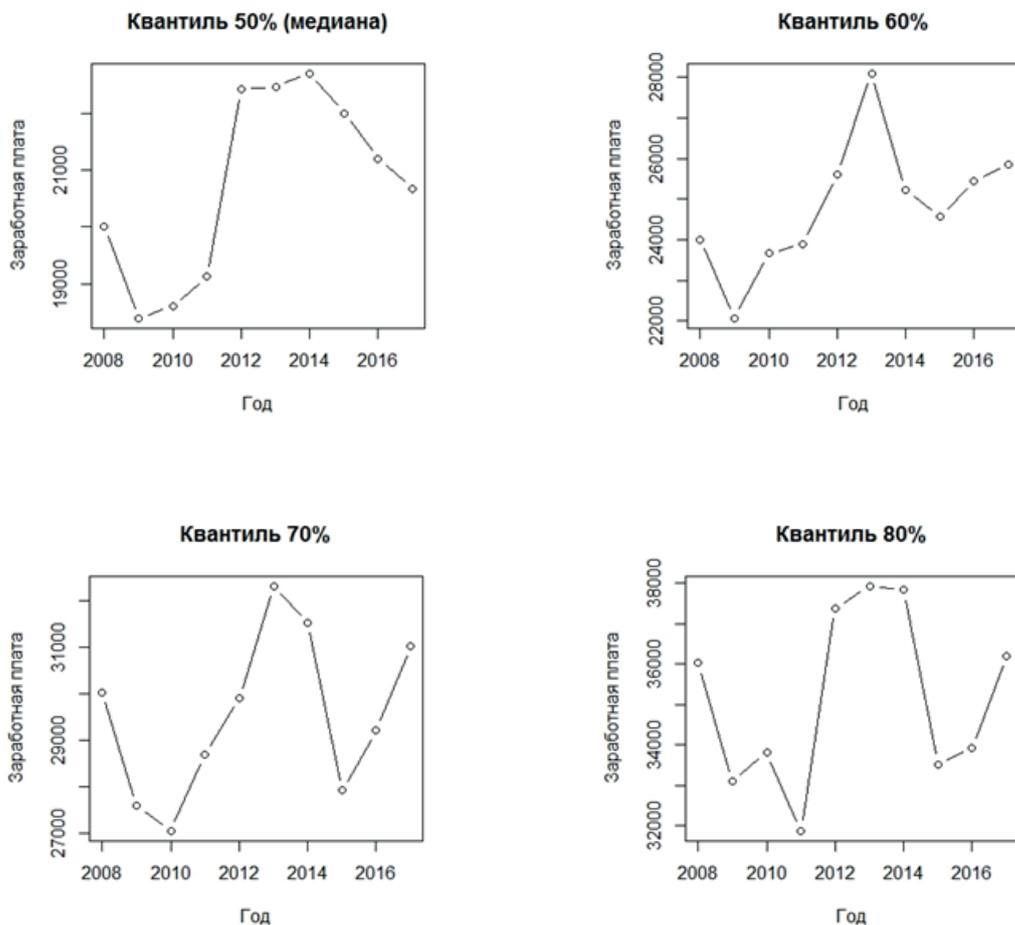


Рис. 2. Зависимость квантилей 50%, 60%, 70%, 80% по заработной плате от года (по данным репрезентативной выборки Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения (РМЭЗ, RLMS) по индивидам).

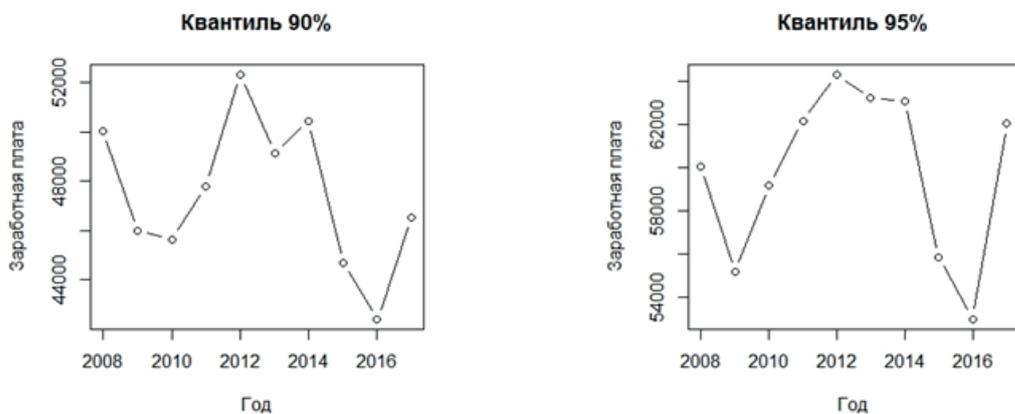


Рис. 3. Зависимость квантилей 90%, 95% по заработной плате от года (по данным репрезентативной выборки Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения (РМЭЗ, RLMS) по индивидам).

Следует отметить, что на всех графиках хорошо виден экономический спад 2008 г., а также кризис 2014 г., связанный с политической ситуацией на Украине и его экономическими последствиями. Между этими событиями закономерно наблюдается динамика роста заработной платы [5]. После 2016 года в квантилях более 50% (60, 70, 80, 90 и 95) наблюдается рост заработной платы. В квантилях 50% и ниже ситуация, в целом, другая: или явной тенденции к росту или падению нет (10%–40%), или продолжается падение зарплаты (квантиль 50%). Это свидетельствует о том, что условно «бедный» сегмент населения находится в состоянии стагнации или демонстрирует ухудшение собственного благосостояния. Если рассматривать абсолютные показатели, то отдельно стоит подчеркнуть, что рост заработной платы в период 2008–2017 гг. незначителен либо наблюдается некоторый ее спад. Указанные показатели существенно отличаются от экономических характеристик развитых стран [3].

Во второй части исследования проанализирован месячный показатель индекса реальной заработной платы за 2000–2017 гг. [2, 6, 7]. Графики этого временного ряда, его автокорреляционной функции и частной автокорреляционной функции [8–10] представлены на рис. 4. Обращает внимание факт, что автокорреляционная функция и частная автокорреляционная функция определены только для стационарных процессов [10–12], но, при этом, даже в случае нестационарного временного ряда они вполне адекватно описывают изменения процесса.

Показатель заработной платы по своей сути в общем случае нестационарен: математическое ожидание этой величины зависит от многих факторов, таких, как: социально-экономические показатели, дисбаланс на рынке труда и т. п. Он обычно имеет тенденцию к росту или падению в течение нескольких лет; дисперсия заработной платы в разные годы может быть различной. В рамках исследования рассмотрено два периода: 2000–2013 гг. и 2000–2018 гг., поскольку факторы, которые начали влиять на уровень благосостояния российских граждан в 2014 г. и позже, имеют выраженный неэкономический характер (например, «санкции») и не вписываются в собственную логику изменения величины зарплаты. Периоды 2000–2012 гг. и 2000–2017 гг. взяты в качестве обучающей выборки, а их прогнозы, соответственно, на 2013 г. и 2018 г. сравнивались с данными, зафиксированными в реальности.

Для проверки стационарности рядов проведен тест Дикки-Фуллера (пакет `aTSA` языка R) [8, 9, 13], в котором строятся специальные регрессии с использованием значений временного ряда за несколько прошедших месяцев (номер лага показывает, данные скольких последних месяцев учитываются в тесте). В табл. 1 указан уровень значимости при проверке нулевой гипотезы о нестационарности ряда: $p \leq 0.01$ означает, что гипотеза отвергается, ряд стационарен; $p \geq 0.01$ – ряд не является стационарным. Для временного ряда результаты теста с точностью до 0.01 приведены в табл. 1.

В целом, по приведенным результатам для обоих периодов гипотеза о нестационарности процесса подтверждается. В полученных данных присутствует тренд, демонстрирующий рост заработной платы.

Для приведения временного ряда к стационарному виду построен ряд из разностей показателей соседних периодов месячного показателя индекса заработной платы $wage$:

$$\Delta_i = wage_{i+1} - wage_i \quad (1)$$

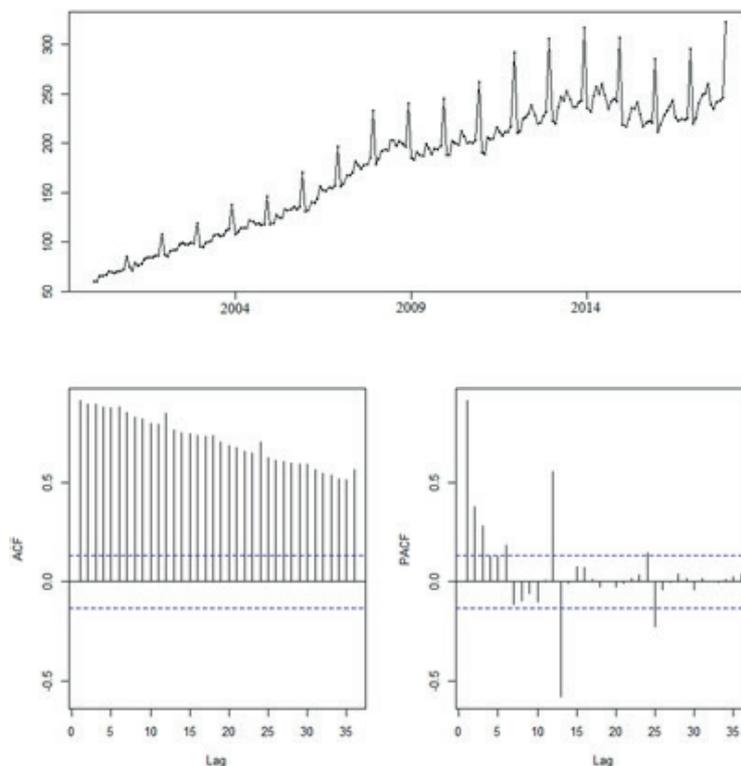


Рис. 4. Графики временного ряда месячного показателя заработной платы в период 2000–2018 гг. (вверху), автокорреляционной функции АСФ и частной автокорреляционной функции PACF.

