

# ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

2025  
Т.25, № 1

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

## «КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

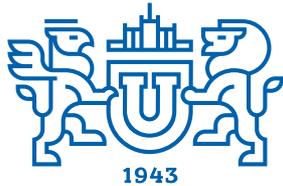
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

### Редакционная коллегия:

**Логиновский О.В.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*гл. редактор*) (г. Челябинск);  
**Бурков В.Н.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*зам. гл. редактора*) (г. Москва);  
**Голлай А.В.**, д.т.н., доц. (*зам. гл. редактора*) (г. Челябинск);  
**Захаров В.В.**, *отв. секретарь* (г. Челябинск);  
**Баркалов С.А.**, д.т.н., проф. (г. Воронеж);  
**Березанский Л.**, PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);  
**Джапаров Б.А.**, д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);  
**Затонский А.В.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Мазуров В.Д.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Екатеринбург);  
**Максимов А.А.**, д.т.н. (г. Новокузнецк);  
**Мельников А.В.**, д.т.н., проф. (г. Ханты-Мансийск);  
**Прангишвили А.И.**, д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);  
**Щепкин А.В.**, д.т.н., проф. (г. Москва);  
**Ячиков И.М.**, д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

### Редакционный совет:

**Шестаков А.Л.**, д.т.н., проф. (*председатель*) (г. Челябинск);  
**Авербах И.**, PhD, проф. (г. Торонто, Канада);  
**Браверман Е.**, PhD, проф. (г. Калгари, Канада);  
**Дегтярь В.Г.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);  
**Казаринов Л.С.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Кибалов Е.Б.**, д.э.н., проф. (г. Новосибирск);  
**Новиков Д.А.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Москва);  
**Панферов В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Слинько А.**, PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);  
**Столбов В.Ю.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Ухоботов В.И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);  
**Ушаков В.Н.**, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);  
**Шестаков И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);  
**Ширяев В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Шнайдер Д.А.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Штессель Ю.**, PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



# BULLETIN

OF THE SOUTH URAL  
STATE UNIVERSITY

2025

Vol. 25, no. 1

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,  
AUTOMATIC CONTROL,  
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

---

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.  
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

---

## South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

### Editorial Board:

**Loginosvkiy O.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Burkov V.N.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

**Gollai A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Zakharov V.V.**, *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Barkalov S.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;

**Berezansky L.**, PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;

**Dzhaparov B.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;

**Zatonskiy A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

**Mazurov V.D.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;

**Maksimov A.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;

**Melnikov A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;

**Prangishvili A.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;

**Shchepkin A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

**Yachikov I.M.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

### Editorial Council:

**Shestakov A.L.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Averbakh I.**, PhD, Prof., University of Toronto, Canada;

**Braverman E.**, PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;

**Degtyar' V.G.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;

**Kazarinov L.S.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Kibalov E.B.**, Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;

**Novikov D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

**Panferov V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Slinko A.**, PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;

**Stolbov V.Yu.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;

**Ukhobotov V.I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Ushakov V.N.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

**Shestakov I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;

**Shiryaev V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Schneider D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Shtessel Yu.**, PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

# СОДЕРЖАНИЕ

## **Информатика и вычислительная техника**

KOLODII S.V., KURKIN D.V., MONAKHOV M.A., GAIFULIN R.M. A method for integrating field devices into open and isolated control systems based on the dynamic mapping of EDD description on OPC UA ..... 5

БАРКАЛОВ С.А., БЕЛОУСОВ В.Е., ПРОСОЛУПОВ О.А. Алгоритмы выявления и устранения ошибок в базах знаний экспертных диагностических систем ..... 18

## **Управление в технических системах**

ЕРЕМЕЕВА В.А. Обнаружение дефектов ротора асинхронного двигателя в нестационарных условиях методом матричных пучков ..... 30

ПАЦЕНКО М.М., ОНИСКИВ В.Д., СТОЛБОВ В.Ю. Об одном алгоритме адаптивного управления процессом токарной обработки с использованием методов искусственного интеллекта ..... 43

## **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы**

ЧУБ А.В., АБРАМОВА К.Н., ИКОННИКОВА К.Д., ЖЕЧЕВ Е.С., ГАЗИЗОВ Т.Т. Ослабление электромагнитной помехи в структуре с двухкратным модальным резервированием ..... 53

## **Управление в социально-экономических системах**

ЗАТОНСКИЙ А.В., ШАКЛЕИНА П.А., КРАСОВСКИЙ Р.В. Современные методы сбора и анализа требований работодателей для подготовки ИТ-специалистов ..... 69

LOGINOVSKIY O.V. Improving the efficiency of managing higher education institutions: research analysis ..... 83

## **Краткие сообщения**

КОСТЫЛЕВА Л.Ю., ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Анализ подходов, методов и технологий повышения эффективности функционирования промышленных предприятий, выпускающих и использующих биметаллические листовые материалы ..... 99

ГЕЛЬРУД Я.Д., ЦУЙ Ц., ЗАХАРОВ В.В., РАЗУМОВ В.Г. Анализ эффективности региональных инновационных проектов ..... 108

# CONTENTS

## **Informatics and computer engineering**

- KOLOBII S.V., KURKIN D.V., MONAKHOV M.A., GAIFULIN R.M. A method for integrating field devices into open and isolated control systems based on the dynamic mapping of EDD description on OPC UA ..... 5
- BARKALOV S.A., BELOUSOV V.E., PROSOLUPOV O.A. Algorithms of identification and elimination of mistakes in knowledge bases of expert diagnostic systems ..... 18

## **Control in technical systems**

- EREMEEVA V.A. Detection of rotor faults in induction motor in non-stationary conditions using the matrix pencil method ..... 30
- PASHCHENKO M.M., ONISKIV V.D., STOLBOV V.Yu. About one algorithm of adaptive control of the turning process using artificial intelligence methods ..... 43

## **Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems**

- CHUB A.V., ABRAMOVA K.N., IKONNIKOVA K.D., ZHECHEV Ye.S., GAZIZOV T.T. Electromagnetic interference attenuation in a structure with double modal redundancy ..... 53

## **Control in social and economic systems**

- ZATONSKIY A.V., SHAKLEINA P.A., KRASOVSKIY R.V. Modern methods of collecting and analyzing employers requirements for training IT workers ..... 69
- LOGINOVSKIY O.V. Improving the efficiency of managing higher education institutions: research analysis ..... 83

## **Brief reports**

- KOSTYLEVA L.Yu., LOGINOVSKIY O.V. Analyzing approaches, methods, and technologies for improving the efficiency of industrial enterprises producing and using bimetal sheet materials ..... 99
- GELRUD Ya.D., CUI J., ZAKHAROV V.V., RAZUMOV V.G. Analysis of the efficiency of regional innovation projects ..... 108

# Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Original article

DOI: 10.14529/ctcr250101

## A METHOD FOR INTEGRATING FIELD DEVICES INTO OPEN AND ISOLATED CONTROL SYSTEMS BASED ON THE DYNAMIC MAPPING OF EDD DESCRIPTION ON OPC UA

S.V. Kolodii<sup>1, 2</sup>, kolodiisv@susu.ru

D.V. Kurkin<sup>2</sup>, dkurkin84@yandex.ru

M.A. Monakhov<sup>2</sup>, max-mawork@yandex.ru

R.M. Gaifulin<sup>2</sup>, gr0ker@yandex.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> LLC "Distributed Remote Monitoring Systems", Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Field devices with industrial protocols such as HART are widely used in manufacturing and automation systems. EDDL (Electronic Device Description Language) is used to integrate field devices into such systems. EDDL is a universal language for describing the properties of field devices defined by IEC 61804 international standard. Many automation systems exploit the OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) technology. OPC UA provides universal access to device-specific information using a standardized information model. To this end, a relevant task is to convert the description of a field device developed using the EDDL language into the OPC UA information model. **Aim.** The paper aims to describe a method for the dynamic mapping of the description of EDDL-based field devices into the OPC UA information model and to show its advantages over other known methods. **Materials and methods.** It proposes to use an approach to converting the description of a field device in the EDDL language, which includes compiling EDDL methods into the byte code of a virtual machine and an intermediate information model and further mapping the intermediate model to the OPC UA information model described in FDI (Field Device Integration) specifications. **Results.** The paper presents the results of testing a prototype implementing a dynamic mapping method on the Linux and Windows operating systems, as well as its capabilities for configuring Rosemount-3051 pressure transmitters. **Conclusion.** It demonstrates the prospects for using this method in commercial products and devices.

**Keywords:** OPC UA, EDDL, HART, FDI, field transmitters, control systems, compiler, translator program

**For citation:** Kolodii S.V., Kurkin D.V., Monakhov M.A., Gaifulin R.M. A method for integrating field devices into open and isolated control systems based on the dynamic mapping of EDD description on OPC UA. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):5–17. DOI: 10.14529/ctcr250101

Научная статья  
УДК 681.5, 654, 004.4  
DOI: 10.14529/ctcr250101

## СПОСОБ ИНТЕГРАЦИИ ПОЛЕВЫХ УСТРОЙСТВ В ОТКРЫТЫЕ И НЕЗАВИСИМЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ EDD ОПИСАНИЯ НА OPC UA

**С.В. Колодий**<sup>1, 2</sup>, kolodiisv@susu.ru  
**Д.В. Куркин**<sup>2</sup>, dkurkin84@yandex.ru  
**М.А. Монахов**<sup>2</sup>, max-mawork@yandex.ru  
**Р.М. Гайфулин**<sup>2</sup>, gr0ker@yandex.ru

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> ООО «Распределенные системы дистанционного мониторинга», Челябинск, Россия

**Аннотация.** Полевые устройства с такими промышленными протоколами, как HART широко распространены на производствах и в системах автоматизации. Для интеграции полевых устройств в такие системы используется EDDL (Electronic Device Description Language) – универсальный язык для описания свойств полевых устройств, определенный международным стандартом IEC 61804. Многие системы автоматизации используют открытую технологию OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture). OPC UA предоставляет доступ к информации, относящейся к конкретному устройству с помощью стандартизированной информационной модели. В связи с этим актуальной является задача преобразования описания полевого устройства, разработанного на языке EDDL в информационную модель OPC UA. **Цель исследования:** описать один из способов динамического отображения описания полевых устройств на основе EDDL в информационную модель OPC UA и показать его преимущества по сравнению с другими известными методами. **Материалы и методы.** Предлагается использовать подход преобразования описания полевого устройства на языке EDDL, включающего компиляцию методов EDDL в байт код виртуальной машины, в промежуточную информационную модель и дальнейшее отображение промежуточной модели на информационную модель OPC UA, описанную в спецификациях FDI (Field Device Integration). **Результаты.** Приводятся результаты тестирования прототипа, реализующего способ динамического отображения на операционной системе Linux и Windows, а также его возможности по настройке датчика давления Rosemount-3051. **Заключение.** Показаны перспективы по использованию данного способа в коммерческих продуктах и устройствах.

**Ключевые слова:** OPC UA, EDDL, HART, FDI, полевые датчики, системы управления, компилятор, транслятор

**Для цитирования:** A method for integrating field devices into open and isolated control systems based on the dynamic mapping of EDD description on OPC UA / S.V. Kolodii, D.V. Kurkin, M.A. Monakhov, R.M. Gaifulin // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 5–17. DOI: 10.14529/ctcr250101

### Introduction

New challenges in the national industry promote the relevant task of integrating field devices into control and monitoring systems, for example, to monitor the technical status of automatic control system components, in particular, pressure transmitters [1].

An approach based on standardized device description is used to integrate field devices based on such protocols as HART (Highway Addressable Remote Transducer) or FF (Foundation Fieldbus) into automation systems. It also controls, configures, and maintain these devices. The basic technologies for device description and integration are EDDL (Electronic Device Description Language) [2], FDT (Field Device Tool) [3], and FDI (Field Device Integration) [4]. The compatibility of these technologies is described in [5].

EDDL and FDI technologies are standard for integrating field devices. However, they are used only in proprietary control systems such as Emerson's DeltaV or Siemens' Simatic. This restricts the use of EDD descriptions in systems based on open technologies, such as OPC UA [6]. This distorts competition

and almost monopolizes the control system market. Besides, all currently known control systems that support EDD device descriptions are only Windows operated, which also limits their application scope.

Isolated and open solutions are becoming increasingly important. The first steps to open the technology were made by the Field Communication Group, which developed the specifications for the EDDL description language [2]. This allows using this language in open control systems but it also requires the source codes of such description and language interpretation support.

As mentioned above, the main component for the universal operation of a large fleet of field devices is EDDL language-based device description (EDD). The manufacturer provides this description with the device. As shown in Fig. 1, the EDD is loaded into the control system, which translates the EDDL language constructs, providing an interface for configuring transmitters, monitoring and control.

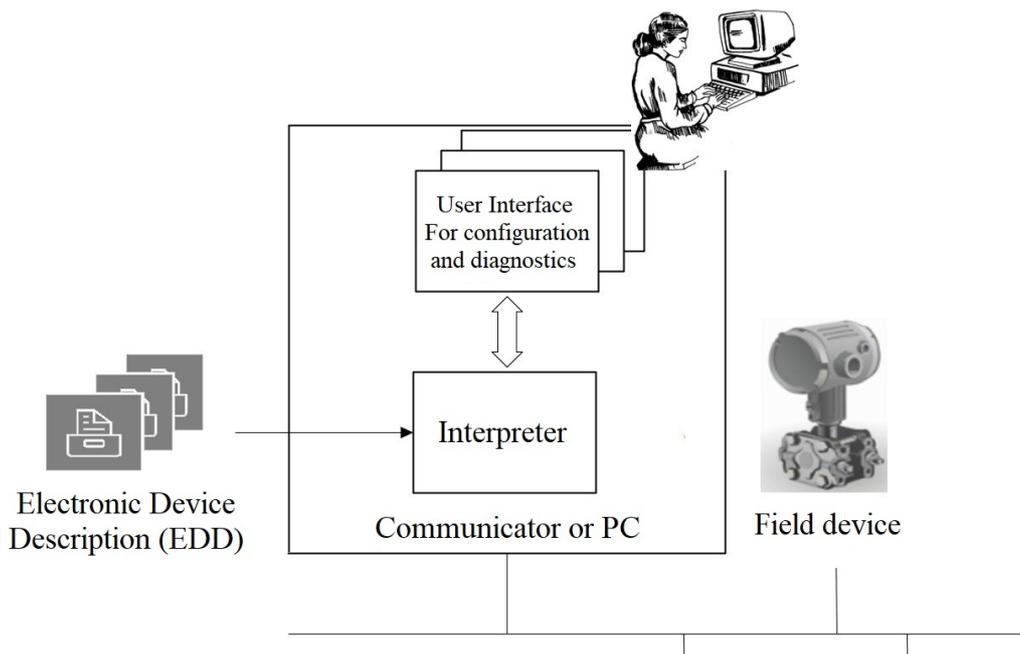


Fig. 1. Integration of field devices into the control system

The process of developing and loading EDD descriptions into control systems can be generally described as shown in Fig. 2.

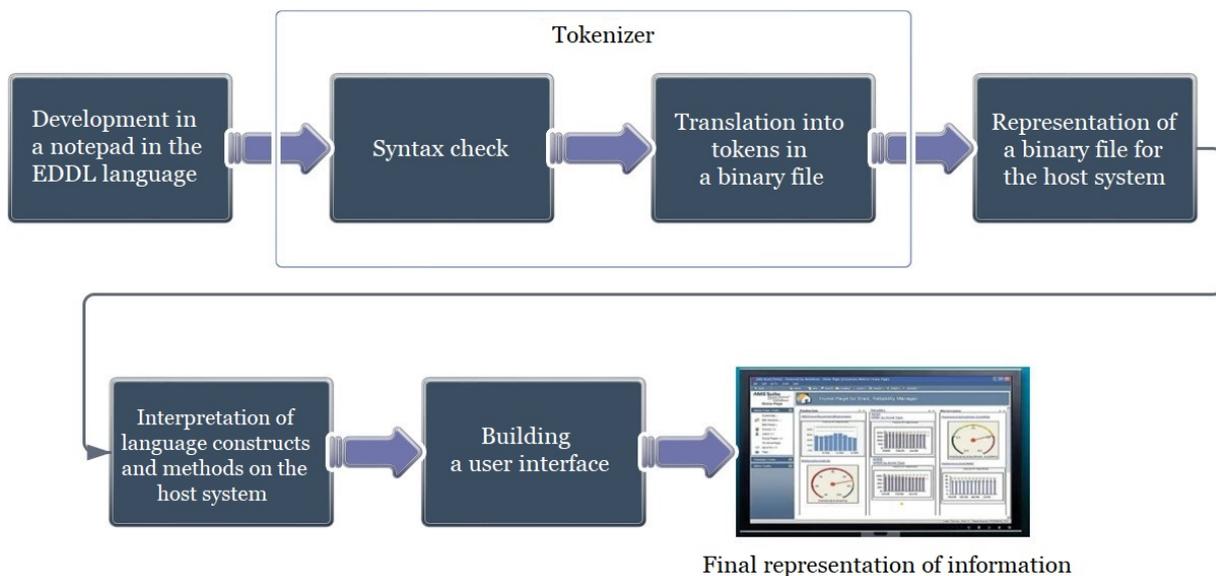


Fig. 2. Steps to integrate the device into the control system

An important step in this process is the interpretation of language constructs and methods with the C language semantics.

Besides, since isolated control systems usually use open technologies, such as OPC UA, the integration of field devices should provide for an adapter that “converts” the binary description in the EDDL language into the OPC UA information model. This adapter can immediately interpret all EDD description constructs and update the information model.

There are several known methods for interpreting language constructs and mapping them to the OPC UA information model [7], as well as the dynamic mapping method [8]. However, several issues are ignored. For example, the authors consider only the translation of the source code of the EDD description, ignoring binary files, while all EDD descriptions available on the Field Communication Group website are in binary format. Their work also lacks information on method mapping and the interaction between the C code and EDDL.

The authors of this paper considered all the shortcomings and created a new method for the dynamic mapping of all the information from the binary EDD description to the OPC UA information model. To achieve this goal, the authors solved the following tasks:

- Parsing and processing the binary EDD description file,
- Interpreting EDDL language constructs,
- Compiling methods to translate a code written in a C-like language into a set of virtual machine instructions,
- Creating a virtual machine to execute method instructions,
- Creating a mechanism to map and update OPC UA model data.

## 1. Technology overview

### 1.1. Device description language (EDDL)

EDDL (Electronic Device Description Language) is a technology for describing devices based on a structured text to describe information available in field devices. EDDL includes a description, dependencies of device parameters, operating logic, interaction with system controls, and a description of the command format for communicating with the device [9].

The EDDL language specification regulates a large set of data types for device description elements. It will be sufficient to map the elements described in Table 1 for the dynamic mapping of device descriptions to the OPC UA model.

Table 1  
EDDL language elements required for dynamic mapping to the OPC UA model

EDDL element	Element description
VARIABLE	Describes device parameters
METHOD	Describes an executable procedure containing device operating logic, for example, a device calibration procedure
LIST	Describes a sequence of EDDL elements
COLLECTION	Describes a group of logically related EDDL elements
COMMAND	Describes the structure and addressing of device variables
MENU	Describes data presentation for the user
REFERENCE ARRAY	A container with references to EDDL elements

EDDL is a compiled language. This means that, according to the language vocabulary, many elements can dynamically change their structure. For example, Fig. 3 shows the lexical structure of the REFERENCE ARRAY element. According to it, the ELEMENTS attribute of the REFERENCE ARRAY structure can change under certain conditions, including the lack of some elements of the REFERENCE ARRAY under these conditions.

Fig. 4 shows an example defining a method (METHOD element) in EDDL. The method is described by the C language grammar. This method allows assessing elements of the EDDL language, such as variables, and changing their value.

```
ARRAY OF item-type identifier
{
  LABEL string-value; HELP
  string-value;
  ELEMENTS {[integer , reference [, description [, help]? ]?;} <cond
  >]+} PRIVATE boolean-specifier;
  VALIDITY boolean-specifier;
  VISIBILITY boolean-specifier;
}
```

Fig. 3. Lexical structure of the REFERENCE ARRAY EDDL element

```
METHOD TestMethod
{
  TYPE float;
  DEFINITION
  {
    int i, selection;
    ACKNOWLEDGE (" Press OK to acknowledge the start of this method ");
    i = 5;
    PUT_MESSAGE ("i_=%{ i}");
    DELAY (5, "i_=%{ i}");
    GET_DEV_VAR_VALUE ("Enter %[L]%[U]{var1 }%[U].value ", var1 );
    selection = SELECT_FROM_LIST ("Is the value correct?", "YES;
    NO");
    if (selection == 1) abort ();
    return 0.0;
  }
}
```

Fig. 4. An example of an EDDL method definition

Fig. 5 shows how to define a REFERENCE ARRAY element, the elements of which may lack or refer to different variables depending on certain conditions defined in the IF ... ELSE conditional block.

```
ARRAY ExpressionParserTest0
{
  LABEL "Test_Expression_Parser";
  HELP "REFERENCE_ARRAY_with_conditions_to_test_Expression
  Parser"; ELEMENTS
  {
    IF(var_int_1 == var_int_2)
    {
      1, var_float;
    } ELSE
    {
      1, var_int
    }
    IF(listOf_var_int.COUNT > 8 &&
    listOf_var_int.FIRST == 4 &&
    listOf_var_int.LAST == 7 &&
    listOf_var_int.CAPACITY > 10)
    {
      2, var_float;
    }
    IF(var_int.DEFAULT_VALUE > 4)
    {
      3, var_float;
    } ELSE
    {
      2, var_int_2
    }
  }
}
```

Fig. 5. An example of the REFERENCE ARRAY definition

### 1.2. Field Device Integration (FDI)

FDI (Field Device Integration) technology [10] describes how field devices can be integrated into the control system based on the device description using explicit mapping of EDD structures to the OPC UA information model.

FDI assumes that FDI package developers provide a mapping table in the device description. The EDDL language provides the SEMANTIC MAP element to allow general access to data elements using standardized semantic identifiers [9].

FDI defines general rules for the direct mapping of EDD to the OPC UA information model but it does not provide details and methods for translating the EDDL language.

### 1.3. OPC UA

The OPC UA information model is based on the OPC UA metamodel [11]. It provides both raw data, and data semantics. OPC UA information modeling is always performed on the server side. However, it can be accessed and modified using the OPC UA client. The data of the OPC UA server information model are provided as a set of nodes described by interlinked attributes [12].

## 2. Implementation

### 2.1. Introduction

This chapter shows a version and architecture of implementing the dynamic mapping of device description (EDD) to the OPC UA information model. It also shows how to translate the language constructs and execute EDDL methods.

### 2.2. General architecture

The authors based on the ideas of the FDI technology [13] propose an architecture for the system of the dynamic mapping of EDD device description. It integrates field devices with the HART protocol into any control system supporting OPC UA. The general architecture is shown in Fig. 6.

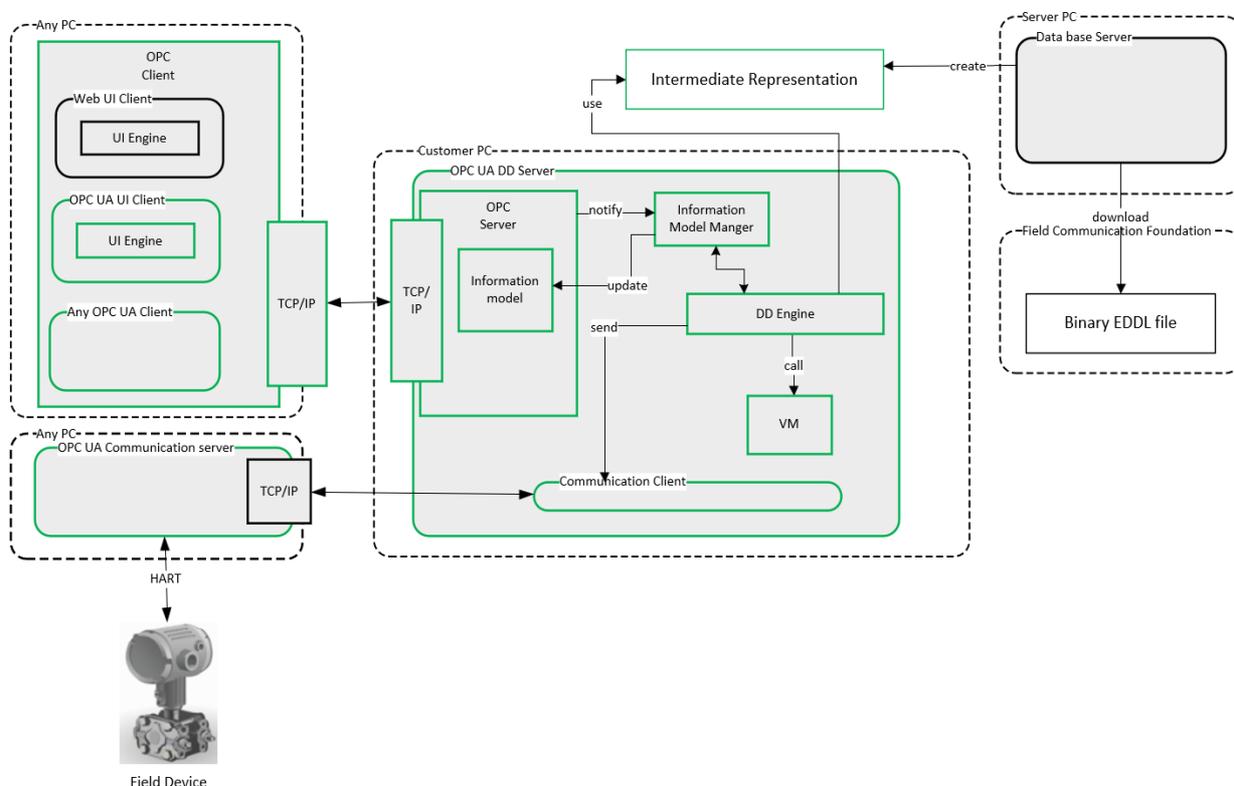


Fig. 6. Distributed system based on the EDD mapping technology in OPC UA

The binary file of the EDD description is processed by a special utility developed by the authors and converted into an intermediate representation format for the device description. DD Engine interprets

the constructs obtained from the intermediate representation and calculates their value each time they are accessed. It also notifies the Information Manager if new data have been received from the device or changed when the method was executed.

A virtual machine is used to run the method. In the intermediate representation, methods are presented as a bytecode ready to be run on the VM. This means, there is no need for the additional interpretation of the methods.

The Information Manager updates the OPC UA information model with new values or, vice versa, notifies DD Engine that the user has changed the values of the OPC UA model elements.

If the user has changed the values, the OPC Server notifies the Information Model Manager thereof.

### **2.3. Parsing, processing, and converting a binary EDD description file into an intermediate representation**

In this architecture, the authors proposed an intermediate representation format for device description storing EDDL language constructs in a form to be easily translated on the target platform. The intermediate representation file is a base that includes the metadata of the DD element description.

One can obtain this intermediate representation in two ways– by processing the binary EDD file (provided by the Field Communication Group or the device manufacturer) or original EDDL files using the method described in [8].

The authors developed a special utility for conversion to the intermediate format that checks both the syntax and semantics of EDDL language constructs, and the syntax and semantics of the methods.

### **2.4. EDDL language construct interpreter (DD Engine)**

A key component of this architecture is the DD Engine service, which translates EDDL language constructs, such as REFERENCE ARRAY, shown in Fig. 4. This component is also responsible for the business logic of the application. For example, it contains the algorithm for updating dynamic parameters, selecting commands to read a parameter, etc.

The service is developed in C# and uses EDD elements generated from the intermediate format. For example, all attributes of the REFERENCE ARRAY element shown in Fig. 3 in the C# model are presented as specifiers calculating attribute values according to the EDDL grammar directly when they are assessed. Fig. 7 shows the representation of the lexical description of the REFERENCE ARRAY in the EDDL language as a class in the C# language.

```
ARRAY OF item-type identifier
{
    LABEL string-value;
    HELP string-value;
    ELEMENTS {[[integer , reference [,description [,help]? ]?;<cond>]+}
    PRIVATE boolean-specifier;
    VALIDITY boolean-specifier;
    VISIBILITY boolean-specifier;
}
```



```
public class EddlReferenceArray : EddlItemBase, IEddlDynamic
{
    public EddlSpecifier<EddlString> Label;
    public EddlSpecifier<EddlReferenceArrayElement> Elements;
}
```

Fig. 7. Representation of the REFERENCE ARRAY lexical description in C# language

### **2.5. Method compiler and virtual machine for method execution**

The definition of EDDL methods is described by the C language grammar [14]. Based on the C# open source library, the authors implemented a syntactic analyzer of the source code of methods.

The authors also developed a semantic analyzer to check the semantics of methods. This allowed

identifying several EDD device descriptions registered in the Field Communication Group that contain semantic errors in methods, such as access to non-existent variables.

To execute the methods, the authors developed a special stack-based virtual machine, the command set of which is a subset of Microsoft Intermediate Language (MSIL) instructions. This approach allows executing methods separately from the translation of the EDD language construct, which improves the solution safety. The methods are stored in the intermediate representation of the device description as a set of MSIL instructions and are immediately ready for execution on the VM.

**2.6. Mapping the EDD model to the OPC UA information model**

The FDI specification defines the mapping of EDDL and other information on FDI packages to the OPC UA information model [15]. Based on this mapping, the authors developed a mechanism to automatically match EDDL language elements with the relevant OPC UA nodes or attributes. Fig. 8 shows the mapping of the EDDL model to the OPC UA information model 8.