Таблица 1. Результаты проверки стационарности временного ряда заработной платы (в месяц) с помощью теста Дикки-Фуллера

Тип теста	Лag 1	Лag 2	Лag 3	Лag 4	Лag 5
Нет сдвига, нет тренда	0.61	0.79	0.92	0.96	0.99
Сдвиг (drift), нет тренда	0.10	0.45	0.61	0.64	0.64
Сдвиг (drift) и тренд	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	0.07	0.35

Согласно [10, 11], рассмотрев последовательные разности ограниченного порядка, можно получить стационарный ряд. Модель разности первого порядка заработной платы удовлетворяет условиям стационарности по тесту Дикки-Фуллера [8, 9, 13]; результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты проверки стационарности разности 1-го порядка временного ряда заработной платы (в месяц) с помощью теста Дикки-Фуллера

Тип теста	Лag 1	Лag 2	Лag 3	Лag 4	Лag 5
Нет сдвига, нет тренда	≤ 0.01				
Сдвиг (drift), нет тренда	≤ 0.01				
Сдвиг (drift) и тренд	≤ 0.01				

Из результатов теста следует вывод (общий для рядов 2000–2012 гг. и 2000–2017 гг.), что необходимо перейти к ряду разностей первого порядка, который можно в рамках исследования считать стационарным. На рис. 5 представлены графики автокорреляционной функции и частной автокорреляционной функции для разности 1-го порядка.

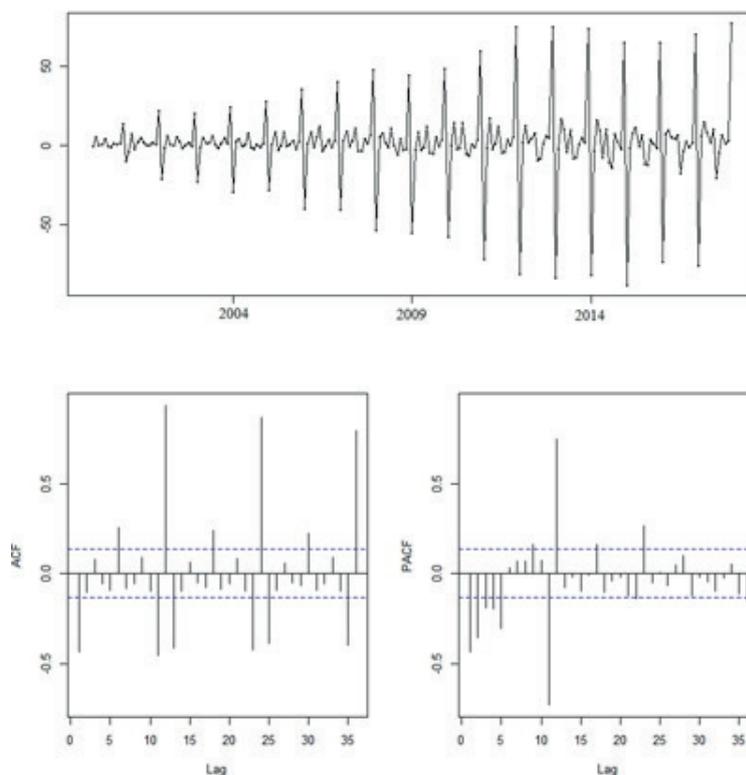


Рис. 5. Графики временного ряда разности первого порядка месячного показателя заработной платы (вверху), ее автокорреляционной функции ACF и частной автокорреляционной функции PACF.

Комбинация моделей авторегрессии $AR(p)$ порядка p и скользящего среднего $MA(q)$ порядка q позволяет описать часто встречающиеся в эконометрике стационарные процессы, поэтому при моделировании временных рядов и прогнозировании принято их выражать в виде процессов $ARMA(p, q)$ [8–12]. В связи с тем, что описывается не сама величина заработной платы, а ряд разностей 1-го порядка, получен процесс $ARIMA(p, 1, q)$, где p – порядок модели авторегрессии, q – порядок модели скользящего среднего, 1 – порядок рассматриваемой разности [8–10]. Чтобы найти характеристики p, q в рамках языка R , необходимо воспользоваться функцией автоматического поиска наиболее подходящего процесса по данным временного ряда $auto.arima()$. В ней использовано ограничение: рассматриваются ряды с величинами p, q менее 6. Таким образом, не рассматриваются более сложные модели, которые могли бы лучше описать процесс. В рамках исследования для двух периодов произведен поиск удачных моделей временных рядов 6-го порядка и выше для описания изменения заработной платы со временем.

На рис. 5 представлен график для обоих временных рядов, на котором отчетливо видна сезонность: пики автокорреляционной функции и частной автокорреляционной функции приходятся на 12-й, 24-й лаг и т. д., а также на 1-2 соседних лага. При построении математической модели временного ряда этот факт учтен во всех вычислительных

экспериментах. Кроме того, наблюдается всплеск в районе 6-го месяца, что не находит наглядного отражения в моделях, построенных автоматически. На графике частной автокорреляционной функции прослеживается также зависимость заработной платы от значений последних 5 месяцев (в случае ряда 2000–2012 гг. для лагов трех- и четырехмесячной давности зависимость выражена менее явно). Отсюда следует заключить, что для прогнозирования временного ряда заработной платы необходимо проверить модели 6-го порядка по параметрам p или q : $ARIMA(p, 1, q)$, $p = 6, q \leq 6$ или $q = 6, p \leq 6$ [8–10].

Ниже (табл. 3, 4) приведены результаты вычислительного эксперимента: по данным периодов 2000–2012 гг. и 2000–2017 гг. построены математические модели $ARIMA(p, 1, q)$: использованы соответствующие функции пакета *stats* языка R. Функции прогнозирования в статистических пакетах языка R основаны на модели Бокса-Дженкинса [8–10] и опираются на теорему Волда (Wold) [8–12]. В первой строке указан результат автоматического поиска функцией *auto.arima()* из пакета *stats* языка R, а затем результаты других моделей 6-го порядка [8, 9]. Для каждой модели рассчитан информационный критерий Акаике AIC (чем ниже значение, тем лучше модель описывает данные) в первом столбце, а затем дается сравнение прогноза, который та или иная модель дает на следующий год, с реальными данными¹: во втором столбце евклидово расстояние вектора прогноза от вектора реальных показателей; в третьем – разность прогноза и реальных показателей, что позволяет понять, в какую сторону «модель ошибается» (если прогнозируемые показатели выше, чем реальные, то значение в таблице положительное; если прогноз более пессимистичен, чем оказались показатели в реальности, то отрицательное) [14–17]. В качестве сезонного показателя для моделей $ARIMA$ во всех экспериментах установлено значение, найденное функцией *auto.arima()*. Жирным шрифтом в табл. 3 и 4 отмечены модели, прогнозы которых превосходят по качеству прогноз, выполненный моделью, подобранной автоматически.

Таблица 3. Сравнение параметров моделей по критерию Акаике AIC и сопоставление предсказаний на 2013 г. с реальными показателями

Модель временного ряда	Информационный критерий Акаике AIC	Евклидово расстояние между вектором прогнозов и реальным показателем	Покомпонентная сумма разностей между вектором прогнозов и реальным показателем
auto.arima(): arima(0, 1, 1)	796.06	11.12	11.96
Arima(6, 1, 0)	803.26	10.23	4.74
Arima(6, 1, 1)	805.24	10.30	5.35
Arima(6, 1, 2)	801.94	10.39	10.23
Arima(6, 1, 3)	803.70	10.20	7.92
Arima(6, 1, 4)	795.98	12.55	31.36
Arima(6, 1, 5)	797.45	11.71	26.86
Arima(6, 1, 6)	796.07	11.20	16.17
Arima(1, 1, 6)	803.35	9.89	-2.61
Arima(2, 1, 6)	805.31	9.85	-2.61
Arima(3, 1, 6)	795.92	13.06	-26.50
Arima(4, 1, 6)	797.35	11.55	-18.31
Arima(5, 1, 6)	796.75	10.35	19.56

¹Для прогноза на 2018 г. в момент написания статьи не были известны данные декабря, поэтому расчет сделан на 11 месяцев.

Таблица 4. Сравнение параметров моделей по критерию Акаике AIC и сопоставление предсказаний на 2018 г. с реальными показателями (результаты получены с точностью до сотых долей)

Модель временного ряда	Информационный критерий Акаике AIC	Евклидово расстояние между вектором прогнозов и реальными показателями	Покомпонентная сумма разностей между вектором прогнозов и реальными показателями
auto.arima(): arima(0, 1, 1)	1153.83	22.06	58.10
Arima(6, 1, 0)	1161.70	27.77	76.11
Arima(6, 1, 1)	1163.62	28.27	77.41
Arima(6, 1, 2)	1165.59	27.99	76.73
Arima(6, 1, 3)	1162.45	11.02	23.61
Arima(6, 1, 4)	1157.08	24.58	59.45
Arima(6, 1, 5)	1159.48	24.00	57.10
Arima(6, 1, 6)	1165.07	24.59	58.72
Arima(1, 1, 6)	1162.17	31.86	85.37
Arima(2, 1, 6)	1157.67	18.46	36.95
Arima(3, 1, 6)	1157.72	24.92	61.44
Arima(4, 1, 6)	1157.07	24.71	59.98
Arima(5, 1, 6)	1155.82	21.00	43.08

Следует обратить внимание на результаты последней модели в табл. 3: *Arima(5, 1, 6)*. Они противоречивы: с одной стороны, по евклидову расстоянию до данных, зафиксированных в реальности, прогноз хорош, но, судя по покомпонентной разности, эта модель делает более оптимистичный прогноз, чем полученная автоматически модель. Модели *Arima(6, 1, 3)* и *Arima(2, 1, 6)* показали себя хорошо, в обоих тестах превзойдя прогноз модели *auto.arima()*, хотя по информационному критерию Акаике они ей уступают. Остальные выделенные модели сделали прогноз лучше, чем автоматическая функция *auto.arima()*, только в случае прогноза на 2013 г. (при этом, по критерию Акаике они уступают модели, построенной функцией *auto.arima()*) [18–20].

На рис. 6 представлено сравнение изменений индекса, сложившихся в реальности в 2018 г., прогноза модели, построенной автоматически, и прогнозов моделей *Arima(6, 1, 3)* и *Arima(2, 1, 6)* на 2018 год.

Модель *Arima(2, 1, 6)*, полученная при анализе индекса заработной платы в период 2000–2017 гг., имеет сезонную составляющую (0, 1, 0) с периодом в 12 месяцев [8, 9] и следующий вид (коэффициенты учтены с точностью до 0.01):

$$wage_t = 1.71wage_{t-1} - 0.83wage_{t-2} - 1.92\varepsilon_{t-1} + 1.17\varepsilon_{t-3} - 0.09\varepsilon_{t-4} + 0.12\varepsilon_{t-5} - 0.09\varepsilon_{t-6} \quad (2)$$

Модель *Arima(6, 1, 3)* для того же периода имеет аналогичную сезонную составляющую и вид (коэффициенты учтены с точностью до 0.01):

$$wage_t = 0.41wage_{t-1} - 0.49wage_{t-2} + 0.91wage_{t-3} + 0.05wage_{t-4} + 0.07wage_{t-5} - 0.08wage_{t-6} - 0.58\varepsilon_{t-1} + 0.56\varepsilon_{t-2} - 0.98\varepsilon_{t-3} \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) $wage$ – это разность первого порядка показателя индекса реальной заработной платы, ε_i – составляющие модели скользящего среднего порядка i [8, 9, 11].

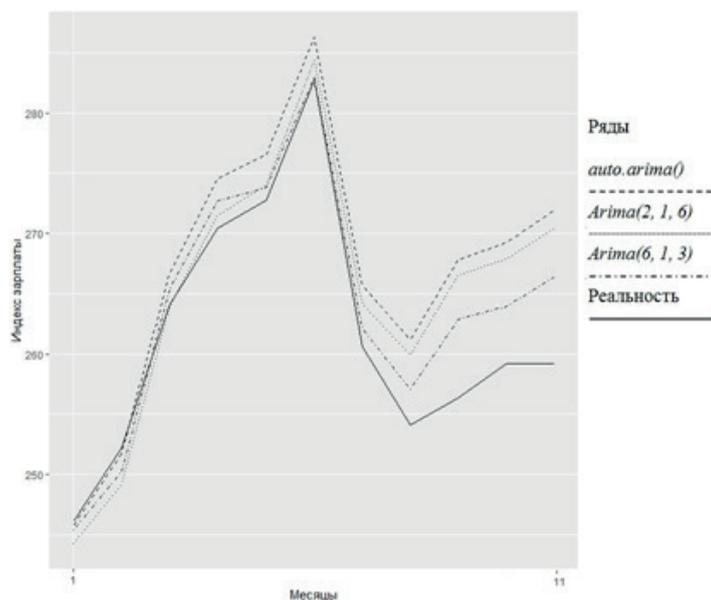


Рис. 6. Прогнозы моделей $Arima(6, 1, 3)$, $Arima(2, 1, 6)$ и $auto.arima = Arima(0, 1, 1)$ на 2018 год и данные индекса заработной платы, зафиксированные в реальности.

Заключение

В рамках представленного исследования осуществлен математический анализ экономических показателей, связанных с заработной платой граждан Российской Федерации. По данным репрезентативной выборки Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения [1], построены квантили 10%–95% по заработной плате. Показано, что в части 60%–95% квантилей за последние 10 лет наблюдается рост, а в части 10%–50% квантилей – значения заработной платы остаются примерно на одном уровне или падают. Однако колебания реальных значений заработной платы незначительны, особенно учитывая сравнительно длительный временной отрезок. На графиках отчетливо прослеживаются кризисы 2008 и 2014 гг. В целом, можно констатировать отсутствие роста заработной платы за последние 10 лет. В абсолютных показателях изменения заработной платы в различных квантилях за это время не очень велики. На социально-экономическое положение граждан также влияют и многие факторы, не учтенные в представленном исследовании: изменение фискальной политики, рост цен на топливо, рост стоимости потребительской корзины и т. д. С использованием математических моделей $ARIMA$ проанализирован временной ряд макроэкономической статистики РФ по месячной заработной плате [2]. В рамках настоящей работы построены модели $ARIMA(p, d, q)$ с показателями $p = 6$ и $q = 6$, которые дают лучший прогноз на 2013 г. и на 2018 г. Большие по амплитуде ежегодные подъемы и падения приходятся на декабрь, когда по результатам года многим работникам выплачивают одновременно сумму, существенно превышающую ежемесячный заработок. Повышение заработной платы в июне-июле, связанное, скорее всего, с отпускными выплатами, хорошо описывается моделями 6-го порядка.

В качестве предмета дальнейших исследований можно рассматривать более детальный анализ временных рядов: в первую очередь, декомпозицию ряда на тренд, сезонную составляющую и шум.

Литература:

1. «Российский мониторинг экономического положения и здоровья населения НИУ-ВШЭ (RLMS-HSE)», проводимый Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» и ООО «Демоскоп» при участии Центра народонаселения Университета Северной Каролины в Чапел Хилле и Института социологии Федерального научно-исследовательского социологического центра РАН. <http://www.cpc.unc.edu/projects/rlms>, <http://www.hse.ru/rlms>.
2. Единый архив экономических и социологических данных. Динамические ряды макроэкономической статистики РФ. Заработная плата. <http://sophist.hse.ru/hse/nindex.shtml>
3. Соболев Э.Н. Оплата труда в системе социально-трудовых отношений: стереотипы и российские реалии. Научный доклад. М.: Институт экономики РАН, 2017. 50 с.
4. Алексахин А.В., Ломоносова Н.В. Современные особенности развития региональных рынков труда // Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук. Сб. науч. трудов Второй заочн. Междунар. конф. проф.-преп. состава. Казань: Печать-Сервис XXI век, 2018. С. 76–77.
5. Айвазян С.А., Березняцкий А.Н., Бродский Б.Е. Модели социально-экономических показателей России // Прикладная эконометрика. 2018. Т. 51. С. 5–32.
6. Goldschmidt D., Schmieder J.F. The Rise of domestic outsourcing and the evolution of the german wage structure // The Quarterly Journal of Economics. 2017. V. 132. Is. 3. P. 1165–1217. doi:10.1093/qje/qjx008.
7. Cepni O., Ethem Guney I., Swanson N.R. Nowcasting and forecasting GDP in emerging markets using global financial and macroeconomic diffusion indexes // Int. J. Forecast. 2018. V. 35. Is. 2. P. 555–572. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.10.008.
8. Hyndman R.J., Khandakar Y. Automatic time series forecasting: The forecast package for R // J. Statistical Software. 2008. V. 27. Is. 1. P. 1–22. doi:10.18637/jss.v027.i03.
9. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and practice: 2nd ed. OTexts, 2018. 382 p.
10. Бокс Дж., Дженкинс Г.М. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: пер. с англ. / Под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974. Кн. 1. 406 с. Кн. 2. 197 с.
11. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики: в 2-х т. Т. 2. М.: Юнити-Дана, 2001. 432 с.
12. Said S.E., Dickey D.A. Testing for unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order // Biometrika. 1984. V. 71. Is. 3. P. 599–607. doi:10.1093/biomet/71.3.599.
13. Wold H. A study in the analysis of stationary time series: Second revised edition. Uppsala: Almqvist and Wiksell Book Co., 1954. 236 p.
14. Tarassow A. Forecasting U.S. money growth using economic uncertainty measures and regularisation techniques // Int. J. Forecast. 2018. V. 35. Is. 2. P. 443–457. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.09.012.
15. Cubadda G., Guardabascio B. Representation, estimation and forecasting of the multivariate index-augmented autoregressive model // Int. J. Forecast. 2018. V. 35. Is. 1. P. 67–79. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.08.002.
16. Chan K.S., Goracci G. On the ergodicity of first-order threshold autoregressive moving-average processes // J. Time Series Analysis. 2018. V. 40. Is. 2. P. 256–264.

doi:10.1111/jtsa.12440.