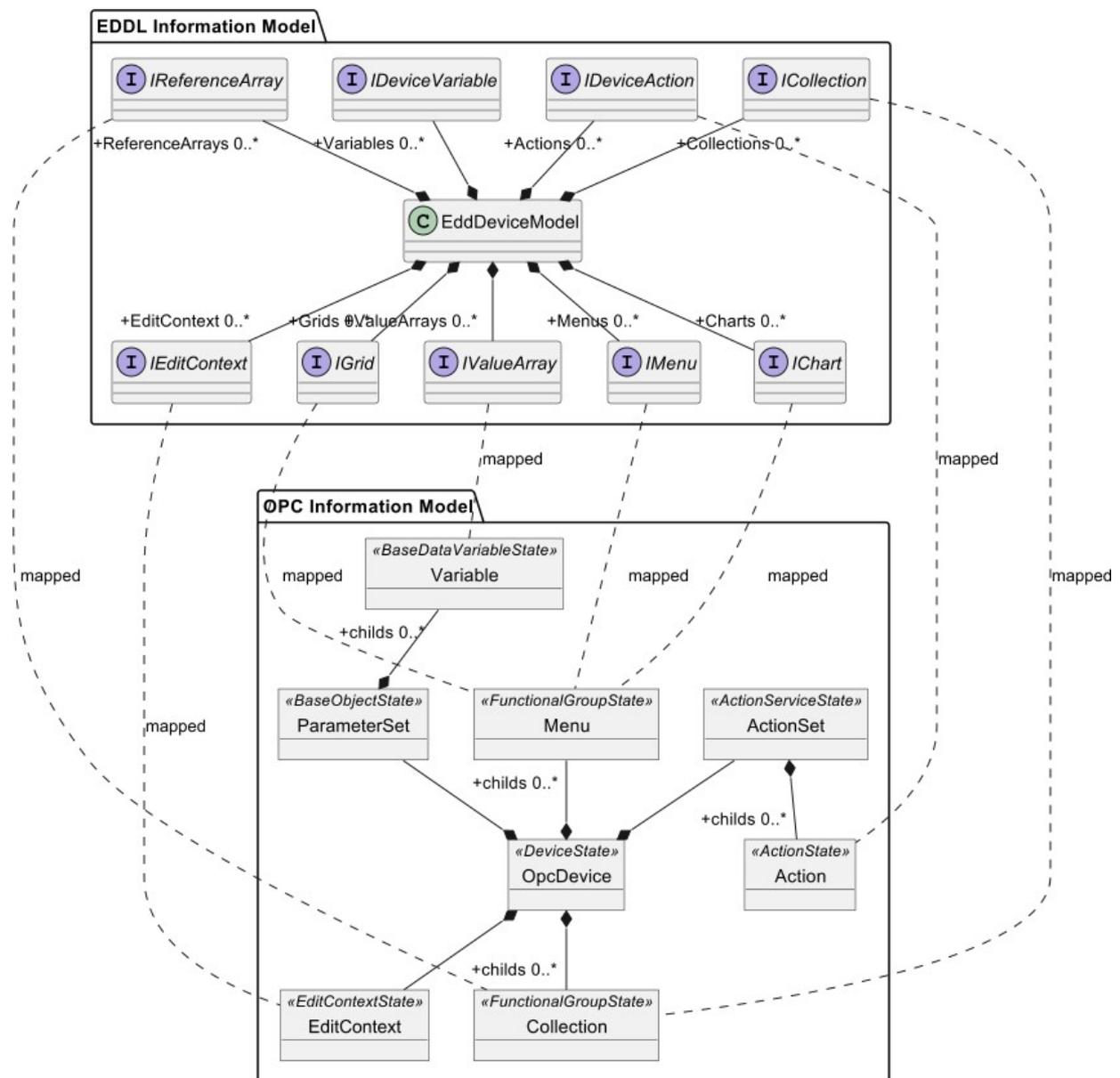


Fig. 8. Mapping of the intermediate EDD model to the OPC UA model

The main idea is to have an intermediate internal **EddDeviceModel** model. The elements of this model are dynamically updated and calculated each time they are accessed, as shown in Chapter 2.4.

Each time an element of the intermediate model is updated or calculated, the OPC UA information model is also updated using the notification mechanism. The intermediate model can be used for mapping to other data models, such as protocol Topics MQTT or FDT.

### 2.7. Updating of model elements

Model elements can be updated by two events: method call or data acquisition from a device. When a device is connected and readable device variables are selected, the DD OPC UA server selects a command to read the device using a special algorithm, as well as generates and sends a request to the device based on the EDD specification of the COMMAND element.

The device response is processed according to the description of the COMMAND element, the intermediate model variable to be updated is determined, and a new value received in the response is assigned thereto. The OPC UA information model is notified, and the model node corresponding to this variable is also updated with the new value.

### 3. Test setup

The goal of our test setup is to provide a platform for testing the dynamic integration of EDDL-based device descriptions into OPC UA. The test setup includes a mini-PC on an Astra Linux system, which hosts the server end of the OPC UA implementation, and a mini-PC running Windows or Linux, which runs the client end of OPC.

The OPC UA end of the system is based on the open source implementation of the OPC UA Server from the OPC UA Foundation. The client end is UaExpert developed by Unified Automation and a proprietary client exploiting the open source implementation of OPC UA Client from the OPC UA Foundation.

We used Emerson's Rosemount 3051 pressure transmitter and its EDD device description, downloaded from the Field Communication Group website. Fig. 9 shows the test environment.

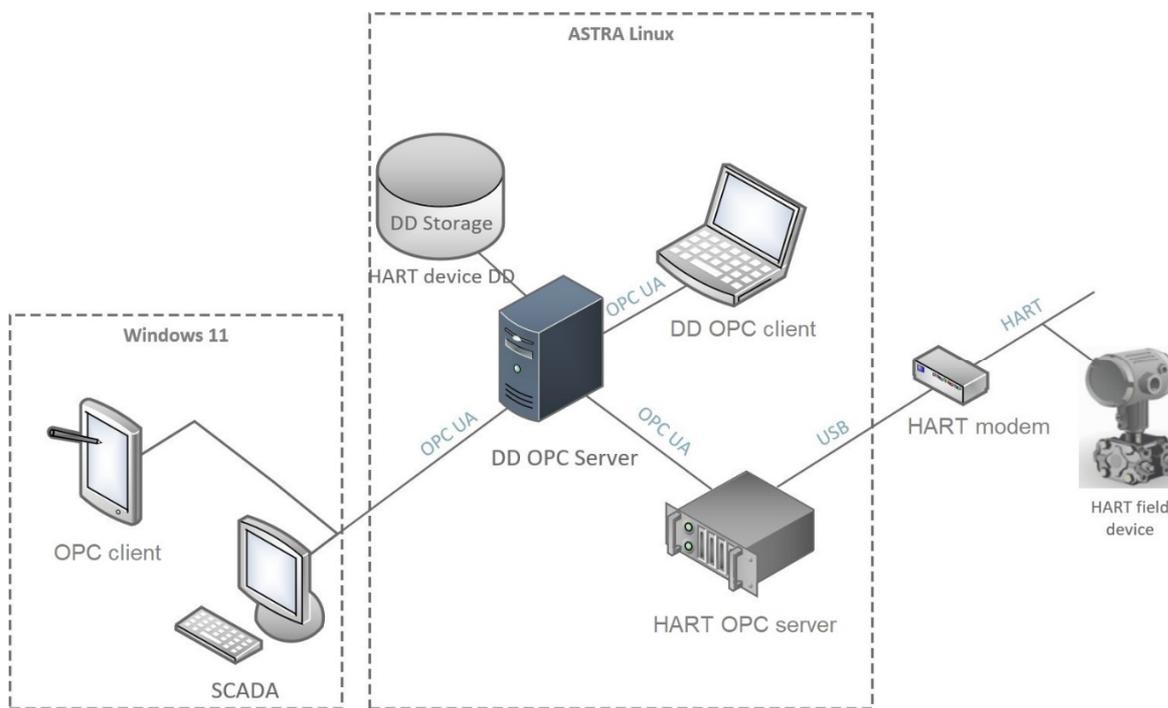


Fig. 9. Test environment

#### 3.1. Server end

We used an Intel Celeron J1900 mini-computer with 8GB RAM and 128GB eMMC manufactured by HIGOLE, running Astra Linux. The client connection is set over the network via a wireless WiFi module. NET Core 7.0 and a SQLite database containing the intermediate EDD format are used to run the server end.

During startup, the EDD OPC UA server loads the device description from the intermediate format database. The database can store several files with device descriptions. The database stored 90 files with descriptions in the intermediate format in the test environment.

Each description file in the database contains metadata used as a basis for the server to frame an intermediate information model and maps the elements of this model to the nodes of the OPC UA information model according to the method described in Chapter 2.6.

During operation, the server calls over the device according to the parameters selected by the clients and updates the intermediate model and the OPC UA information model as described in Chapter 2.7. The server can both read and record parameters directly to the transmitter.

### 3.2. Client end

The client end has two clients based on a computer with the Windows 10 operating system and the Linux Ubuntu 22.0 system running the UaExpert application and its proprietary UI OPC UA client able to display such elements of the EDDL language as MENU. These two programs were used to visualize the dynamic mapping of the EDD model to the OPC UA information model.

### 3.3. Testing results

Fig. 10 visualizes the OPC UA nodes using the UaExpert client. The model was framed dynamically using the EDD OPC UA Server running on a mini PC after processing the EDD device description of the Rosemount 3051 transmitter.

Fig. 11 visualizes the MENU device description component framed dynamically using the DD OPC UA Server running on a mini PC after processing the EDD device description of the Rosemount 3051 transmitter. All sensor parameters are read in real time via the HART protocol.

Fig. 12 shows the UI client running on a laptop. This device can be used as a HART communicator supporting EDD descriptions of all devices registered on the Field Communication Group website.

The device can also be used as a remote UI terminal to configure field transmitters and remotely monitor their parameters. This allows configuring all field equipment from an explosion-proof zone. The device is based on HIGOLE 1 Pro laptop with Windows 11 or Linux Ubuntu 22 installed. The UI Client can be run on both Windows and Linux.

The device uses wireless Wi-Fi to connect to the EDD OPC UA server with an EDD description database. The Rosemount 3051 transmitter is connected to this database and displays its readings in real time.

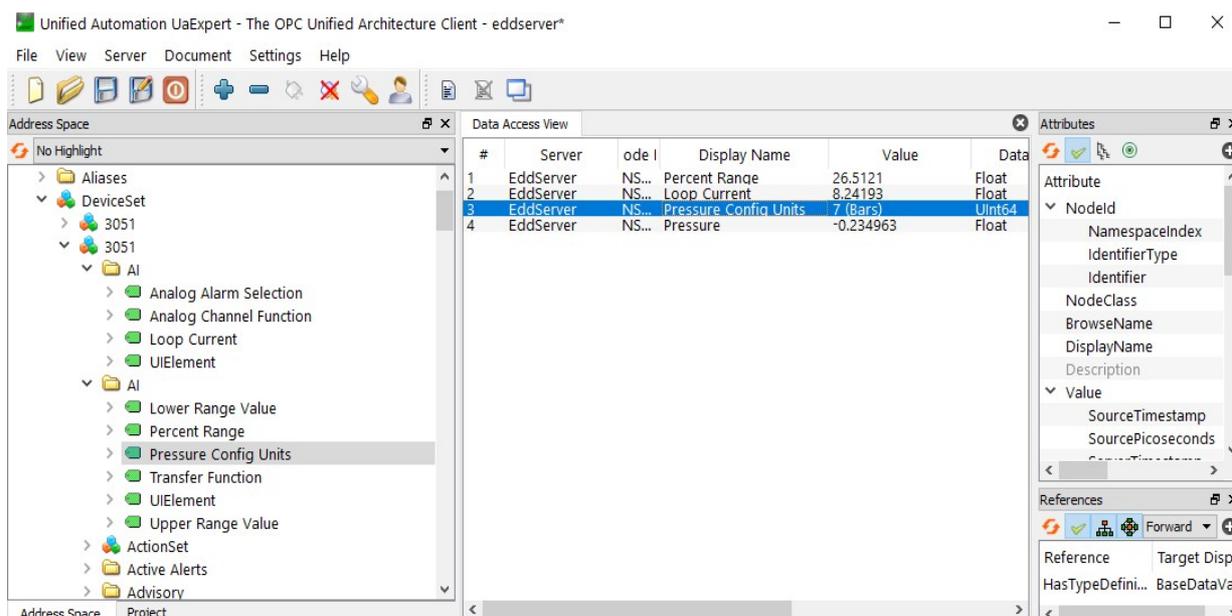


Fig. 10. Display of the OPC UA model structure and dynamic parameters of the Rosemount 3051 transmitter on the UaExpert OPC UA client framed on the basis of the EDD description

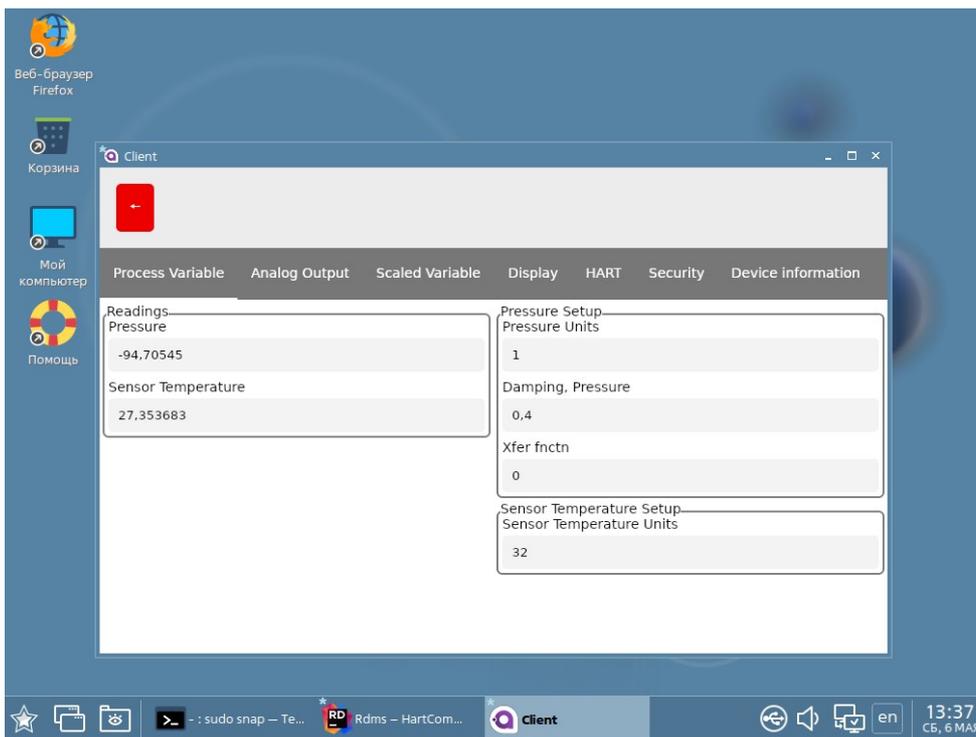


Fig. 11. The authors' OPC UA UI client on the Astra Linux system displaying the EDD description elements and parameters of the Rosemount 3051 transmitter