17. Askanazi R., Diebold F.X., Shin M. On comparison of interval forecasts // *J. Time Series Analysis*. 2018. V. 39. Is. 6. P. 953–965. doi: 10.1111/jtsa.12426.

18. Strijbis O., Arnesen S. Explaining variance in the accuracy of prediction markets // *Int. J. Forecast.* 2018. V. 35. Is. 1. P. 408–419. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.04.009.

19. Dress K., Lessmann S., von Mettenheim H.-J. Residual value forecasting using asymmetric cost functions // *Int. J. Forecast.* 2018. V. 35. Is. 1. P. 408–419. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.04.009.

20. Dantas T.M., Oliveira F.L.C. Improving time series forecasting: An approach combining bootstrap aggregation, clusters and exponential smoothing // *Int. J. Forecast.* 2018. V. 34. Is. 4. P. 748–761. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.05.006.

References:

1. «The Russian Longitudinal Monitoring Survey – Higher School of Economics (RLMS-HSE)», conducted by the National Research University Higher School of Economics and OOO “Demoscope” together with Carolina Population Center, University of North Carolina at Chapel Hill and the Federal Center of Theoretical and Applied Sociology of the Russian Academy of Sciences. <http://www.cpc.unc.edu/projects/rlms>, <http://www.hse.ru/rlms>. (in Russ.)

2. Dynamic series of macroeconomic statistics of the Russian Federation. Salary. <http://sophist.hse.ru/hse/nindex.shtml> (in Russ.)

3. Sobolev E.N. Remuneration in the system of social and labor relations: stereotypes and Russian realities. Scientific report. Moscow: Institute of Economics RAS, 2017. 50 p. (in Russ.)

4. Aleksakhin A., Lomonosova N. Modern features of the development of regional labor markets. Actual problems of natural and human sciences. Collection of scientific papers of the Second Int. Conf. of Faculty. Kazan: Pechat’-Service XXI vek. Publ., 2018: 76-77. (in Russ.)

5. Aivazyan S., Bereznyatsky A., Brodsky B. Modeling Russian social indicators. *Prikladnaya ekonometrika* (Applied Econometrics). 2018; 3(51): 5-32. (in Russ.)

6. Goldschmidt D., Schmieder J.F. The Rise of Domestic Outsourcing and the Evolution of the German Wage Structure. *The Quarterly Journal of Economics*. 2017; 132(3): 1165-1217. doi:10.1093/qje/qjx008.

7. Cepni O., Ethem Guney I., Swanson N.R. Nowcasting and forecasting GDP in emerging markets using global financial and macroeconomic diffusion indexes. *Int. J. Forecast.* 2018; 35(2): 555-572. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.10.008.

8. Hyndman R.J., Khandakar Y. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *J. Statistical Software*. 2008; 27(1): 1-22. doi:10.18637/jss.v027.i03.

9. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and practice: 2nd ed. OTexts, 2018. 382 p.

10. Box G., Jenkins G. Time series analysis: Forecast and management. John Wiley and Sons, 2008. 712 p.

11. Aivazyan S. Applied statistics. Fundamentals of econometrics: in 2 volumes. V. 2. Moscow: Unity-Dana Publ., 2001. 432 p.

12. Said S.E., Dickey D.A. Testing for unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order. *Biometrika*. 1984; 71(3): 599-607. doi:10.1093/biomet/71.3.599.

13. Wold H. A Study in the analysis of stationary time series: Second revised edition. Uppsala: Almqvist and Wiksell Book Co., 1954. 236 p.
14. Tarassow A. Forecasting U.S. money growth using economic uncertainty measures and regularisation techniques. *Int. J. Forecast.* 2018; 35(2): 443-457. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.09.012.
15. Cubadda G., Guardabascio B. Representation, estimation and forecasting of the multivariate index-augmented autoregressive model. *Int. J. Forecast.* 2018; 35(1): 67-79. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.08.002.
16. Chan K.S., Goracci G. On the ergodicity of first-order threshold autoregressive moving-average processes. *J. Time Series Analysis.* 2018; 40(2): 256-264. doi:10.1111/jtsa.12440.
17. Askanazi R., Diebold F.X., Shin M. On Comparison of interval forecasts. *J. Time Series Analysis.* 2018; 39(6): 953-965. doi: 10.1111/jtsa.12426.
18. Strijbis O., Arnesen S. Explaining variance in the accuracy of prediction markets. *Int. J. Forecast.* 2018; 35(1): 408-419. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.04.009.
19. Dress K., Lessmann S., von Mettenheim H.-J. Residual value forecasting using asymmetric cost functions. *Int. J. Forecast.* 2018; 35(1): 408-419. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.04.009.
20. Dantas T.M., Oliveira F.L.C. Improving time series forecasting: An approach combining bootstrap aggregation, clusters and exponential smoothing. *Int. J. Forecast.* 2018; 34(4): 748-761. doi: 10.1016/j.ijforecast.2018.05.006.

Об авторе:

Петрусевич Денис Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the author:

Denis A. Petrusевич, Ph.D., Associate Professor of the Chair of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Петрусевич Д.А. Анализ математических моделей, используемых для прогнозирования эконометрических временных рядов // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 61–73. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-61-73

For citation: Petrusевич D.A. Analysis of mathematical models used for econometrical time series forecasting. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 61-73. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-61-73

УДК 141

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-74-82

ДИАЛЕКТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА
В СВЕТЕ ТРУДА «НАУКА ЛОГИКИ» ГЕГЕЛЯ:
НОВОДИАЛЕКТИЧЕСКОЕ ПОЗНАНИЕ, ДИАЛЕКТИЧЕСКОЕ
ПРОГРАММИРОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ МЫШЛЕНИЯ

К.В. Молчанов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Экономический факультет,
Москва 119991, Россия*

@Автор для переписки, e-mail: kmolchanov@econ.msu.ru

В статье обсуждается диалектическое изучение английского языка в свете труда «Наука логики» Гегеля. Это не обучение английскому языку, а исследование языка в широком смысле. В ходе исследования установлены некоторые связи между новодialeктическим познанием (включая диалектическое программирование) и английским языком. Основным результатом исследования стало выявление процессов мышления. Обсуждаемые положения определяют комплекс вопросов, касающихся диалектического познания. Результаты исследования могут быть использованы для развития гносеологии, программирования, лингвистики и психологии.

Ключевые слова: диалектика, гносеология, мышление, программирование, лингвистика.

THE DIALECTIC STUDY OF THE ENGLISH LANGUAGE
IN THE LIGHT OF THE WORK "SCIENCE OF LOGIC" BY HEGEL:
NEW DIALECTIC COGNITION, DIALECTICAL PROGRAMMING,
AND THE PROCESSES OF THINKING

K.V. Molchanov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics, Moscow 119991, Russia

@Corresponding author e-mail: kmolchanov@econ.msu.ru

The article discusses the dialectical study of the English language in the light of the work “Science of Logic” by Hegel. But this is not English language learning only – it is the study of this language in the wide sense. In the course of the study, some links between new dialectic cognition (including dialectical programming) and the English language were ascertained. The main result of our research is to identify the processes of thinking. The discussed provisions define the complex of issues relating to dialectical cognition. The results of the research can be used to develop epistemology, programming, linguistics, and psychology.

Keywords: dialectics, epistemology, thinking, programming, linguistics.

В настоящее время в авторской современной диалектической философии¹ изучение иностранных языков происходит весьма активно. Сразу же отметим, что под изучением языков понимается не столько общеизвестное обучение правилам и навыкам чтения, письма, разговора и т. д., сколько именно изучение языков как кладезей знаний², т. е. имеется в виду исследование и познание языков в смысле гносеологии. Исходя из этого, осмысливается возможность обучения использованию языков для общения³. Диалектические исследования проводятся в отношении того или иного конкретного языка, а также – что более важно – для той или иной совокупности языков, но особенно актуальны для изучения пары языков, соответствующих качественно различным формам (видам) мышления, в первую очередь, определяющих различные выражения грамматических значений.

В представленной статье мы рассмотрим некоторые из предметов и положений, связанных с диалектическим изучением английского языка. Для пояснения положения, касающегося познания, гносеологии, приведем следующий пример. Как указано на нашей страничке в «Твиттере» @ru_dialectics (чтобы зафиксировать наш приоритет указываемой идеи), все понимают такие фразы английского языка, как «*a family of five*» и «*a yard of silk*» (а лучше – «*a bunch of bananas*»), но почему-то не различают соответствующие количественные аспекты применения предлога «*of*»⁴, вытекающие из долгосрочной (языковой) реализации определенного мышления (из жизни носителей английского языка). Однако именно в их смысле выступают аспекты количества, не указанные в труде Гегеля «Наука логика» (великому философу не до этого было – совершалось изучение самой логической идеи!). Указанные аспекты изучены в современной диалектической философии, и на основе указанных Гегелем соотношений количества и качества проведены параллели между аспектами этих категорий как устоявшихся конструкций, но уже с учетом вновь выявленных аспектов количества в связи с предлогом «*of*». Тем самым удалось путем простого сравнения и сопоставления обнаружить новые аспекты качества, т. е. переосмыслить и соответственно расширить гносеологию бытия – гегелевское учение о бытии. Это стало одной из основ формирования нами новодиалектического продолжения

¹Ее основы изложены в ряде наших статей, например, в журнале «Философские исследования» с 2002 по 2008 гг.

²Знания в настоящей статье следует понимать в диалектическом смысле, а не то, к чему ведут образовательные услуги.

³Таким образом, в современной диалектике изучение иностранного языка дифференцировано на *исследование и познание иностранного языка в смысле гносеологии и обычно понимаемое изучение иностранного языка*, но которому противопоставляется *диалектическое изучение в узком смысле иностранного языка, в частности, диалектическое изучение в узком смысле английского языка*. Соответствующие словосочетания будут использоваться в настоящей статье как диалектические термины, пусть несколько громоздки, но зато однозначные.

⁴В современной диалектике этот предлог изучен основательно, и, кроме обозначаемого результата, получены еще и другие. Иные предлоги английского языка также были изучены в диалектическом смысле.

гегелевского труда «Наука логики» (которое, в свою очередь, является одной из основ современной диалектической философии). В нем, в частности, актуально определенное Гегелем соотношение бытия и мышления, важное в смысле качества, бытия, мышления и соответственно языка. Соотношение бытия и мышления актуально для настоящей статьи в том смысле, что язык «представляет собою как бы тело мышления» [1, с. 245], причем слова становятся «наличным бытием, оживленным мыслью. Это наличное бытие для наших мыслей абсолютно необходимо» [2, с. 273]. Соотношение бытия и мышления, слов и мышления – кардинально важно для настоящей статьи об изучении иностранного языка, точнее – о принципиально новой расширенной форме обычно понимаемого изучения иностранного языка, конкретно английского языка, или о его диалектическом изучении в узком понимании, но в связи с его исследованием и познанием в смысле гносеологии, причем, когда на первый план выступает мышление⁵. Последнее актуально, поскольку носителями английского языка являются люди с принципиально иной формой мышления, чем у народов с синтетическими или полисинтетическими языками, и в плане осуществления познания (т. е. гносеологии). Иными словами, в узком гносеологическом смысле актуально, принципиально и важно качественное отличие английского и русского языков, соответственно, аналитического и синтетического языков. Однако речь пойдет не о строении и функциональном взаимодействии различных частей речи, не о языковых единицах и не о выражении грамматических значений, а о более глубоких бытийных и мыслительных смыслах, которые некоторым образом раскрываются в непосредственных обсуждаемых ниже положениях.

Речь пойдет:

- 1) об ознакомлении читателя с новым подходом к обычно понимаемому изучению английского языка – о диалектическом изучении в узком смысле английского языка;
- 2) об обозначаемых в связи с этим некоторых теоретических и прикладных положениях.

Первая ступень диалектического изучения в узком смысле английского языка – непосредственная. Это обычно понимаемое изучение иностранного языка, или непосредственное изучение английского языка. Оно бытует в школах, вузах, и в силу широкой распространенности, но с оговорками, его приходится принимать за начальную, хотя и критичную, стадию обучения. В современной диалектике оно используется все же лишь как неизбежный базис, который все равно переосмысливается в процессе диалектического изучения английского языка.

Вторая ступень диалектического изучения английского языка – непосредственно диалектическая (она уже в определенной мере относится к исследованию и познанию английского языка в смысле гносеологии, как и все последующие, обозначаемые ниже ступени). Вторая ступень – опосредствованная, это – опосредствованное изучение английского языка. Она отличается рефлексированием в себя: непосредственно, это одна ее ветвь, и с учетом первой ступени, это вторая ее ветвь⁶, сложное рефлексирование⁷.

⁵Как мы уже неоднократно писали в наших работах, мышление не известно материалистичным наукам – оно не может быть познано в них, пока они не откажутся от примата материального, однако знания о мышлении любой желающий может почерпнуть из трудов Гегеля.

⁶Конечно же, понятие рефлексии и отношение «в себя» необходимо понимать в диалектическом смысле философии Гегеля, и любой желающий может почерпнуть соответствующие знания из трудов Гегеля.

⁷Именно для рефлексирования, а также для выявления методологии изучения языка архиважно качественное различие мышлений, соответствующих языкам с разными выражениями грамматических значений.

На этой ступени происходит отход от традиционных представлений о запоминании слов, от того, что запоминаемое английское слово имеет только определенное значение (значения) на русском языке, или обеспечивается существенное рефлектирование реконструируемого наличного бытия *материалов* английского языка (в том числе слов, их значений и т. д.), что и составляет основу диалектического изучения в узком смысле английского языка. Отсюда – далее изменяются представления о (формальных по своей сути) правилах английского языка: они перестают быть внешними к словам формальными правилами, правилами составления предложения и т. д., и определяется некоторое наличное бытие, понимаемое в гегелевском смысле. Более того, *становятся* взаимными (соотносимыми) бытие и рефлектирование (в первую очередь, слова и правила), и *становится осуществимым* опосредствование позиций бытия мыслей, наличного бытия, моментов мышления – всего того, что составляет мышление и *затем* выражается в речи, и начинается опосредствование языка, *вживание* в него (речь уже потом).

Таким образом, при диалектическом изучении в узком смысле английского языка навыки чтения, разговора, которым обычно обучают, являются не целью и не результатом обучения, а производными мышления и инструментами самого обучаемого, но с существенными дополнительными смысловыми и логическими нагрузками (см. ниже). Качественное различие очевидно!

Сказанное выше можно рассматривать и по-другому, с иных позиций, например:

- а) с позиций изучения русского языка;
- б) в смысле опосредствования разных языков;
- в) в различных сочетаниях отдельных рассмотренных (и других) положений, в том числе с позиций совместного использования (сочетания) языков, что открывает ряд возможностей.

Например, в смысле сочетания с формами этапов изучения иностранного языка это: а) опосредствование (пар) языков (их сочетание в гносеологических и иных целях) и б) использование рефлексивной формы обработки и изложения (и изучения) текстов и компьютерных данных.

Об этом мы уже писали в ряде наших работ (см., напр.: [3]), поэтому сейчас отметим лишь один важный в смысле настоящей статьи аспект – в указанных случаях происходит использование *противоречия*, которое, по словам Гегеля, есть корень всякого движения и жизненности [4, с. 520]. За счет него и удается сочетать тексты (с получением сверхсуммарных результатов), созданные с помощью одного или различных видов мышления (языков), в различных целях – от простой обработки текста (редактирование) до их опосредствования (в том числе, программистской обработки различных данных или в гносеологических целях – вплоть до исследования *знаний*).

Третья ступень – это уже персональная языковая сфера (бытия) обучаемого, а не некая «общая» научно-лингвистическая область знаний, заложенных в его память (понятия бытия и памяти различны). Персональная языковая сфера образуется в процессе решения (опять же!) противоречия обычно понимаемого изучения английского языка и диалектического изучения английского языка в узком смысле, т. е. двух предыдущих ступеней, и, во-первых, сочетает их в смысле (получения) *основания*⁸, а, во-вторых, полагает новое *взаимосуществование* обычно и диалектически изучаемых *материалов*.

⁸Описываемая методика базируется на труде Гегеля «Наука логика», но включает многие элементы из нашего новодиалектического его продолжения.

Иными словами, в процессе диалектического изучения в узком смысле английского языка за счет двух переходов осуществляется полный отрыв от положения дел, существующего при обычном обучении иностранному языку, и, соответственно, от старой (обычной) методологии обучения языку. При этом у познающего (обучающегося) человека формируется собственная имманентная языковая основа, в том числе, персональный рефлексивный объем знаний английского языка: во-первых, знаний, во-вторых, рефлексивный, и, в-третьих, именно персональный, т. е. присущий конкретному человеку. Указанное очень важно, но невозможно при обычно понимаемом изучении иностранного языка, когда всем обучающимся предлагается стандартизованный курс обучения (пусть в различных объемах и с различными модификациями), когда не учитываются и качественные различия языков (в силу отсутствия учета различий мышлений разных народов), и ментальные различия людей, и различия их потребностей, т. е. различия, которые обязательны для решения противоречия, для развития познания, способностей использовать язык и т. д.). Итак, на третьей ступени у обучающегося возникает понимание *различения* английского языка (простое отличие от русского языка возникает еще на второй ступени в смысле указанного Гегелем понятия «разница»), и это – принципиально важно, ибо определяет понимание и достижение *сущности* языка.

Таким образом, в процессе диалектического изучения в узком смысле английского языка образуется не просто набор заученных слов, правил, навыков умения говорить и т. п., чему обычно учат (но не языку), а некоторое *основание* – сочетание моментов мышления и позиций наличного бытия изучаемого языка, которое проявляется, в том числе, в речи.

Следует подчеркнуть, что мы говорим о персональном, собственном опосредствовании (осмыслении) языка (сначала в виде рефлексивного материала), а не об унифицированном, внешнем обучении ему, не о заучивании слов и правил. Достигаются как раз именно те внутренние ментальные состояния и процессы, которые характеризуют *сущность* языка и определяют развитие образуемого содержания, что и используется в процессе диалектического изучения в узком смысле английского языка. Иными словами, достигается определенное сочетание процессов мышления и бытия английского языка (а не научных знаний о нем, что происходит при обычном обучении)⁹. Акцент делается на том, что *знать язык* – это не столько заучить его слова и правила и говорить на нем, сколько понимать язык, а еще точнее – использовать мышление, которое его обусловило. Как обычная (старая) система обучения языку может научить думать на языке, если науки не знают, что такое мышление??? – хотя даже знание того, что оно есть такое, недостаточно. Надо образовать, создать у обучаемого мышление соответствующего языка, некое «второе» мышление, поэтому в настоящей статье и говорится фактически о некотором (поэтапном) пути трансформации мышления обучаемого.