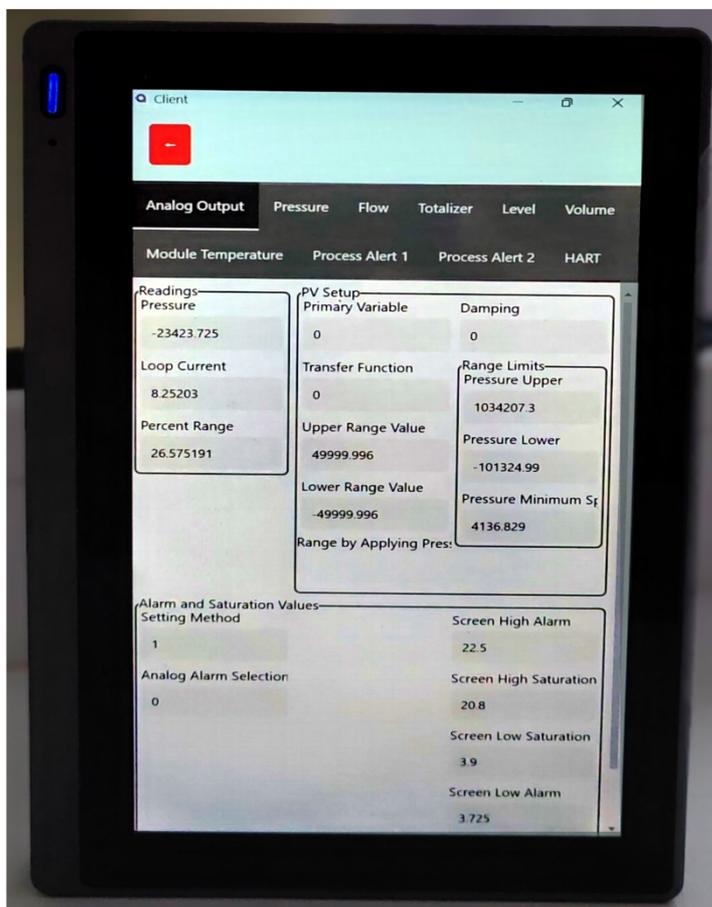


Fig. 12. OPC UA UI terminal displaying EDD description elements and parameters of the Rosemount 3051 transmitter

### Conclusions and prospects

The authors presented an approach to the dynamic mapping of EDDL language-based device descriptions to OPC UA for integrating field devices into control systems. They demonstrated solutions to such problems as processing a binary EDD description file, translating and calculating the values of EDD description elements, compiling and running DD methods on a virtual machine, dynamic updating the OPC UA information model, and ultimately integrating field transmitters into any system with the open OPC UA protocol. They created a working prototype of the OPC UA DD server running on the Astra Linux operating system.

This approach proved to be efficient and was tested on 60 device descriptions registered in the Field Communication Group. The work is underway to improve the architecture of system components for using the EDD description translation library in third-party applications and devices, such as HART communicators, pressure and temperature transmitter calibrators.

Works are also underway to interpret and convert the original EDDL files (see Chapter 2.3) to enable field device manufacturers to convert the EDDL source code directly into the intermediate system format.

The paper is recommended for publication by the program committee of the All-Russian Scientific Conference with International Participation “Digital Industry: Status and Development Prospects (DISP) 2023”.

### References

1. Bushuev O.Yu., Tugova E.S., Motorina M.A. Algorithms for In-line Pressure Transmitters Condition Monitoring. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(3):57–65. DOI: 10.14529/ctcr200306
2. Unified EDDL Technical Specifications. Available at: <https://www.fieldcommgroup.org/fdi-specifications> (accessed 24.12.2024).
3. The FDT Group Resources Library. Available at: <https://www.fdtgroup.org/resources/?category=fdt-1-2-specifications,fdt-1-2-1-specifications,fdt-2-0-specifications,fdt-2-1-specifications,fdt-3-0-specifications> (accessed 24.12.2024).
4. FDI Technical Specifications. Available at: <https://www.fieldcommgroup.org/fdi-specifications> (accessed 24.12.2024).
5. Gunzert M. Compatibility and interoperability in field device integration – A view on EDDL, FDT and FDI. In: *2015 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*. 2015. P. 941–946. DOI: 10.1109/SICE.2015.7285561
6. OPC Unified Architecture Core Specification. Available at: <https://opcfoundation.org/developer-tools/documents/?type=Specification> (accessed 24.12.2024).
7. Yuan H., Liu F. Research on OPC UA Based on FDT/DTM and EDDL. In: *2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation*. Zhangjiajie, China; 2011. P. 992–995. DOI: 10.1109/ICDMA.2011.246
8. Nsiah K.A., Schappacher M., Sikora A. Dynamic mapping of EDDL device descriptions to OPC UA. *2nd Int'l Conf. on Measurement Instrumentation and Electronics 9–11 June 2017, Prague, Czech Republic. Journal of Physics: Conference Series*. 2017;870:012006. DOI: 10.1088/1742-6596/870/1/012006
9. FCG TS61804-3 EDDL Syntax and Semantics. Available at: <https://library.fieldcommgroup.org/61804/TS61804-3> (accessed 24.12.2024).
10. TS62769-8 Field Device Integration (FDI) – Part 8: EDD to OPC-UA Mapping. Available at: <https://library.fieldcommgroup.org/62769/TS62769-8> (accessed 24.12.2024).
11. UA Part 5: Information Model. Available at: <https://opcfoundation.org/developer-tools/documents/view/162> (accessed 24.12.2024).
12. UA Part 1: Overview and Concepts. Available at: <https://opcfoundation.org/developer-tools/documents/view/158> (accessed 24.12.2024).
13. FCG TS62769-1 FDI Architecture. Available at: <https://library.fieldcommgroup.org/62769/TS62769-1> (accessed 24.12.2024).
14. ISO/IEC 9899:1999 Programming languages – C. Available at: <https://www.iso.org/standard/29237.html> (accessed 24.12.2024).
15. TS62769-5 Field Device Integration (FDI) – Part 5: Information Model. Available at: <https://library.fieldcommgroup.org/62769/TS62769-5> (accessed 24.12.2024).

***Information about the authors***

**Sergey V. Kolodii**, Ass. Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; CEO, LLC “Distributed Remote Monitoring Systems”, Chelyabinsk, Russia; kolodiisv@susu.ru.

**Dmitry V. Kurkin**, Lead Software Engineer, LLC “Distributed Remote Monitoring Systems”, Chelyabinsk, Russia; dkurkin84@yandex.ru.

**Maxim A. Monakhov**, Lead Software Engineer, LLC “Distributed Remote Monitoring Systems”, Chelyabinsk, Russia; max-mawork@yandex.ru.

**Roman M. Gaifulin**, Lead Software Engineer, LLC “Distributed Remote Monitoring Systems”, Chelyabinsk, Russia; gr0ker@yandex.ru.

***Информация об авторах***

**Колодий Сергей Владимирович**, доц. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; генеральный директор, ООО «Распределенные системы дистанционного мониторинга», Челябинск, Россия; kolodiisv@susu.ru.

**Куркин Дмитрий Викторович**, ведущий инженер-программист, ООО «Распределенные системы дистанционного мониторинга», Челябинск, Россия; dkurkin84@yandex.ru.

**Монахов Максим Алексеевич**, ведущий инженер-программист, ООО «Распределенные системы дистанционного мониторинга», Челябинск, Россия; max-mawork@yandex.ru.

**Гайфулин Роман Маратович**, ведущий инженер-программист, ООО «Распределенные системы дистанционного мониторинга», Челябинск, Россия; gr0ker@yandex.ru.

***Contribution of the authors:*** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

***Вклад авторов:*** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***The article was submitted 31.05.2024***

***Статья поступила в редакцию 31.05.2024***

## АЛГОРИТМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ОШИБОК В БАЗАХ ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**С.А. Баркалов**, [bsa610@yandex.ru](mailto:bsa610@yandex.ru)  
**В.Е. Белоусов**, [vbelousov@cchgeu.ru](mailto:vbelousov@cchgeu.ru)  
**О.А. Просолупов**, [vigasu@rambler.ru](mailto:vigasu@rambler.ru)

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются диагностические системы, которые по своим функциям предназначены для помощи пользователю в разрешении следующей проблемной ситуации: по набору значений частных признаков, описывающих состояние объекта исследования, требуется определить, какими свойствами этот объект обладает. Такие задачи могут возникать, например, в медицинской диагностике (по набору симптомов, описывающих состояние больного, врач должен вынести заключение о характере заболевания), в технической диагностике (по ряду показателей работы системы определяется причина сбоя или поломки), в геологии (на основе данных геологоразведки сделать вывод о наличии месторождений полезных ископаемых) и т. д. К сожалению, для решения подобных задач не всегда возможно применение методов машинного обучения или глубокого машинного обучения, поэтому единственным выходом является использование экспертных механизмов. **Цель исследования** заключается в формировании базы знаний для решения задач диагностики, которые должны содержать в себе решающие правила опытных экспертов, позволяющих строить классификацию всех возможных состояний объекта в предварительно структурированной проблемной области, классами которой являются подмножества состояний, обладающих одним и тем же свойством. **Методы исследования.** Для решения задач формирования непротиворечивой базы знаний применяются методы бинарной классификации, теории графов. При исправлении ошибок в классификации состояний отсутствует возможность однозначного проведения необходимых изменений в классификации ранее идентифицированных состояний, так как устранение ошибок нельзя осуществить отдельно для каждого класса. В этом случае каждому состоянию должен быть назначен только один класс принадлежности, поэтому возможное добавление класса принадлежности некоторым состояниям приводит к необходимости исключения ранее назначенных им классов принадлежности, что достигается применением направленных графов. **Результаты.** Для проведения опроса специалиста, исследующего электроэнцефалограмму, изначально было сформировано все многообразие возможных состояний, которые описываются значениями признаков. В общей сложности, количество подобных состояний равно 216. После получения заключения эксперта ему было предложено оценить степень вероятности наличия заболевания или его симптомов в данном состоянии, используя термины «сильная», «средняя» и «слабая» степени вероятности. Для врача это означало, что перед ним стояла стандартная задача по постановке диагноза. В результате использования рациональной процедуры опроса, в ходе которой было представлено наиболее информативное состояние, удалось за короткий период времени провести классификацию возможных состояний и получить ответы на все вопросы. Всего было задано около 40 вопросов. С помощью системы результаты классификации были сведены в единую базу знаний, которая включала в себя номера состояний, классы принадлежности (диагнозы) и номера степени вероятности для каждого из них. Такое представление знаний имеет место быть потому, что каждое состояние может быть описано набором признаков, которые имеют однозначное соответствие его номеру. Таким образом, благодаря использованию такой организации данных в базе знаний системы можно вычислить номер из базы знаний по совокупности симптомов пациента и определить его диагноз. **Заключение.** Для того чтобы получить от экспертов исчерпывающую и непротиворечивую совокупность правил, которые будут основаны на простых и понятных действиях, необходимо применить предложенный подход к решению задачи экспертной классификации. В диагностической системе полученные знания легко объединяются в базу знаний, которая экономит ресурсы памяти и быстро находит решение проблемы. Несомненно то, что приобретенные классификации могут быть представлены в традиционной для экспертных систем форме продуктов. Как показал опыт использования диагностической системы, предлагаемый нами способ организации данных имеет более высокую эффективность в сравнении с традиционным.

**Ключевые слова:** алгоритм, бинарная классификация, граф, диагностика, база знаний, проблема

**Для цитирования:** Баркалов С.А., Белоусов В.Е., Просолупов О.А. Алгоритмы выявления и устранения ошибок в базах знаний экспертных диагностических систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 18–29. DOI: 10.14529/ctcr250102

Original article

DOI: 10.14529/ctcr250102

## ALGORITHMS OF IDENTIFICATION AND ELIMINATION OF MISTAKES IN KNOWLEDGE BASES OF EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEMS

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru

V.E. Belousov, vbelousov@cchgeu.ru

O.A. Prosolupov, vigasu@rambler.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract.** In this work diagnostic systems which on the functions are intended for the help to the user in permission of the following problem situation are considered: it is required to determine by a set of values of the private signs describing a condition of an object of a research. what properties this object has. Such tasks can arise, for example, in medical diagnostics (on a set of the symptoms describing a condition of the patient, the doctor has to take out the conclusion about the nature of a disease); in technical diagnostics (the reason of failure or breakage is determined by a number of indicators of work of a system); in geology (on the basis of data of geological exploration to draw a conclusion on existence of mineral deposits), etc. Unfortunately, for the solution of similar tasks use of methods of machine learning or deep machine learning therefore the only exit is use of expert mechanisms is not always possible. **The research objective** consists in forming of the knowledge base for the solution of problems of diagnostics which have to comprise decisive rules of the skilled experts allowing to build classification of all possible conditions of an object in previously structured problem area which classes are subsets of the states having the same property. **Research methods.** Methods of binary classification, the theory of counts are applied to the solution of problems of forming of the consistent knowledge base. When proofreading in classification of states there is no possibility of unambiguous carrying out necessary changes in classification of earlier identified states as elimination of mistakes cannot be carried out separately for each class. In this case to each state only one class of accessory therefore possible addition of a class of accessory to some states results in need of an exception of the accessory classes which are earlier appointed by it that is reached by use of the directed counts has to be appointed. **Results.** For holding poll of the specialist investigating the electroencephalogram initially all variety of possible states which are described by values of signs was created. In total, the quantity of similar states is equal to 216. After obtaining the expert opinion it was offered to it to estimate degree of probability of existence of a disease or its symptoms in this state, using terms “strong”, “average” and “weak” degrees of probability. It meant for the doctor that he was faced by a standard task of diagnosis. As a result of use of the rational procedure of poll during which the most informative state was provided it was succeeded to carry out classification of possible states for a short span and to receive answers to all questions. In total about 40 questions were asked. By means of a system, results of classification were reduced in the uniform knowledge base which included numbers of states, classes of accessory (diagnoses) and numbers of degree of probability for each of them. Such representation of knowledge takes place to be in a look because each state can be described by a feature set which have unambiguous compliance to its number. Thus, thanks to such data structure in the knowledge base of a system it is possible to calculate number from the knowledge base on set of symptoms of the patient and to define his diagnosis. **Conclusion.** To receive exhaustive and not contradictory set of rules which will be based on simple and clear actions from experts it is necessary to apply the offered approach to the solution of a problem of expert classification. In a diagnostic system the gained knowledge easily unites in the knowledge base which saves resources of memory and quickly finds a solution. Undoubtedly, the fact that the acquired classifications can be provided in a form of products, traditional for expert systems. As showed the experience of use of a diagnostic system offered by us a way of data structure, has higher performance in comparison with traditional.

**Keywords:** algorithm, binary classification, count, diagnostics, knowledge base, problem

**For citation:** Barkalov S.A., Belousov V.E., Prosolupov O.A. Algorithms of identification and elimination of mistakes in knowledge bases of expert diagnostic systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):18–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250102

### Введение

В различных областях человеческой деятельности лица, принимающие решения (ЛПР), вынуждены работать в ситуациях, где их знания недостаточно полны, а будущие последствия принятых решений обладают значительной неопределенностью. В этих случаях они вынуждены полагаться на свой опыт и интуицию. С развитием вычислительной техники возникла идея создания экспертных систем, которые могли бы служить советчиками и консультантами для менее опытных руководителей. Задача построения таких систем возникла в двух направлениях исследований. Во-первых, в рамках работ по искусственному интеллекту появились так называемые экспертные системы [1]. Во-вторых, в рамках работ по принятию решений возникли системы поддержки принятия решений [2]. И те, и другие системы имеют в своем составе базу знаний (БЗ), в которой содержатся знания опытного эксперта.