Согласно учению Гегеля о сущности, определяется *единство*, в котором актуально действительное знание английского языка (которого во внешнем проявлении вполне достаточно для того, чтобы общаться с его помощью). Это – уже четвертая ступень. Это – ступень действительности (языка), на которой уже нет больше различия персонального мышления обучающегося и бытия английского языка. Можно сказать и так: на четвертой

⁹В процессе обычного обучения иностранному языку может быть фактически лишь только зубрежка слов, правил, ходовых конструкции и т. п., но это все – лишь механическое запоминание и некое приспособленчество. Не обеспечивается понимание английского языка, в силу чего не могут не возникать различные казусы и ошибки...

ступени необходимость (говоря проще, сам английский язык) фактически полностью овладела предметом (некий персональный набор знаний, существующий в движении мышления обучаемого), сформированном на пути трансформации бытия нерелефлирующих первичных сведений (первой ступени, обычного обучения) в наличное бытие (в знания).

Итак, у изучающего язык образуется некий персональный набор знаний, которые в движении вообще человеческого мышления задействуются подобно мышлению, соответствующему английскому языку. Это мышление приобретает свое тело, язык, который и есть английский язык по сути, а не его фактически формальная модель: извне заученные слова, их формы и правила; а *сущность языка*, как показал Гегель, *является в речи*. Таким образом, *умение общаться при диалектическом изучении в узком смысле английского языка является лишь следствием его познания* – его исследования и познания в смысле гносеологии (знаний о нем и его знаний).

В целом диалектическое изучение в узком смысле английского языка, на первый взгляд, имеет привычные подразделения (сейчас речь уже не о ступенях изучения языка), но они обладают существенными дополнительными смысловыми и логическими нагрузками:

а) читать и слушать – это умение воспринимать и фиксировать, различать и понимать, это – умение воспринимать язык и знания, заложенные в нем (см. пример с предлогом «*of*»);

б) писать и говорить (*to speak*) – это умение излагать, выстраивать последовательности (логические и лингвистические), формировать наличное бытие, мысли, высказывания, предложения и т. д. (в диалектике строго различаются логические и лингвистические (языковые) высказывания, а также суждения и предложения), это – умение использовать формы мышления, соответствующие английскому языку (это важно для любого познания: и для диалектического, и в сфере естественных наук, например, для работы с аппаратом математической логики и с инструментами программирования, и для познания в сфере общественных наук). Но в науках это не применяется, а вот в диалектике используется широко, причем даже в специализированных формах: см., напр., упоминание ниже о программном типе *delegate*;

в) общаться (*to talk*) – это основа умения познавать, это умение соотносить, опосредовать; оно необходимо для применения логики, причем именно логики, а не обычной логики, используемой в науках, содержание которой было удостоено Гегелем презрения еще 200 лет назад [4, с. 30]).

Не об умении работать с иностранными символами (текстами) и выражаться на другом языке идет речь. Речь идет о более серьезных положениях, чем умение читать, писать и говорить на английском языке. Фактическое функционирование привнесенного мышления – это наглядное выражение, в первую очередь, следующих положений:

1) существование одновременно разных процессов мышления, что очень важно в системе диалектического познания и само по себе, и для повышения его эффективности (и о чем в науках не может быть и речи, даже мечтаний). По аналогии можно привести организацию вычислительных процессов в известной программной среде *.NET Framework* с помощью класса *Task*, который является абстракцией, представляющей асинхронную операцию, чем отличается от более раннего класса *Thread*. Или же речь идет о двух или более *процессах мышления*, а не об одном мышлении (вне диалектики мало представимо

хотя бы по причине того, что даже само мышление в науках не определено). Реализация двух (или более) различных одновременных процессов мышления значительно повышает продуктивность познания, что, возможно, правда, только в диалектике. Кроме того, два (или более) различных одновременных процесса мышления могут отражать мышление (осмысление) и одного предмета, и одновременно разных. При этом, главное, вырисовываются контуры а) принципиально новой формы мышления, в которой превосходятся даже функционалы гегелевского познания на основе тождества мышления и бытия, и, соответственно, б) принципиально новых форм познания;

2) безразличие друг к другу процессов мышления в смысле отрицаний наличного бытия, то есть не что иное, как основание понятия независимости различных процессов мышления, или появляется в общем виде возможность их вычленения, переноса и сочетания, причем не обязательно соответствующих качественно разным языкам, но и одного языка;

3) фактически инкорпорирование соответствующего изучаемому языку мышления в мышление изучающего человека. В смысле аналогии (пусть отдаленной, но которая в данном случае будет более наглядной и понятной для людей, еще не совсем в совершенстве владеющих знаниями труда Гегеля «Наука логики») можно привести тип *delegate* (например, языка программирования C#), который можно *передавать* в качестве аргумента. Иными словами, процесс (метод) можно передавать в другой процесс (метод) или объект (предмет, познание), т. е. объект или метод может в себе непосредственно использовать изначально не определенный для него внешний процесс. Это – в смысле программирования. А в смысле диалектики определяются принципиально новые формы познания, уже используемые в современной диалектике;

4) возможность (в процессах исследования или моделирования конкретного нечто или применения программ, касающихся его самого) кусочно-последовательного изменения *программного некоторого* и даже определенных в связи с ним процессов (в программировании есть представления только об изменяемых *экземплярах*: в упомянутом языке C# соответствующим примером является класс *String Builder*);

5) возможность изменения логики в ходе реализации обусловленных ею процессов, не говоря уже об изменении программистских процессов, в частности – о вариациях откликов, реакций, поведения программного некоторого;

6) безразличие друг к другу процессов мышления в смысле различия наличного бытия, которое может быть безотносительно человеческому мышлению, т. е. появляются возможности *других*, внешних, например искусственных (автоматических), форм мышления, и это – теперь не столь уж и фантастично;

7) возможность создания искусственного познания, причем сначала той самой вычислительной составляющей способности достигать целей – *artificial intelligence* (как известно, имеющей такой неправильный перевод на русский язык, как «искусственный интеллект»);

8) возможность принципиально новых форм познания, причем в логическом плане как алгоритмизированных вообще, так и компьютеризированных в частности (что в том числе соответствует указанным ниже диалектической области познания и новой программистской парадигме);

и др.

Следует сказать и о том, что указанные (и другие) положения были использованы нами при формировании *диалектического программирования* – новодialeктической области познания, ставшей подразделением диалектической гносеологии и использующей ряд новодialeктических наук, в том числе развитую логику (а не обычную, используемую в науках), диалектическую лингвистику и диалектическую психологию¹⁰. Именно в диалектическом программировании были *выведены* безотносительные понятия программы (ее следствием является компьютерная программа) и алгоритма (отличен от метода), т. е. не базирующиеся на субъективных взглядах программистов. Сделан шаг к *диалектико-ориентированному программированию*, которое за счет отказа от обыкновенной логики представляет собою более совершенную программистскую парадигму, чем объектно-ориентированная парадигма, при этом последняя в диалектике считается для программирования «шагом назад»¹¹.

В развитии указанных положений колоссальное значение обретают акцентированные выше положения:

– отказ от обыкновенной логики, бытующей в науках, и применение *развитой логики*, точнее *новодialeктической системы логик*, именно на основе которой определяется алгоритмизация познания (исследований),

– использование возможностей диалектики, в первую очередь, упомянутых выше рефлексирования и противоречия, т. е. по сути применение самой диалектики, причем даже в формальных процессах (например, программирования), что, во-первых, в совокупности с феноменом различения процессов мышления позволяет определить новую основу для проведения рассуждений и, во-вторых, очень важно для развития гносеологии и познания в целом и прикладного использования, в частности.

Это уже принципиально новый поворот в развитии и применении познания, реализованный в современной диалектической философии.

Таким образом, диалектическое изучение в узком смысле английского языка представляет собой не обучение чтению, письму и разговору на английском языке, а совсем другое. Это фактор:

а) применения форм мышления самих непосредственно, в их потоке или в совокупности с иными инструментами познания;

б) развития и совершенствования мышления, осмысления и применения его особых форм, что для материалистических наук невероятно;

в) создания особых инструментов познания, гносеологических, прикладных, ментальных и *подручных* (например, программистских);

г) формирования новых областей познания (например, диалектическое программирование);

и это всё – осуществление познания на новых принципах, невозможных в материализме и науках.

¹⁰Диалектическая психология базируется на принципах, обозначенных Гегелем, т. е. исключает указанные им недостатки: она рассматривает всеобщие и существенные черты человеческой природы, а не частные и случайные черты изолированных влечений, которые изучаются в обычной психологии.

¹¹Отдельно отметим, что в современной диалектике программирование выводится из труда Гегеля «Наука логики» и нашего его новодialeктического продолжения, т. е. не формируется так, как это было осуществлено вне нее – спонтанно и вследствие естественнонаучных открытий или под возникающие эмпирические или научные задачи. При этом диалектико-ориентированная парадигма охватывает все известные программистские парадигмы, а также ряд положений (возможно, и парадигм), которые почему-то до сих пор не видны программистам.