В процессе формирования БЗ необходимо получить большой объем экспертной информации. Организация и проведение экспертного опроса требуют значительных трудозатрат как разработчиков, так и самих экспертов. БЗ должна удовлетворять многим требованиям, среди которых важнейшими являются обоснованность, полнота и непротиворечивость содержащейся в ней информации. Обоснованность БЗ определяется компетентностью эксперта, знания которого используются при ее построении. Полнота БЗ означает ее способность давать рекомендации (решения) во всех гипотетически возможных ситуациях в выделенной предметной области. Под непротиворечивостью БЗ обычно понимается ее способность гарантировать получение однозначного решения для любой рассматриваемой ситуации. Следовательно, необходимо предусмотреть средства для проверки экспертной информации и анализа ее непротиворечивости.

В настоящее время вопрос о способах оценки качества полученных экспертных знаний весьма противоречив. В многочисленных работах по экспертным системам, как правило, лишь отмечается, что качество экспертных систем зависит от полноты и совершенства их баз знаний [3]. Как правило, заполнение БЗ системы осуществляется посредством введения в нее данных об известных эксперту закономерностях, основных элементах и структуре взаимосвязей в изучаемой предметной области. Расширение БЗ выполняется в ходе работы эксперта с системой, нахождении им пробелов в БЗ и их последовательном заполнении (зачастую методами математической статистики, что не всегда корректно). При этом процесс формирования БЗ носит в целом фрагментарный характер, является трудоемким и не обеспечивает выполнения указанных выше требований.

Одним из видов систем, основанных на знаниях, являются диагностические системы, которые по своим функциям предназначены для помощи пользователю в разрешении следующей проблемной ситуации: по набору значений частных признаков, описывающих состояние объекта исследования, требуется определить, какими свойствами этот объект обладает. Базы знаний для решения таких задач должны содержать в себе решающие правила опытных экспертов, позволяющих строить классификацию всех возможных состояний объекта в предварительно структурированной проблемной области, классами которой являются подмножества состояний, обладающих одним и тем же свойством.

В работе предлагается новый подход к выявлению экспертных знаний для формирования БЗ диагностических систем.

### Постановка задачи

Принять решение о создании БЗ диагностической системы, опираясь на экспертную классификацию, можно следующим образом.

Предположительно, объект исследования может обладать множеством характеристик  $P = \{P_0, P_1, \dots, P_L\}$ . Согласно исследованиям, эти свойства можно обнаружить в его характеристиках с помощью значений  $M$  признаков ( $m = \overline{1, M}$ ), которые характеризуют различные стороны объекта. Для каждого  $m$ -го признака существует множество возможных значений:  $Q_m = \{q_{m_1}, q_{m_2}, \dots, q_{m n_m}\}$ , где  $n_m$  – число возможных значений  $m$ -го признака. Мы можем заметить то, что характеристики и возможные значения этих признаков сформулированы на естественном языке.

В Декартовом произведении  $A = Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_M$  содержится множество всех возможных состояний объектов, которые могут быть определены как возможные и в которых они могут обладать свойствами из множества  $P$ . Данное состояние  $a_i \in A$  можно описать с помощью вектора  $\bar{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$ , где  $a_{im} \in Q_m, m = \overline{1, M}$ .

На основе знаний эксперта необходимо определить наличие соответствующих свойств  $P$  для каждого состояния из  $A$  и, опираясь на эти знания, выстроить классификацию множества  $A = \bigcup_{l=0}^L K_l$  таким образом, чтобы каждое состояние  $a_i \in A$  относилось к определенному классу  $K_l$  в случае, если оно обладает по мнению эксперта свойством  $P$ . Класс  $K_0$  включает в себя состояния, при которых объекты не имеют ни одного из рассмотренных свойств [4].

Данные задачи могут быть сформулированы в зависимости от особенностей, которые будут влиять на ее постановку:

– в случае если объект в каждом из состояний  $a_i \in A$  имеет несколько свойств  $P$ , которые могут быть отнесены к одному из множества  $A$ , результатом классификации  $K_0, K_1, \dots, K_L$  должно быть покрытие множества множественными частями;

– в случае если объект в каждом из состояний  $a_i \in A$  имеет возможность обладать только одним из свойств множества  $P$ , то результатом классификации должно быть разделение множеств  $A$  на классы  $L + 1$ ;

– степень проявления свойств у объекта может быть различной в различных состояниях, которые относятся к данному классу, и тогда задача классификации будет дополнена требованием проведения экспертной оценки степени проявления свойств у различных состояний.

Экспертная классификация имеет дело с реальными задачами, которые имеют достаточно большой размер [3, 4]. Это может быть связано с большим количеством признаков и их возможных значений, которые могут быть определены. Как результат, можно сделать вывод, что непосредственная классификация экспертом всех состояний объекта, которая является простым и очевидным способом решения задачи, не представляется возможной. Проведение анализа отдельных ключевых правил эксперта, позволяющих классифицировать возможные состояния, требует определенных усилий и может быть трудоемким. Также не гарантируется полная и однозначная передача информации в случае, если они будут выявлены. При решении поставленной перед нами задачи необходимо разработать методику работы с экспертом, которая будет включать в себя систематизацию его классифицирующих правил и сокращение количества вопросов, на которые он должен будет отвечать. Кроме того, необходимо обеспечить проверку получаемой информации на соответствие ее стандартам и выявить возможные ошибки в ответах на вопросы.

Предлагаемый подход к решению задачи экспертной классификации основан на предположении о том, что степень отличности отдельных значений каждого признака для каждого свойства имеет свою собственную закономерность, которая не зависит от других признаков [4].

Допустим, что это можно описать так: если значения признака  $Q_m$  упорядочить по их особенной значимости для характеристики свойства  $P_l$ , то это может привести к введению на  $Q_m$  транзитивного и антирефлексивного бинарного отношения (линейный порядок):  $r_m^l: (q_{m_s}, q_{m_t}) \in r_m^l$ , если значение  $q_{m_s}$  более характерно для свойства  $P_l$ , чем значение  $q_{m_t}$ .

Поясним это на примере выявления вызванной синхронизации/десинхронизации на электроэнцефалограмме. Электроэнцефалография (ЭЭГ) является широко распространенным методом получения сигналов головного мозга, для снятия которых используются электроды, расположенные на поверхности головы [5]. ЭЭГ активность, представляющая собой волны приблизительно одной постоянной частоты, называется ритмом, при этом наиболее выраженный в ЭЭГ ритм считается доминирующим. Процесс, выражающийся в формировании регулярной, упорядоченной ритмической активности и нарастании амплитуды колебаний, является синхронизацией ритма, а нарушение ритмичности протекания волновых процессов с замещением упорядоченной синхронной волновой активности колебаниями, менее регулярными, разной частоты и меньшей амплитуды называют десинхронизацией.

В настоящее время приняты два способа регистрации ЭЭГ – монополярный и биполярный. При монополярном отведении разность потенциалов измеряют между двумя электрически активными участками головного мозга (оба электрода находятся на коже головы) (рис. 1).

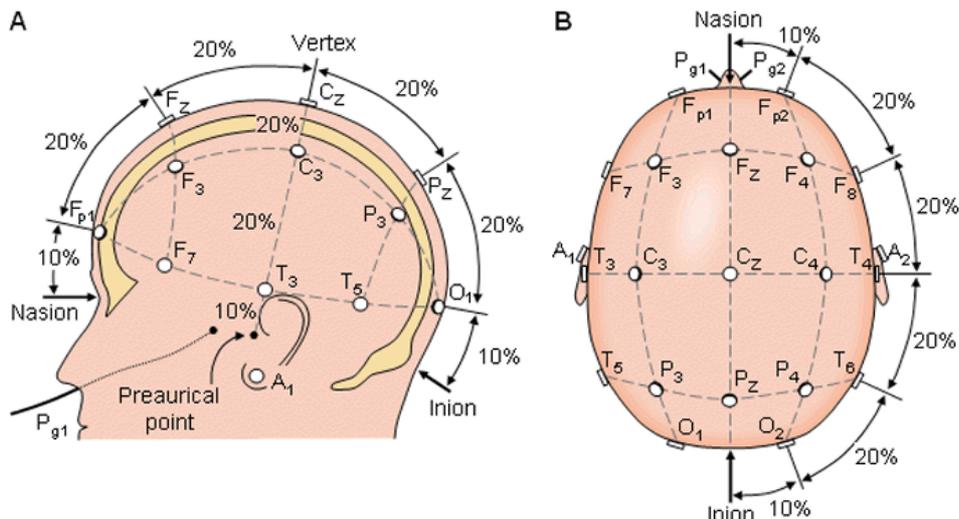


Рис. 1. Схема монтажа электродов электроосциллографа  
Fig. 1. Scheme of installation of electrodes of an elektro-oscilloscope

Данная система позволяет построить координатную сетку, в узлы которой ставят электроды, получающие буквенно-цифровое обозначение по участкам: лобные, центральные, теменные, височные, затылочные. Всего устанавливается 19 датчиков, суммарная ЭЭГ по которым представлена на рис. 2.

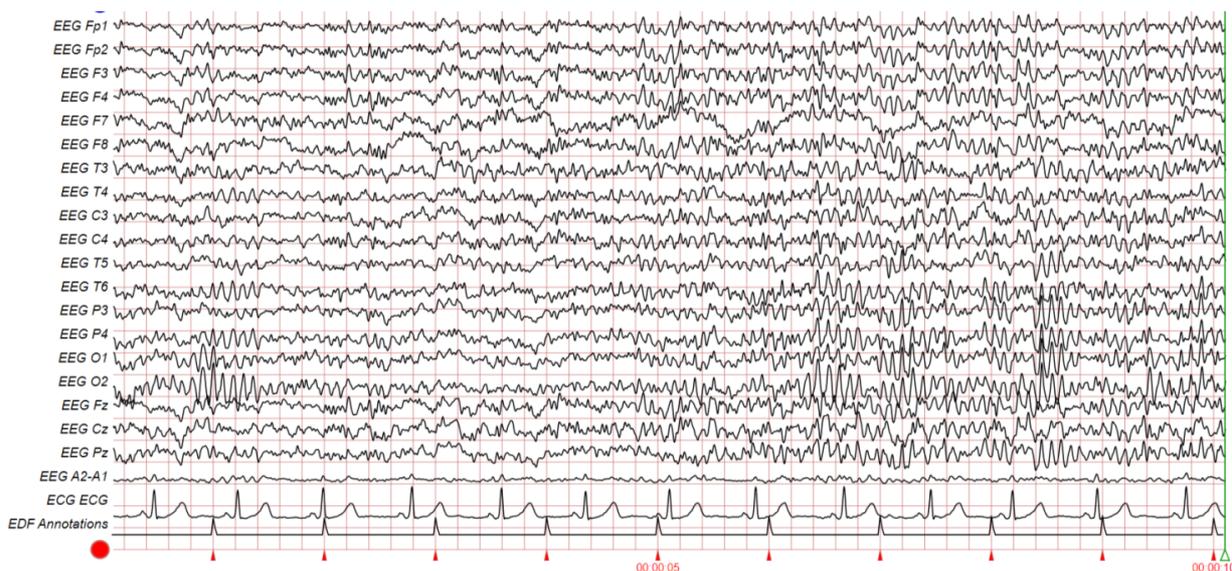


Рис. 2. Суммарная ЭЭГ по 19 датчикам  
Fig. 2. Total EEG on 19 sensors

В ходе анализа были определены правила выделения ритмов вызванной [4, 5]:

- синхронизации: это альфа-ритм, определяемый на теменной и затылочной областях головного мозга датчиками:  $P3, Pz, P4, O1, O2$  при амплитуде колебаний  $40\text{--}80\ \mu\text{В}$  и частоте  $7,5\text{--}25\ \text{Гц}$ ;
- десинхронизации: бета-ритм, определяемый на лобной и височной частях головного мозга датчиками:  $Fp1, Fp2, F7, F3, F2, F4, F8, T3, T4, T5, T6$  при амплитуде колебаний менее  $15\ \mu\text{В}$  и частоте  $14\text{--}35\ \text{Гц}$ .

С помощью такого подхода, как бинарные отношения характерности значений признаков для различных свойств и их сочетаний ( $r_m^l, m = \overline{1, M}, l = \overline{1, L}$ ), можно построить отношения доминирования по характеристике каждого свойства на множестве состояний объекта исследования [6]:

$$R^l = \{(a_s, a_l) \in A \times A | \forall m = \overline{1, M} (a_{tm}, a_{sm}) \in r_m^l \text{ и } \exists m_0 (l \leq m_0 \leq M) \text{ такое, что } (a_{sm_0}, a_{lm_0}) \in r_{m_0}^l\}, l = \overline{1, L}.$$

По сути, можно допустить вероятность того, что состояние, описываемое набором значений признаков и их сочетаний, не менее характерно для данного свойства объекта, также может быть определено экспертом, как его состояние:

$$\text{если } a_s \in K_l \text{ и } (a_t, a_s) \in R^l, \text{ то } a_t \in K_l. \quad (1)$$

Также можно сделать вывод о том, что если в некоторый момент времени объект исследования не обладает какой-то характеристикой, то это свойство не будет иметь место и в менее характерном для него состоянии:

$$\text{если } a_s \in K_l \text{ и } (a_s, a_t) \in R^l, \text{ то } a_t \in K_l. \quad (2)$$

При выполнении условий (1) и (2) можно сделать вывод о наличии свойств в ряде состояний, не проходя непосредственно идентификации с экспертом. Это даёт возможность организовать эффективную процедуру экспертного опроса, цель которого состоит в том, чтобы классифицировать все возможные состояния при уменьшении количества вопросов к эксперту [7].

### Обработка экспертной информации

Мы обозначим множество номеров формируемых классов  $K = \{0, 1, \dots, L\}$ . Мы можем представить состояние  $a_i \in A$  в виде двух множеств:  $C_i^+$  – множество номеров классов, которые соответствуют данному состоянию  $a_i$  и  $C_i^-$  – множество номеров классов, к которым состояние  $a_i$  не может быть отнесено (будем называть такие классы невозможными).

Полагаем, что  $a_i$  будет признано классифицированным, если

$$C_i^+ \cap C_i^- = \emptyset, \text{ а } C_i^+ \cup C_i^- = K. \quad (3)$$

Обозначим через подмножество состояний  $A^0 \subset A$ , те, которые имеют классификацию [8]. В начале проведения экспертного опроса  $\forall a_i \in A$ , мы полагаем,  $C_i^+ = \emptyset$ ,  $C_i^- = \emptyset$ ,  $A^0 = A$ . Когда заканчивается процесс проведения экспертного опроса, то  $A^0 = A$ .

Специальным образом в ходе экспертного опроса выбирается очередное состояние, которое будет предложено эксперту  $a_i \in A$ . Согласно заключению эксперта, состояние объекта имеет свой класс принадлежности, который представлен в виде перечня его номеров [9].

Таким образом, в состоянии  $a_i$  очевидным способом определяется множество  $C_i^+$ , а неявным –  $C_i^- = K \setminus C_i^+$ .