А завершая статью, отметим, что важны не столько даже конкретные разработки, например, диалектико-ориентированное программирование, сколько сами возможности осуществления познания на новых принципах, что позволяет не только делать открытия, но и основательно переосмысливать прошлые диалектические и научные достижения, вскрывая их новые аспекты (например, во многом благодаря использованию рефлексивных форм обработки текстов [3] были определены некоторые из многих ошибок К. Маркса в его гениальном и непревзойденном «Капитале»), а также осмыслить глобальные и цивилизационные процессы (например, противостояния стран, когда различие языков, культур (т. е. мышления) мешает пониманию людьми, странами друг друга, что может приводить даже к принятию неверных геополитических решений).

Литература:

1. Гегель Г.В.Ф. Соч. в 14-ти т. Т. 1. М.–Л.: Государственное издательство, 1930.
2. Гегель Г.В.Ф. Соч. в 14-ти т. Т. 3. М.: Государственное издательство политической литературы, 1956.
3. Молчанов К.В. Некоторые вопросы осуществления диалектического рефлексивно-го изложения в Интернете // Философия хозяйства. Альманах Центра общественных наук и экономического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. 2014. № 6 (96). С. 174–188.
4. Гегель Г.В.Ф. Соч. в 14-ти т. Т. 5. М.: Государственное социально-экономическое издательство, 1937.

References:

1. Hegel G.V.F. Works in 14 volumes. V. 1. Moscow–Leningrad: State Publishing House, 1930. (in Russ.)
2. Hegel G.V.F. Works in 14 volumes. V. 3. Moscow: State Publishing House of Political Literature, 1956. (in Russ.)
3. Molchanov K.V. Some issues of the implementation of the dialectical reflective presentation on the Internet. *Filosofiya khozyaystva* (Philosophy of Economics. Almanac of the Center for Social Sciences and the Faculty of Economics of Lomonosov Moscow State University). 2014; 6 (96): 174-188. (in Russ.)
4. Hegel G.V.F. Works in 14 volumes. V. 5. Moscow: State Socio-Economic Publishing House, 1937. (in Russ.)

Об авторе:

Молчанов Константин Владимирович, доктор философских наук, к.э.н., к.соц.н., старший научный сотрудник Лаборатории философии хозяйства, Экономический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, 3-й учебный корпус). Авторский сайт: www.dialectics.ru

About the author:

Konstantin V. Molchanov, D.Sc. (Philosophy), Ph.D. (Economics), Ph.D. (Sociology), Senior Researcher of the Laboratory of Philosophy of Economy, Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University (3rd Educational Building, MSU, Leninskiye gory, Moscow 119991, Russia). Author's site: www.dialectics.ru

Для цитирования: Молчанов К.В. Диалектическое изучение английского языка в свете труда «Наука логики» Гегеля: новодиалектическое познание, диалектическое программирование и процессы мышления // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 74–82. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-74-82

For citation: Molchanov K.V. The dialectic study of the English language in the light of the work “Science of Logic” by Hegel: New dialectic cognition, dialectical programming, and the processes of thinking. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(2): 74-82. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-74-82

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Рецензируемое периодическое сетевое научное издание «Российский технологический журнал» выходит 6 раз в год и публикует оригинальные экспериментальные и теоретические работы в виде полных статей, кратких сообщений, а также авторские обзоры и прогнозно-аналитические статьи по следующим разделам:

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств
- Мироззренческие основы технологии и общества

Ответственность авторов

Авторы, предоставляющие свои работы для опубликования в журнале «Российский технологический журнал», гарантируют, что статьи являются оригинальными (не публиковались ранее в других изданиях в их нынешней или близкой по содержанию форме), не находятся на рассмотрении в редакциях других изданий, и все возможные конфликты интересов, связанные с авторскими правами и опубликованием рассматриваемых статей, урегулированы.

Ответственность редакции

Все рукописи принимаются к печати на основании результатов их рецензирования. В журнале принято одностороннее «слепое» рецензирование двумя независимыми экспертами. В настоящее время осуществляется переход к двустороннему «слепому» рецензированию. К рецензированию рукописей привлекаются члены редакционной коллегии, а также внешние эксперты, имеющие близкую к тематике рукописи специализацию.

Редакция несет ответственность за качество опубликованных научных статей, проводит мероприятия, направленные на недопущение некорректных действий со стороны авторов и рецензентов, следит за соблюдением норм публикационной этики.

Рукопись научной статьи, поступившая в редакцию журнала, рассматривается главным редактором на предмет соответствия научной статьи профилю журнала и требованиям к оформлению. Статьи, не соответствующие профилю журнала или не соответствующие его требованиям, отклоняются редколлегией без рецензирования.

Выбор рецензента является прерогативой редакции (фамилии рецензентов авторам не сообщаются). Статьи, принятые к публикации, тщательно редактируются. Небольшие исправления стилистического, номенклатурного или формального характера вносятся в статью без согласования с авторами. Если в результате рецензирования или редактирования необходимы более серьезные исправления, статья отсылается авторам на доработку. Авторам следует внести в текст все необходимые с их точки зрения исправления, а также прокомментировать все замечания в ответном письме в редакцию. Доработанная

рукопись должна быть возвращена в редакцию в максимально короткий срок (не более 10 рабочих дней) вместе с предыдущим вариантом статьи и электронной версией окончательного варианта.

Процедура предоставления статей в редакцию

Материалы принимаются на русском или английском языках и издаются на языке оригинала.

Рекомендуемый объем экспериментальной статьи – 10-15 страниц формата А4 (до 27000 знаков с пробелами), обзора – 30-35 страниц формата А4 (до 60000 знаков с пробелами), напечатанных шрифтом 12 Times New Roman через 1.5 интервала (вместе с таблицами и списком литературы). Статьи большего объема принимаются только после предварительного согласования с редакцией.

В редакцию необходимо представить в отсканированном виде на e-mail *seredina@mirea.ru*

- рукопись статьи, подписанную всеми авторами статьи;
- экспертное заключение;
- сопроводительное письмо от организации, в которой выполнена работа;
- авторы публикаций из РТУ МИРЭА должны представить выписку из протокола заседания кафедры с рекомендацией к опубликованию;
- заявление авторов об отсутствии конфликта интересов;
- заполненный договор о передаче права на использование произведения.

Кроме этого, на указанный e-mail необходимо предоставить рукопись статьи в формате Microsoft Word и кандидатуры рецензентов (не менее 3-х), с указанием их ФИО, аффилиации и e-mail, имеющих специализацию, близкую к тематике рукописи. Предполагаемые рецензенты не должны работать с авторами в одной организации и иметь конфликты интересов.

Требования к оформлению рукописи

Текст рукописи должен быть подготовлен в программе Microsoft Word и сохранен в форматах doc, docx, rtf, шрифт 12 Times New Roman, поля по 2 см со всех сторон. Все материалы статьи компонуются в единый сводный файл и размещаются в нем в следующей последовательности (сквозная нумерация страниц, выравнивание по левому краю):

- **УДК;**
- **название статьи** (полужирный);
- **инициалы, фамилии авторов** (полужирный);
- **полное наименование организации**, где работают авторы, с указанием города, почтового индекса и страны. Если организаций две и более, необходимо цифровыми надстрочными индексами связать название учреждения и фамилии авторов, в нем работающих (курсив);
- **e-mail автора**, ведущего переписку (@Автор для переписки, e-mail);
- **аннотацию** в структурированном виде, которая должна кратко повторять основные разделы статьи (цель, методы, результаты, выводы) и адекватно представлять содержание и результаты статьи (объемом от 200 до 250 слов). Аннотация призвана служить основным источником информации о статье в отечественных и зарубежных информационных системах и базах данных, индексирующих журнал. Она должна быть понятна без обращения к самому тексту статьи.

- **ключевые слова** (от 5 до 10 слов или сочетаний, через запятые), которые характеризуют содержание статьи.

Затем необходимо поместить на английском языке одним блоком (форматирование то же, что и в русском варианте):

- **название статьи;**
- **инициалы и фамилии авторов;**
- **название организации** с указанием города, почтового индекса и страны;
- **e-mail автора** для переписки (@Corresponding author e-mail);
- **структурированную аннотацию** на английском языке с указанием основных разделов статьи (Objective, Methods, Results, Conclusions) объемом от 200 до 250 слов. Перевод аннотации на английский язык должен быть полным, но не обязательно дословным переводом русскоязычной версии.
 - **ключевые слова** (Keywords);
 - **гlossарий** всех используемых в статье терминов на английском языке.

Структура статьи

Авторам статей необходимо придерживаться следующей структуры текста статьи:

- краткое изложение состояния рассматриваемого вопроса и постановка задачи, решаемой в статье;
- метод решения задачи и принятые допущения;
- основное содержание статьи (например, описание сущности процессов и явлений; доказательства представленных в статье положений, исходные и конечные математические выражения; математические выкладки и преобразования; эксперименты и расчеты, примеры, иллюстрации);
- обсуждение полученных результатов и сопоставление с ранее известными;
- выводы и рекомендации.

Источники финансирования

Далее указываются источники финансирования данной работы, в скобках – номера грантов.

Оформление списка литературы

Список литературы помещается в конце статьи (с новой страницы) и оформляется в соответствии с нижеприведенными требованиями. Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания в тексте, порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки. Список литературы должен быть сформирован вручную, без использования функции «Список».

В ссылках на цитируемую литературу следует указывать для журнала: фамилии и инициалы всех авторов, заголовки статьи, название журнала, год, том, номер, страницы от и до, DOI статьи (при наличии); для книги: фамилии авторов, инициалы, название, место издания (город), название издательства, год, общее число страниц либо цитируемые страницы от и до; не рекомендуется ссылаться на авторефераты и диссертации.