Далее состояние  $a_i$  классифицируется и получает информацию, которая помогает уменьшить неопределенность в отношении других состояний  $A^0 = A^0 \cup a_i$ .

Для каждого  $l \in C_i^+$  будет определено отдельное подмножество  $A_{il}^+ = \{a_j \in A | (a_j, a_i) \in R^l\}$ , которое мы для него установим.

Начиная с каждого  $a_j \in A_{il}^+$ , мы должны определить  $C_j^+ = C_j^+ \cup l$  его отдельное множество:

$$A_{il}^- = \{a_j \in A | (a_i, a_j) \in R^l\}$$

и для каждого  $a_j \in A_{il}^-$  положим  $C_j^- = C_j^- \cup l$ .

Для того чтобы показать работу алгоритма, можно воспользоваться ориентированными графами  $L$ , которые соответствуют бинарным отношениям доминирования, установленным по характеристикам: орграф  $G^l = \{A, R^l\}$  состояния из множества  $A$ , которые входят в состав орграфа, имеют свои вершины и дуги. Они объединяют их в качестве вершин и образуют отношения  $R^l$  между ними [10]. Эти отношения имеют направление от состояний  $P_l$ , которые являются более характерными для данного свойства, к менее характерным. (Обратим внимание, что все орграфы  $G^l$ ,  $l = \overline{1, L}$  имеют одинаковое количество вершин).

На рис. 3 показаны два орграфа  $G^1$  и  $G^2$  для двух характеристик  $P_1$  и  $P_2$ . В данном случае состояние характеризуется значениями двух признаков  $Q_1$  и  $Q_2$ .

В таблице содержатся номера значений признаков  $Q_1$  и  $Q_2$  в каждом из упорядочений по характерности для свойств  $P_1$  и  $P_2$ , определяемых отношениями  $r_1^1, r_1^2, r_2^1$  и  $r_2^2$ .

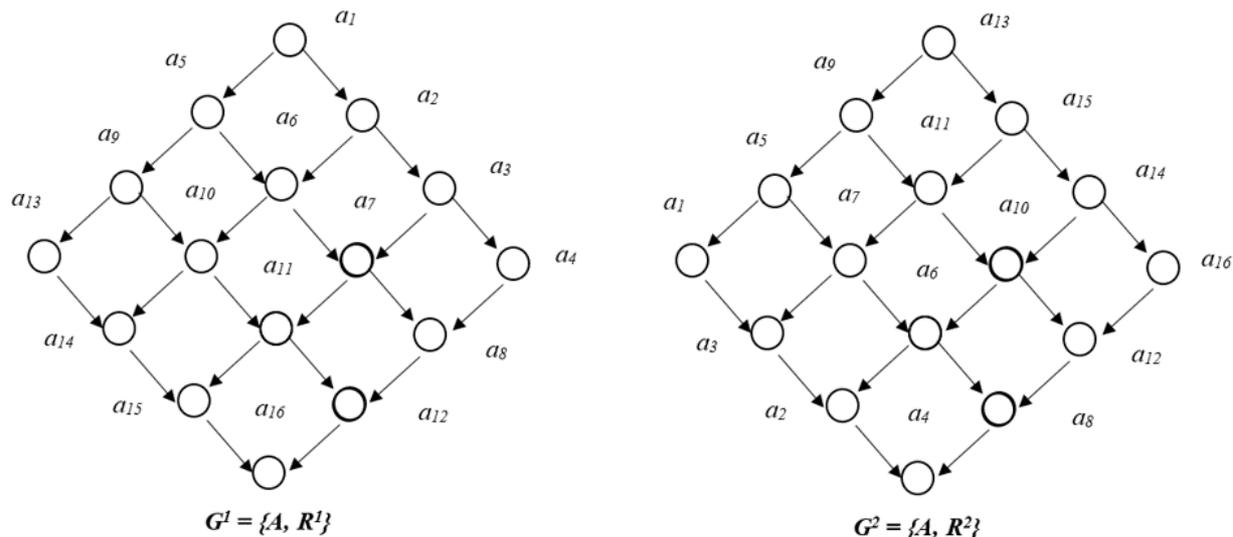


Рис. 3. Два орграфа  $G^1$  и  $G^2$  для двух характеристик  $P_1$  и  $P_2$   
Fig. 3. Two Artaud of columns of  $G^1$  and  $G^2$  for two characteristics of  $P_1$  and  $P_2$

Номера значений признаков  $Q_1$  и  $Q_2$   
Numbers of values of signs  $Q_1$  and  $Q_2$

Значения признака $Q_1$	Упорядоченная по характеристике для свойств		Значения признака $Q_2$	Упорядоченная по характеристике для свойств	
	$P_1$	$P_2$		$P_1$	$P_2$
$q_{11}$	1	4	$q_{21}$	1	1
$q_{12}$	2	3	$q_{22}$	2	2
$q_{13}$	3	2	$q_{33}$	3	3
$q_{14}$	4	1	$q_{44}$	4	4

Пусть на очередном шаге эксперту предъявляется состояние  $a_6$  и он определяет, что  $C_6^+ = \{1\}$  и соответственно  $C_6^- = \{0, 2\}$ .

Сформируем множество состояний  $A_{61}^+ = \{a_j \in A | (a_j, a_6) \in R^1\}$ , из рис. 1 видно, что  $A_6 = \{a_1, a_2, a_5\}$ .

Из условия (1) следует, что  $C_1^+ = C_2^+ = C_5^+ = \{1\}$ .

Сформируем множество  $A_{62}^- = \{a_j \in A | (a_6, a_j) \in R^2\}$ :  $A_{62}^- = \{a_2, a_4, a_8\}$ .

Из условия (2) следует, что  $C_4^- = C_8^- = \{2\}$ ; а  $C_2^- = \{0, 2\}$  и т. д.

Все, о чем говорилось ранее, относится к решению задачи покрытия множества состояний различными классами  $K_0, K_1, \dots, K_L$ . Для того чтобы построить разбиение множеств  $A$  на классы  $K_0, K_1, \dots, K_L$ , необходимо провести некоторые изменения в процедуре обработки экспертной информации [11]. Также и в общем случае, после того как эксперт классифицировал очередное предъявляемое ему состояние  $a_i \in A$ , можно предположить, что все эти состояния  $(a_j, a_i) \in R^l$  тоже имеют отношение к классу  $K_l$ . т. е.  $C_j^+ = \{l\}$ . При этом все эти состояния  $P_l$  можно отнести к классифицированным, так как они не обладают никакими другими характеристиками кроме того, что им присуще. В связи с этим операция определения невозможных классов для ряда иных состояний должна проводиться, опираясь на информацию обо всех состояниях, которые непосредственно или косвенно классифицированы на данном этапе.

Из условия (2) следует, что для каждого  $a_j \in A_{il}^+ \cup a_i$  для всех  $a_s \in A_{it}^- (t \neq l)$  надо положить  $C_s^- = C_s^- \cup t$ .

Процедуру назначения невозможных классов для всех таких состояний  $a_s$  можно сделать более эффективной, если для каждого свойства  $P_t (t \neq l)$  выделить на подмножестве  $A_{il}^+ \cup a_i$  подмножество Парето по отношению  $R^t$  (т. е. подмножество  $\pi_{it}$  состояний, недоминируемых [12, 13]

по отношению  $R^t$ ) и для каждого состояния  $a_s \in A$ , для которого  $\exists a_j \in \pi_{it}$  такое, что  $(a_j, a_s) \in R^t$ , положить  $C_s^- = C_s^- \cup t$ .

Для начала рассмотрим вопрос о том, какова степень проявления свойств у состояний, которые входят в один и тот же класс. Степени проявления свойств  $P_l$  могут быть определены с помощью значений  $\{P_l^1, P_l^2, \dots, P_l^n\}$ .

Также эти значения можно обозначить с помощью естественного языка, например: «сильная», «средняя» и «слабая» степени. Определить необходимо, какие именно степени выраженности состояний характерны для классов  $K_l$ .

В данной статье аналогичная задача классификации по порядку была рассмотрена в [12, 13]. На множестве  $\{P_l^1, P_l^2, \dots, P_l^n\}$  было определено отношение линейного порядка  $R^*$ , которое соответствовало тому, что  $(P_l^i, P_l^j) \in R^*$ , в случае если  $i < j$ . Благодаря использованию отношения  $r_m^l$  ( $m = \overline{1, M}$ ), которое характеризует значение каждого признака  $P_l$  для свойства и бинарного отношения  $R^l$  доминирования по характеристике данного свойства, можно уменьшить количество вопросов к эксперту в данной задаче. Каким образом, в случае если эксперт определяет для состояния  $a_i \in K_l$  степень  $P_l^t$  и делает вывод о том, что состояние  $\forall a_j \in K_l$  характеризуется степенью проявления свойств  $(a_i, a_j) \in R^l$ , становится известно, что степень проявления свойства  $P_l$  не может быть больше, чем  $P_l^t$ .

Если рассматривать все рассмотренные случаи, следует помнить о том, что множество состояний  $A$  может быть определено с помощью формального способа как декартово произведение шкал признаков. Находящиеся в нем состояния могут быть описаны различными значениями признака, которые противоречат друг другу. Предложенная процедура предполагает использование возможности ответа «состояние противоречиво» с указанием номеров значений признаков, которые не могут быть совмещены в реальной ситуации. В результате этого стало возможным исключить из множества все состояния, в описании которых присутствует указанная экспертом неоднозначная комбинация признаков [13].

### Выявление ошибок в ответах эксперта и процедуры их устранения

Экспертный опрос, проводимый в целях выявления причин ошибочных ответов, должен учитывать возможность возникновения таких ситуаций. Это может быть вызвано усталостью эксперта или его недостаточной последовательностью при оценке сложных состояний, а также несоответствием модели (отношений  $r_m^l$ , ( $m = \overline{1, M}$ ;  $l = \overline{1, L}$ )) к реальной ситуации, которая имеет место быть.

*Определение.* Мы можем назвать ошибкой в построенной классификации состояний допущение нарушения условия (1) (т. е. такую ситуацию, когда состояние с более значимыми для данного качества характеристиками не относится к данному классу, в то время как к данному классу отнесено состояние, описываемое менее значимыми для этого класса характеристиками).

В [14] рассматривается ситуация, когда анализ и устранение ошибок при решении задачи о порядке проведения операций над множеством производится после классификации всех состояний исходного множества. С помощью диалогового решения задачи экспертной классификации появилась возможность проводить оперативную проверку создаваемой классификации на наличие в ней ошибок, которые могут быть обнаружены экспертом.

Для того чтобы построить покрытие множеств  $A$ , на следующем этапе экспертного опроса уже проведена классификация некоторых состояний, которые объединены в множество  $A^0$ , и эксперту предоставляется для идентификации новое состояние  $a_i$ . Если в результате проведения процедуры, описанной в предыдущем разделе, удалось определить множество классов  $A^0$  принадлежности  $C_i^+$  и  $C_i^-$  – множество номеров невозможных классов для состояний, то можно предположить, что это произошло благодаря косвенному определению множества номеров классов принадлежности и множеству номеров невозможных типов состояний  $a_i$ . В момент непосредственного определения состояния эксперт явно указывает на наличие множеств классов принадлежности  $\tilde{C}_i^+$  и их номера, а также косвенные номера невозможных классов  $\tilde{C}_i^-$ .

*Утверждение.* Если задача покрытия имеет целью обеспечить отсутствие ошибок в классификации состояний  $A^0 = A^0 \cup a_i$ , то необходимо выполнить следующие условия:

$$C_i^+ \subset \tilde{C}_i^+, C_i^- \subset \tilde{C}_i^-. \quad (4)$$

*Доказательство.* Пусть при выполнении соотношений (4) в построенной классификации имеются ошибки. Тогда в силу определения ошибок  $\exists a_j, a_i$  и  $K_l$  такие, что либо

$$(a_i, a_j) \in R^l, a_j \in K_l \text{ и } a_i \notin K_l,$$

либо

$$(a_j, a_i) \in R^l, a_j \notin K_l \text{ и } a_i \in K_l.$$

Так как  $a_j \in K_l$ , а  $(a_i, a_j) \in R^l$ , то  $l \in C_i^+$ . Но по условию  $a_i \notin K_l$ , т. е.  $l \notin \tilde{C}_i^+$ , следовательно,  $C_i^+ \subset \tilde{C}_i^+$ . Аналогично во втором случае имеет место соотношение  $C_i^- \subset \tilde{C}_i^-$ , а это противоречит сделанным предположениям. Тем самым доказана достаточность утверждения. Заметим, что для задачи разбиения в силу того, что  $|C_i^+| = |\tilde{C}_i^+| = 1$ , необходимо и достаточно выполнение соотношения  $C_i^- \subset \tilde{C}_i^-$ .

Ошибки в построенной классификации состояний могут быть следствием как ошибок эксперта, который определяет классы принадлежности для каждого состояния,  $a_i$ , так и ошибок, которые возникают при классификации некоторых состояний  $A^0$ , которые имеют с состоянием нарушение условия (1). Опишем через некоторое количество способов множество подобных состояний  $A_{err}$ . Для исправления ошибок необходимо повторно представить эксперту состояние  $a_i$  и  $a_j \in A_{err}$ , для того чтобы он смог более подробно рассмотреть их. Ошибочность модели, которую разработал эксперт, и необходимость ее пересмотра может быть подтверждена отказом эксперта изменять данные им ранее ответы. В случае, когда происходит повторное рассмотрение состояний  $a_i$  и  $a_j \in A_{err}$  и эксперт дает новый ответ по поводу состояния, процесс обработки этого ответа будет осуществляться заново. В соответствии с процедурой, описанной в предыдущем разделе, это происходит в порядке, аналогичном тому, как это описано в предыдущих разделах. В случае, если эксперт признает свою ошибку при классификации состояний  $A_{err}$ , он должен будет внести изменения в их классификацию [15].

Обозначим следующим образом алгоритм внесения исправлений в ошибочную классификацию:

–  $S_i^+$  – классификация состояний из-за неправильного определения классов принадлежности приводит к множеству номеров, которые не соответствуют друг другу.  $A^0: S_i^+ = C_i^+ \setminus (C_i^+ \cap \tilde{C}_i^+)$ ;  
–  $S_i^-$  – среди множества номеров классов, которые были ошибочно исключены из числа возможных для определенного состояния в результате классификации состояний из множества других факторов, есть некоторое количество классов, которые не подходят для данного состояния.  $A^0: S_i^- = C_i^- \setminus (C_i^- \cap \tilde{C}_i^-)$ .

Для задачи покрытия алгоритм будет иметь следующий вид:

**Шаг 1.** Для каждого  $l \in S_i^+$  сформируем подмножество  $A_{err}^l \subset A_{err}$  такое, что  $A_{err}^l = \{a_j \in A_{err} \mid (a_i, a_j) \in R^l, a_j \in K_l\}$  и  $\forall a_j \in A_{err}^l$ , полагаем  $C_j^+ = C_j^+ \setminus l$ .