Помимо информации о литературных источниках статьи под названием «Список литературы», формируется блок «References» (см. пример). Для раздела «References» необходимо продублировать «Список литературы» с той же нумерацией, а ссылки на русскоязычные статьи представить в следующем виде: фамилии и инициалы авторов

латинским шрифтом (транслитерация), название статьи на английском языке, транслитерация названия российского журнала (курсивом) и его перевод на английский язык, год; том (в скобках номер выпуска): страницы от и до, DOI статьи. Далее в скобках указать (in Russ.). Для книги: фамилии и инициалы авторов латинским шрифтом (транслитерация), название на английском языке, далее город по-английски, транслитерация наименования издательства с добавлением Publ. (Publisher). Если у русскоязычной статьи есть версия на английском языке в переводной версии журнала, то более предпочтительно в списке References указать именно ее.

Следует свести к минимуму цитирование источников, недоступных англоязычному читателю. Самоцитирование в статье не должно превышать 30%. Все ссылки должны быть тщательно выверены.

Список литературы:

1. Мишина Е.Д., Шерстюк Н.Э., Зайцев А.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Переключаемый нелинейный двумерный сегнетоэлектрический фотонный кристалл // Изв. РАН. Сер. физическая. 2007. Т. 71. Вып. 10. С. 1424–1427.

2. Ковалев С.П., Китаева Г.Х., Ильин Н.А., Мишина Е.Д., Пенин А.Н., Сигов А.С. Нелинейно-оптическое детектирование терагерцевого излучения в периодически поляризованных кристаллах // Вестник МГУ. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2011. № 1. С. 12–18.

3. Debnath S., Linke N.M., Figgatt C., Landsman K.A., Wrigh, K., Monroe C. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits // Nature. 2016. V. 536. Iss. 7614. P. 63–66. DOI: 10.1038/nature18648.

4. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. М.: Энергоатомиздат, 2011. 174 с.

5. Socrates G. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2001. 366 p.

References:

1. Mishina E.D., Sherstyuk N.E., Zaitsev A.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. Switchable nonlinear two-dimensional ferroelectric photonic crystal. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. phiz.* (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics). 2007; 71(10):1424-1427. (in Russ.)

2. Kovalev S.P., Kitaeva G.Kh., Ilyin N.A., Mishina E.D., Penin A.N., Sigov A.S. Nonlinear optical detection of terahertz-frequency radiation in crystals with periodic domain structure. *Vestnik MGU. Ser. 3. Phizika. Astronomiya* (Moscow University Physics Bulletin). 2011; (1):12-18. (in Russ.)

3. Debnath S., Linke N.M., Figgatt C., Landsman K.A., Wright K., Monroe C. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits. *Nature*. 2016; 536(7614):63-66. DOI: 10.1038/nature18648.

4. Vorotilov K.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. Integrated ferroelectric devices. Ed. A.S. Sigov. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2011. 174 p. (in Russ.)

5. Socrates G. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2001. 366 p.

Сведения об авторах

В самом конце статьи необходимо привести сведения обо всех авторах по прилагаемому образцу. Авторам следует указывать номер ORCID. ORCID – открытая бесплат-

ная система регистрации всех ученых мира, пишущих статьи. ORCID – это уникальный номер ученого, который позволяет идентифицировать именно его публикации и другие результаты научной деятельности. Получить номер ORCID можно свободно и бесплатно на сайте <https://orcid.org/>. Также авторы должны указывать Researcher ID, Author ID (при наличии).

Об авторах:

Битюков Владимир Ксенофонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической радиотехники и радиофизики Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID (при наличии), Author ID (при наличии), ORCID. E-mail.

Белянин Алексей Федорович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела АО ЦНИТИ «Техномаш» (121108, Россия, Москва, ул. Ивана Франко, д. 4). ResearcherID (при наличии), Author ID (при наличии), ORCID. E-mail.

Лавров Сергей Дмитриевич, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID (при наличии), Author ID (при наличии), ORCID. E-mail.

About the authors:

Vladimir K. Bityukov, D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Chair of Theoretical Radio Engineering and Radio Physics, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID (при наличии), Author ID (при наличии), ORCID. E-mail.

Alexey F. Belyanin, D.Sc. (Engineering), Professor, Head of Department, JSC TsNIITI "Technomash" (Central Scientific Research Technological Institute "Technomash") (4, Ivan Franko St., Moscow 121108, Russia). ResearcherID (при наличии), Author ID (при наличии), ORCID. E-mail.

Sergey D. Lavrov, Postgraduate Student, Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID (при наличии), Author ID (при наличии), ORCID. E-mail.

На отдельной странице необходимо указать фамилию, имя, отчество, контактный телефон автора, с которым следует вести переговоры по вопросу публикации.

Дополнение к оформлению текста, рисунков, графиков, таблиц

Допускается архивировать текстовые документы и рисунки (rar, zip).

При оформлении рукописи рекомендуется соблюдать следующие требования:

- автоматической расстановкой переносов не пользоваться;
- в качестве кавычек использовать следующие «...»;
- знак «←» (тире) отбивается пробелами, знаки «минус», «интервал» или «химическая связь» пробелами не отбиваются;
- в качестве знака умножения использовать только «×»;
- в десятичных дробях по тексту, в рисунках использовать точку для отделения целой части от дробной (0.25 вместо 0,25);
- в формулах использовать буквы латинского и греческого алфавитов;

- при выборе единиц измерения рекомендуется придерживаться Международной системы единиц СИ;
- сокращения единиц измерения пишутся только русскими буквами (мкМ, но не μM ; нм, но не nm);
- используемые в статье сокращения следует расшифровывать при первом упоминании в тексте (за исключением общепринятых сокращений);
- не допускается дублирование данных в тексте, таблицах и рисунках.

Иллюстрации (рисунки, графики) размещаются в тексте рукописи. Подписи к рисункам размещаются в рукописи под рисунками и не дублируются в файле рисунка. Также рисунки предоставляются отдельными файлами в формате tiff, jpeg с разрешением не менее 300 dpi, при необходимости – в заархивированном виде. Имя файла должно содержать фамилию первого автора латиницей и номер рисунка, который должен совпадать с номером рисунка по тексту (например, Demidov_Ris_2.tif). Каждый файл должен содержать один рисунок.

Допускаются цветные изображения, которые будут доступны для просмотра в электронных версиях статей, размещаемых на сайтах журнала и e-library.ru. При необходимости использования векторных рисунков, они должны предоставляться в формате программы, в которой сделаны: CorelDraw, Adobe Illustrator или в формате EPS. Допускается также создание и представление графиков при помощи приложения Excel. Настоятельно не рекомендуется пользоваться программами Microsoft Graph, Microsoft Draw (поставляется с Microsoft Word), PaintBrush из Windows или Paint из Windows 95.

Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение. Размер рисунка по ширине должен быть не более 75 мм (при размещении в одной колонке), либо не более 150 мм (при размещении по ширине страницы); он должен быть представлен в виде, пригодном для непосредственного воспроизведения. Рисунки могут включать краткие цифровые или буквенные обозначения (нумеруются слева направо или по часовой стрелке), набранные соответствующим остальному тексту шрифтом (размер не менее 9 и не более 11). При необходимости расшифровки деталей на самом рисунке дается их нумерация, все пояснения, относящиеся к деталям, помещаются под рисунком, в подрисуночной подписи. Все рисунки должны быть пронумерованы, в тексте обязательно должна быть ссылка на рисунок.

Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Возможно использование программы MathType, которую можно загрузить и установить отдельно либо с сайта разработчика – компании Design Science, либо с других интернет-ресурсов. После установки MathType интегрируется с большинством текстовых редакторов, в том числе и с Microsoft Word, замещая собой встроенный редактор формул и добавляя в окно программы свою панель инструментов и пункт главного меню. Для набора математических формул в Microsoft Word 2007 и Microsoft Word 2010 необходима установка MathType 6.0 или выше (6.5, 6.9 и т.д.). После установки программы в результате нажатия кнопки Редактор формул или выполнения команды Вставка – Объект – MathType 6.0 или другая версия, будет запущен MathType. Использование других программ должно быть предварительно согласовано с редакцией. Размеры в математическом редакторе: обычный символ 10 пт, крупный индекс 8 пт, мелкий индекс 6 пт, крупный символ 12 пт, мелкий 8 пт.

При этом нужно учитывать, чтобы ширина формулы не превышала 7 см. Если в тексте используется несколько формул, то они должны быть последовательно пронумерованы.

Размеры формулы по ширине должны быть не более 75 мм (при размещении в одной колонке), либо не более 150 мм (при размещении по ширине страницы); формулы и схемы реакций должны быть представлены в виде, пригодном для непосредственного воспроизведения.

Таблицы должны иметь заголовки и порядковые номера, на которые даются ссылки в тексте. В таблицы включаются только необходимые цифровые данные. Не допускается использование в таблицах не обсуждаемых в тексте данных. Ширина таблицы должна быть не более 75 мм (при размещении в одной колонке), либо не более 160 мм (при размещении по ширине страницы). Необходимо строго следить за выравниванием горизонтальных строк и вертикальных столбцов в таблице.

Представление статьи для публикации подразумевает согласие авторов с настоящими правилами.

Адрес редакции: 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7(495)246-05-55 (#2-88)

E-mail: seredina@mirea.ru

Зав. редакцией: Середина Галина Дмитриевна

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Дата опубликования 29 марта 2019 г.

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj.mirea.ru>