**Шаг 2.** Для каждого  $l \in S_i^-$  сформируем подмножество  $A_{err}^l \subset A_{err}$  такое, что  $A_{err}^l = \{a_j \in A_{err} \mid (a_j, a_i) \in R^l, a_j \notin K_l\}$  и  $\forall a_j \in A_{err}^l$ , полагаем  $C_j^+ = C_j^+ \setminus l$ .

В алгоритме используется диалоговый режим, в котором все изменения, внесенные в классификацию, должны быть согласованы с экспертом.

Исправление ошибок, допущенных в классификации состояний  $A^0$ , невозможно осуществить в единственном экземпляре для каждого класса, так как не существует способа проведения необходимых изменений в каждой категории ранее определенных состояний. Данный случай предполагает, что каждому из состояний должен быть назначен только один класс принадлежности. В этом случае возможно (в процессе исправления ошибки) добавление дополнительного класса принадлежности к некоторым из этих состояний, что приводит к необходимости исключить ранее назначенные им классы принадлежности  $A^0$ . Следовательно, это может привести к исключению классов принадлежности у некоторых других состояний, в результате чего они снова станут неклассифицированными.

Алгоритм коррекции в задаче разбиения имеет следующий вид:

**Шаг 1.** Пусть  $a_i \in K_l$ :

**Шаг 2.** Сформируем множество  $A_{err} = \{a_j \in A^0 \mid (a_j, a_i) \in R^l, a_j \notin K_l\}$ .

**Шаг 3.**  $\forall a_j \in A_{err} \forall t \neq l$  ( $t = \overline{1, L}$ ) сформируем множества:

$$A_{err}^{jt} = \{a_q \in A^0 \mid (a_j, a_q) \in R^l \text{ и } a_q \notin K_l\}.$$

**Шаг 4.**  $\forall a_q \in A_{err}^{jt}$  положим  $C_q^+ \neq \emptyset$  и  $A^0 = A^0 \setminus a_q$ .

### Выводы

Для проведения опроса специалиста, исследующего ЭЭГ, изначально было сформировано все многообразие возможных состояний, которые описываются значениями признаков. В общей сложности, количество подобных состояний равно 216. Когда происходил диалог, специалист получал на естественном языке изложение своего состояния, являющееся своеобразным фрагментом истории болезни пациента. На экране дисплея было представлено «меню» возможных ответов, включающее в себя: 1 – синхронизация, 2 – десинхронизация, 3 – состояние покоя, 4 – ни одно из заболеваний, перечисленных ранее, 100 – ситуация неоднозначна. После получения заключения эксперта ему было предложено оценить степень вероятности наличия заболевания или его симптомов в данном состоянии, используя термины «сильная», «средняя» и «слабая» степени вероятности. Для врача это означало, что перед ним стояла стандартная задача по постановке диагноза. В результате использования рациональной процедуры опроса, в ходе которой было представлено наиболее информативное состояние, удалось за короткий период времени провести классификацию возможных состояний и получить ответы на все вопросы. Всего было задано около 40 вопросов. С помощью системы результаты классификации были сведены в единую базу знаний, которая включала в себя номера состояний, классы принадлежности (диагнозы) и номера степени вероятности для каждого из них. Такое представление знаний имеет место быть потому, что каждое состояние может быть описано набором признаков, которые имеют однозначное соответствие его номеру. Таким образом, благодаря использованию такой организации данных в базе знаний системы можно вычислить номер из базы знаний по совокупности симптомов пациента и определить его диагноз.

Для того чтобы получить от экспертов исчерпывающую и непротиворечивую совокупность правил, которые будут основаны на простых и понятных действиях, необходимо применить предложенный подход к решению задачи экспертной классификации. В диагностической системе полученные знания легко объединяются в базу знаний, которая экономит ресурсы памяти и быстро находит решение проблемы. Несомненно то, что приобретенные классификации могут быть представлены в традиционной для экспертных систем форме продуктов. Как показал опыт использования диагностической системы, предлагаемый нами способ организации данных имеет более высокую эффективность в сравнении с традиционным.

### Список литературы

1. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Порядина В.Л. Механизмы активной экспертизы в задачах комплексного оценивания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 6. С. 64–66.
2. Белоусов В.Е., Абросимов И.П., Губина О.В. Алгоритм идентификации состояний многоуровневой технической системы с использованием расплывчатых категорий модели представления знаний // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 3. С. 124–129.
3. Aarish Asif Khan. Harmful Brain Activity Classification / K-NN Model // Kaggle: сайт. 2024. URL: <https://www.kaggle.com/code/aarishasifkhan/harmful-brain-activity-classification-k-nn-model> (дата обращения: 22.03.2024).
4. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 2004. 341 с.
5. Бранцевич П.Ю. Примеры цифровой обработки электроэнцефалограмм // Медэлектроника – 2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Республика Беларусь, Минск, 8–9 декабря 2022 года). Минск: БГУИР, 2022. С. 314–318.
6. Вапник В.Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 295 с.
7. Osherson D.N., Weinstein S., Stoli M. Modular learning // Computational Neuroscience / E.L. Schwartz (Ed.). Cambridge, MA: MIT Press, 1990. P. 369–377.
8. Галинская А.А. Модульные нейронные сети: обзор современного состояния разработок // Математические машины и системы. 2003. № 3-4. С. 87–102.
9. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.

10. Моделирование системы оценки компетенций в управлении профессорско-преподавательским составом вуза / С.А. Баркалов, В.Е. Белоусов, Н.Ю. Калинина и др. // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018): сб. докл.: в 2 т. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Т. 2. С. 355–358.

11. Белоусов В.Е., Нижегородов К.И., Соха И.С. Алгоритмы получения упорядоченных правил предпочтения в задачах принятия решений при планировании производственных программ // Управление строительством. 2019. № 1 (14). С. 105–110.

12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine // The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.

13. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. М.: Финансы и статистика, 2001. С. 203–211.

14. Губко М.В., Караваев А.П. Согласование интересов в матричных структурах управления // Автоматика и телемеханика. 2001. № 10. С. 132–146.

15. Hart O., Holmstrom B. The Theory of Contracts // Advances in Economic Theory – 5th World Congress / T.F. Bewley (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 1987. P. 71–155.

### References

1. Barkalov S.A., Burkov V.N., Porjadina V.L. Mechanisms of active examination in problems complex estimation. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2009;5(6):64–66. (In Russ.)

2. Belousov V.E., Abrosimov I.P., Gubina O.V. [An algorithm of identification of conditions of a multilevel technical system with use of indistinct categories of model of representation of knowledge]. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Systems analysis and information technologies*. 2017;(3):124–129. (In Russ.)

3. Aarish Asif Khan. Harmful Brain Activity Classification / K-NN Model. *Kaggle: website*. 2024. Available at: <https://www.kaggle.com/code/aarishasifkhan/harmful-brain-activity-classification-k-nn-model> (accessed 22.03.2024).

4. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow: Vysshaya shkola; 2004. 341 p. (In Russ.)

5. Brantsevich P.Yu. [Examples of digital processing of electroencephalograms]. In: *Medelektronika – 2022. Sredstva meditsinskoj elektroniki i novye meditsinskie tekhnologii: sb. nauch. st. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Respublika Belarus', Minsk, 8–9 dekabrya 2022 goda)* [The Medical electronic engineer – 2022. Means of medical electronics and new medical technologies: collection of scientific works of the XIII International scientific and technical conference (Republic of Belarus, Minsk, on December 8–9, 2022)]. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR); 2022. P. 314–318. (In Russ.)

6. Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimosti po empiricheskim dannym* [Recovery of dependence according to empirical data]. Moscow: Nauka; 1979. 295 p. (In Russ.)

7. Osherson D.N., Weinstein S., Stoli M. Modular learning. In: *Schwartz E.L. (Ed.). Computational Neuroscience*. Cambridge, MA: MIT Press; 1990. P. 369–377.

8. Galinskaya A.A. [Modular neural networks: review of the current state of developments]. *Mathematical machines and systems*. 2003;(3-4):87–102. (In Russ.)

9. Cormen T., Leiserson Ch., Rivest R., Stein C. *Introduction to Algorithms*. Transl. from Engl. 2nd ed. Moscow: Williams; 2005. 1296 p. (In Russ.)

10. Barkalov S.A., Belousov V.E., Kalinina N.Yu., Nasonova T.V., Fomina M.A., Leksashov A.V. Modeling the competence evaluation system in the management of the faculty of the university. In: *XXI International conference on soft calculations and measurements (SCM'2018)*. In 2 volumes. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”; 2018. Vol. 2. P. 355–358. (In Russ.)

11. Belousov V.E., Nizhegorodov K.I., Soha I.S. Algorithms of obtaining the ordered rules of preference in problems of decision-making when planning production programs. *Upravleniye stroitel'stvom*. 2019;1(14):105–110. (In Russ.)

12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine. In: *The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Amherst, MA; 1986. P. 531–546.

13. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye: uchebnyk* [Analysis of time series and forecasting. Textbook]. Moscow: Finansy i statistika; 2001. P. 203–211. (In Russ.)

14. Gubko M.V., Karavaev A.P. Interest reconciliation in matrix control structures. *Automation and Remote Control*. 2001;62(10):1658–1672. DOI: 10.1023/A:1012414500272

15. Hart O., Holmstrom B. The Theory of Contracts. In: *Bewley T.F. (Ed.). Advances in Economic Theory – 5th World Congress*. Cambridge: Cambridge University Press; 1987. P. 71–155.

#### ***Информация об авторах***

**Баркалов Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

**Белоусов Вадим Евгеньевич**, канд. техн. наук, доц., заведующий базовой кафедрой кибернетики в системах организационного управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; vbelousov@cchgeu.ru.

**Просолупов Олег Александрович**, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; vgasu@rambler.ru.

#### ***Information about the authors***

**Sergey A. Barkalov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Dean of the Faculty of Economics, Management and Information Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

**Vadim E. Belousov**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Basic Department of Cybernetics in the Systems of Organizational Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; vbelousov@cchgeu.ru.

**Oleg A. Prosolupov**, Postgraduate student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; vgasu@rambler.ru.

***Вклад авторов:*** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Contribution of the authors:*** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

***Статья поступила в редакцию 24.06.2024***

***The article was submitted 24.06.2024***

# Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья  
УДК 621.313  
DOI: 10.14529/ctcr250103

## ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ МЕТОДОМ МАТРИЧНЫХ ПУЧКОВ

**В.А. Еремеева**, [eremeevava@susu.ru](mailto:eremeevava@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0001-8284-1887>  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Повышение экономической эффективности производства за счет сокращения незапланированных простоев и оптимизации технического обслуживания промышленного оборудования требует развития методов диагностики таких ключевых компонентов оборудования, как асинхронные электродвигатели. В свою очередь, режим работы электродвигателя оказывает существенное влияние на точность и достоверность диагностики. В частности, широко применяемый метод анализа сигнатур тока электродвигателя (MCSA) имеет ряд ограничений при работе электродвигателя с переменной скоростью или нагрузкой. Поэтому необходимо исследовать методы частотного анализа, которые позволят извлекать признаки дефекта электродвигателя из нестационарных сигналов тока. **Цель исследования:** применить метод матричных пучков к сигналам тока двигателя для извлечения признаков дефекта стержня ротора асинхронного электродвигателя при нестационарном режиме его работы. **Материалы и методы.** В данной работе используется метод матричных пучков, который имеет высокое спектральное разрешение и вычислительную эффективность по сравнению с методами спектрального анализа на основе преобразования Фурье. **Результаты.** Численный эксперимент показывает, что метод матричных пучков позволяет извлечь частоты и амплитуды гармоник дефекта ротора электродвигателя с точностью до 2 % в условиях низкой частоты дискретизации (200 Гц) при малой длине окна сигнала (0,25 с). **Заключение.** Метод матричных пучков позволяет отслеживать изменение частоты дефекта ротора электродвигателя и рост амплитуды, связанный с увеличением сопротивления стержня ротора. Таким образом, метод матричных пучков может быть применен на практике для диагностики асинхронных электродвигателей.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, токовый сигнал, дефект стержня ротора, гармонический анализ, метод матричных пучков

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 25-29-00633, <https://rscf.ru/ru/project/25-29-00633/>.

**Для цитирования:** Еремеева В.А. Обнаружение дефектов ротора асинхронного двигателя в нестационарных условиях методом матричных пучков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 30–42. DOI: 10.14529/ctcr250103

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250103

## DETECTION OF ROTOR FAULTS IN INDUCTION MOTOR IN NON-STATIONARY CONDITIONS USING THE MATRIX PENCIL METHOD

**V.A. Eremeeva**, [eremeevava@susu.ru](mailto:eremeevava@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0001-8284-1887>  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Increasing the economic efficiency of production by reducing unplanned downtime and optimizing the maintenance of industrial equipment requires the development of diagnostic methods for such key equipment components as induction motors. In turn, the operating mode of the electric motor has

© Еремеева В.А., 2025

a significant impact on the accuracy and reliability of diagnostics. In particular, the widely used method of motor current signature analysis (MCSA) has a number of limitations when the motor is operating at variable speed or load. Therefore, it is necessary to investigate frequency analysis methods that can extract motor defect signs from non-stationary current signals. **Aim of the study:** to apply matrix pencil method to motor current signals to extract signs of defect in the rotor bar of an induction motor under non-stationary mode of operation. **Materials and methods.** In this paper, the matrix pencil method is used, which has high spectral resolution and computational efficiency compared to Fourier transform based spectral analysis methods. **Results.** Numerical experiment shows that the matrix pencil method can extract frequencies and amplitudes of harmonics of the motor rotor defect with an accuracy of 2% at low sampling rate (200 Hz) and small signal window length (0.25 s). **Conclusion.** The matrix pencil method allows to track the change in the frequency of the defect of the electric motor rotor and the increase in amplitude associated with an increase in the resistance of the rotor bar. Thus, the matrix pencil method can be applied in practice for diagnostics of induction motors.

**Keywords:** squirrel cage induction motor, current signal, rotor bar defect, harmonic analysis, matrix pencil method

**Acknowledgments.** The research was funded by the Russian Science Foundation № 25-29-00633, <https://rscf.ru/en/project/25-29-00633/>.

**For citation:** Eremeeva V.A. Detection of rotor faults in induction motor in non-stationary conditions using the matrix pencil method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):30–42. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250103

## Введение

Электрические машины являются неотъемлемым элементом промышленного оборудования в машиностроительной (станки, манипуляторы, конвейеры), металлургической (прокатные и волочильные станы) и горнодобывающей (насосное, вентиляционное и компрессорное оборудование) промышленности. Наибольшее распространение среди типов электрических машин имеет асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой (70% от общего числа) [1]. Зачастую эксплуатация асинхронного двигателя проходит в жестких условиях, вследствие которых в узлах двигателя возникают различные дефекты. В результате до 15% промышленных двигателей в год выходит из строя [2]. В некоторых случаях двигатель может продолжить свою работу даже при наличии дефектов. Однако в таком режиме возникают пульсации крутящего момента, колебания скорости и дополнительные вибрации, которые способны привести к нарушению технологического процесса. Кроме того, наличие дефекта ведет к увеличению потребляемого тока и входной мощности двигателя. В работе [3] показано, что КПД двигателя с дефектами падает на 3–13%, что приводит к существенным экономическим затратам для производства.

Статистика отказов в асинхронном двигателе показывает, что наибольшее количество дефектов асинхронного двигателя возникает в подшипниках, обмотке статора и обмотке ротора. Механические поломки подшипников вызывают повышение уровня вибрации, что достаточно просто обнаруживается средствами вибрационного контроля [4]. Межвитковые замыкания и обрывы в обмотке статора вызывают нарушение симметрии фазных токов питания, что может быть обнаружено алгоритмами управления частотного преобразователя. Дефекты короткозамкнутого ротора, такие как сломанный стержень и трещина в торцах, зачастую слабо проявляют себя в токах питания при работе асинхронного двигателя и поэтому представляют повышенный интерес для исследователей [5, 6]. Осевые воздухопроводы в роторе, низкочастотные колебания нагрузки, а также магнитная анизотропия оказывают значительный маскирующий эффект на признаки дефектов ротора, что приводит к ложным срабатываниям системы диагностики [7, 8]. Данные обстоятельства требуют разработки специальных методов диагностики.

Классическим методом обнаружения дефектов ротора является метод сигнатурного анализа тока двигателя (MCSA) [9–14]. Метод MCSA основан на частотном представлении сигнала тока двигателя с помощью преобразования Фурье и последующем поиске гармоник дефектов по известным выражениям. Однако применение данного метода ограничено стационарными режимами работы двигателя, так как любое изменение скорости или нагрузки двигателя ведет к спектральной утечке и невозможности обнаружения гармоник дефектов в сигнале тока. Для решения проблемы спектральной утечки разработан ряд параметрических методов с высоким разрешением,

например, алгоритм классификации множественных сигналов MUSIC [15], алгоритм инвариантного вращения подпространства ESPRIT [16], метод Прони [17] и другие. Методы подпространства MUSIC и ESPRIT позволяют находить гармоники дефектов двигателя в условиях шума при нестационарных условиях, однако их недостаток заключается в недостаточной точности оценки амплитуды полученных гармоник. Кроме того, оба метода имеют большую вычислительную сложность [18]. В свою очередь, у метода Прони вычислительные затраты ниже, чем у MUSIC и ESPRIT, однако эффективность работы метода резко снижается с увеличением уровня шума в сигнале [17].

Развитием метода Прони является метод матричных пучков [19, 20]. По сравнению с методом Прони, метод матричных пучков позволяет получить оценки параметров гармоник дефектов в зашумленном сигнале [21]. При этом вычислительная эффективность алгоритма матричных пучков в 5,7 раза выше, чем у MUSIC и ESPRIT [22]. Таким образом, метод матричных пучков обладает потенциалом для эффективного обнаружения признаков дефекта ротора двигателя в нестационарных условиях.

## 1. Методы и материалы

### 1.1. Физические процессы при обрыве стержня ротора

Трехфазная симметричная система напряжений  $U_1$  создает ток в обмотке статора с частотой питающей сети  $f_1$ . Переменный ток статора создает магнитное поле, которое вращается со скоростью  $n_1$  и индуцирует в обмотках ротора ЭДС. Частота ЭДС ротора равна

$$f_2 = sf_1,$$

где  $s$  – скольжение двигателя.

Ротор вращается со скоростью

$$n_2 = (1 - s)n_1.$$

Обрыв одного или нескольких стержней короткозамкнутой обмотки ротора приводит к появлению несимметрии сопротивлений в цепи ротора. В результате токи отдельных стержней ротора будут неодинаковы и их можно разложить на токи прямой и обратной последовательности [23]. Ток обратной последовательности создает магнитное поле, вращающееся относительно ротора в обратном направлении со скоростью

$$n_{2r} = sn_1.$$

Тогда скорость вращения обратного поля ротора относительно статора равна

$$n_{2s} = n_2 - n_{2r} = (1 - s)n_1 - sn_1 = (1 - 2s)n_1.$$

Обратное поле индуцирует в статоре токи с частотой

$$f_{BB} = (1 - 2s)f_1,$$

которые замыкаются через сеть и накладываются на токи статора с частотой  $f_1$ . Ток с частотой  $f_{BB}$  создает пульсацию крутящего момента с удвоенной частотой скольжения [24]. Пульсация крутящего момента приводит к последующим пульсациям скорости с той же частотой, которая создает дополнительные гармоники тока статора, левостороннюю составляющую на частоте

$$f_{low} = (1 - 2s)f_1 \tag{1}$$

и правостороннюю на частоте

$$f_{high} = (1 + 2s)f_1 \tag{2}$$

с одинаковой амплитудой. Дополнительная левосторонняя составляющая накладывается на исходную составляющую  $f_{BB}$ . В результате амплитудно-частотный спектр имеет гармонику с частотой питания с большой амплитудой и две боковые гармоники, отстающие на равное расстояние от гармоники питания (рис. 1). Величина амплитуд боковых пиков увеличивается с ростом тяжести дефекта. Таким образом, частота и амплитуда данных гармоник может применяться в качестве диагностических критериев в системе диагностики. Так как значения частот сломанного стержня зависят от скольжения, любое изменение нагрузки приводит к смещению боковых пиков относительно частоты питания. При низком уровне нагрузки расстояние между частотами дефектов и частотой питания минимально. В связи с этим для выделения гармоник дефектов ротора необходим метод частотного анализа с высоким разрешением, такой как метод матричных пучков.

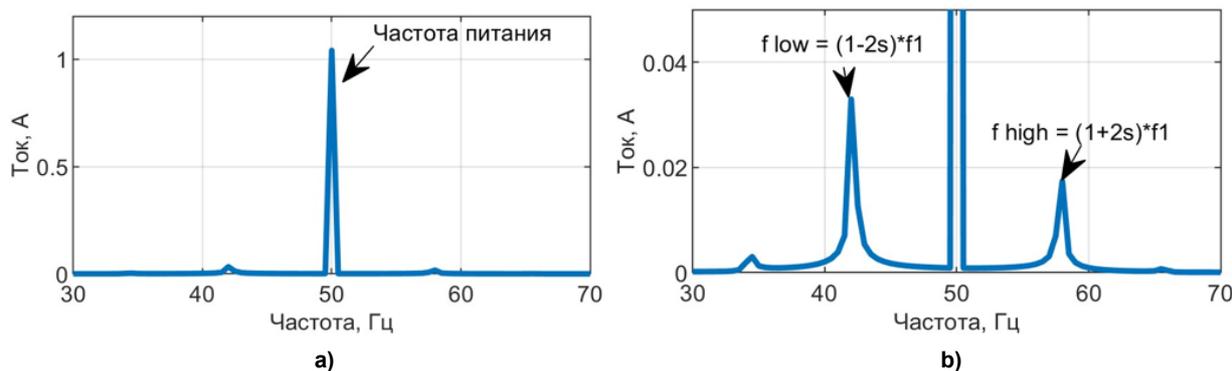


Рис. 1. Боковые пики дефекта ротора в спектре сигнала тока:  
 а – общий вид спектра; б – увеличенный фрагмент спектра  
 Fig. 1. Side peaks of the rotor defect in the spectrum of the current signal:  
 a – general view of the spectrum; b – enlarged fragment of the spectrum

1.2. Метод матричных пучков

Метод матричных пучков является параметрическим методом спектрального анализа. Алгоритм работы метода изложен в [19]. В данном методе сигнал представляется в виде суммы комплексных экспонент с некоторыми неизвестными параметрами:

$$y(t) = \sum_{k=1}^M R_k e^{(\alpha_k + i\omega_k)t},$$

где  $R_k = A_k e^{i\phi_k}$  – комплексные амплитуды;  $\alpha_k$  – коэффициенты затухания;  $\omega_k = 2\pi f_k$  – частоты.

Если представить непрерывный сигнал  $y(t)$  в виде дискретной последовательности  $y(n)$  из  $N$  отсчетов, то сигнал приобретает следующий вид:

$$y(n) = y(nT) = \sum_{k=1}^M R_k e^{(\alpha_k + i\omega_k)nT} = \sum_{k=1}^M R_k z_k^n,$$

где  $T$  – период дискретизации,  $z_k$  – полюсы сигнала  $y(t)$ .

Метод матричных пучков находит оценки амплитуд  $R_k$  и полюсов  $z_k$  по выборкам  $y(nT) = y_n$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$  в два этапа. Во-первых, он находит полюса  $z_k$  как решение задачи на обобщенные собственные значения пучка матриц, сформированного из выборочных значений  $y_n$ . На втором этапе он использует эти полюса для оценки  $z_k$ , решая задачу методом наименьших квадратов. Из отсчетов сигнала формируется две матрицы  $Y_1, Y_2$  размером  $(N-L) \times L$  следующим образом:

$$Y_1 = \begin{pmatrix} y_{L-1} & \dots & y_1 & y_0 \\ y_L & \dots & y_2 & y_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_{N-2} & \dots & y_{N-L} & y_{N-L-1} \end{pmatrix};$$

$$Y_2 = \begin{pmatrix} y_L & \dots & y_2 & y_1 \\ y_{L+1} & \dots & y_3 & y_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_{N-1} & \dots & y_{N-L+1} & y_{N-L} \end{pmatrix},$$

где  $L$  – параметр метода матричных пучков. Значение  $L$  должно удовлетворять неравенству  $M \leq L \leq N - M$ ,

где  $M$  – число экспонент сигнала. При выборе  $L$  в диапазоне  $[N/3; 2N/3]$  дисперсия оценки полюсов  $z_k$  будет минимальна, т. е. метод матричных пучков будет наименее чувствителен к шуму.

В случае незашумленного сигнала полюсы  $z_k = e^{(\alpha_k + i\omega_k)T}$  могут быть найдены как обоб-

ценные собственные значения матричного пучка  $\mathbf{Y}_2 - \lambda \mathbf{Y}_1$ . Это означает, что  $z_k$  являются  $M$  собственными значениями  $\mathbf{Y}_1^+ \mathbf{Y}_2$ . Верхний индекс  $+$  обозначает псевдоинверсию или инверсию Мура – Пенроуза. Для зашумленных данных используется разложение по сингулярным значениям (SVD), чтобы уменьшить шум и оценить количество  $M$  полюсов сигнала, следующим образом:

$$\mathbf{Y}_1 = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T.$$

Здесь  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$  – унитарные матрицы размеров  $(N-L) \times (N-L)$  и  $L \times L$  соответственно, а  $\mathbf{S}$  – диагональная матрица размеров  $(N-L) \times L$ , содержащая сингулярные значения  $\mathbf{Y}_1$ . Таким образом, оценивается порядок  $M$ , и псевдоинверсия  $\mathbf{Y}_1^+$  заменяется усеченной псевдоинверсией ранга  $M$ :

$$\mathbf{Y}_1^+ = \sum_{m=1}^M \frac{1}{\sigma_m} \mathbf{v}_m \mathbf{u}_m^T = \mathbf{V}_0 \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{U}_0^T,$$

где  $\sigma_1, \dots, \sigma_M$  –  $M$  наибольших сингулярных значений матрицы  $\mathbf{Y}_1$ ;  $\mathbf{v}_m$  и  $\mathbf{u}_m$  – соответствующие сингулярные векторы;  $\mathbf{V}_0 = (\mathbf{v}_0, \dots, \mathbf{v}_M)$ ;  $\mathbf{U}_0 = (\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_M)$ ;  $\mathbf{S}_0 = \text{diag}(\sigma_0, \dots, \sigma_M)$ .

Оценки  $z_k$  могут быть найдены путем вычисления собственных значений несимметричной матрицы  $M \times M$ :

$$\mathbf{Z}_E = \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{U}_0^T \mathbf{Y}_2 \mathbf{V}_0.$$

Как только  $M$  и  $z_k$  известны, комплексные амплитуды  $R_k$  находятся путем решения следующей задачи методом наименьших квадратов:

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_M^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_M \end{pmatrix}.$$

Таким образом, находя полюсы и комплексные амплитуды сигнала тока, можно обнаружить параметры гармонических составляющих в сигнале и сопоставить их с параметрами гармоник сломанного стержня ротора.

### 1.3. Модель двигателя

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой составлена на базе эквивалентной электрической схемы [25, 26]. Обмотки статора и ротора двигателя принимаются трехфазными. Система уравнений для исправного двигателя в координатах  $abc$  имеет вид:

$$u_s^{abc} = R_s i_s^{abc} + \frac{d\lambda_s^{abc}}{dt};$$

$$0 = R_r i_r^{abc} + \frac{d\lambda_r^{abc}}{dt},$$

где  $u_s^{abc} = [u_{As} \ u_{Bs} \ u_{Cs}]^T$  – напряжения статора;  $i_s^{abc} = [i_{As} \ i_{Bs} \ i_{Cs}]^T$  – токи статора;  $i_r^{abc} = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$  – токи ротора;  $\lambda_s^{abc} = [\lambda_{As} \ \lambda_{Bs} \ \lambda_{Cs}]^T = L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc}$  – потокосцепления статора;  $\lambda_r^{abc} = [\lambda_{ar} \ \lambda_{br} \ \lambda_{cr}]^T = L_{rs}^{abc} i_s^{abc} + L_{rr}^{abc} i_r^{abc}$  – потокосцепления ротора.

Матрицы сопротивлений статора и ротора равны:

$$R_s = \text{diag}(r_s, r_s, r_s);$$

$$R_r = \text{diag}(r_{rA}, r_{rB}, r_{rC}).$$

Матрицы индуктивностей статора  $L_{ss}^{abc}$  и ротора  $L_{rr}^{abc}$ , а также матрицу взаимной индуктивности статор – ротор  $L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^T$  можно записать в виде:

$$L_{ss}^{abc} = L_{ls} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ss} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix};$$

$$L_{rr}^{abc} = L_{lr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{rr} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix};$$

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos \theta_r \end{bmatrix},$$

где  $L_{ls}$  и  $L_{lr}$  – индуктивности рассеивания статора и ротора соответственно;  $L_{ss}$  и  $L_{rr}$  – собственная индуктивность обмотки статора и ротора соответственно;  $L_{sr}$  – взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора;  $\theta_r$  – угол поворота ротора.

Для моделирования сломанного стержня сопротивление ротора  $r_{rA}$  увеличивается на величину

$$\Delta r = \frac{3n_{BB}}{N_b - 3n_{BB}} r_r,$$

где  $N_b$  – общее число стержней ротора;  $n_{BB}$  – число сломанных стержней ротора.

Далее уравнения напряжений и потокосцеплений преобразуются из трехфазной системы  $abc$  в двухфазную  $qd$  с помощью преобразования Парка – Кларка [25]. Преобразованные уравнения используются для получения сигналов тока двигателя с дефектом ротора.

## 2. Численный эксперимент

В качестве объекта для моделирования выбран асинхронный двухполюсный двигатель 4AA63A2У3 мощностью 370 Вт с частотой питания 50 Гц. Данный двигатель имеет литой алюминевый ротор с 18 стержнями в обмотке. Номинальные параметры двигателя приведены в табл. 1. Параметры модели рассчитаны по методике [27] и приведены в табл. 2.

Номинальные параметры двигателя

Таблица 1

Table 1

Motor parameters

Мощность $P$ , кВт	0,37
Напряжение питания $U$ , В	220
Частота поля $n_1$ , об/мин	3000
Частота вращения ротора $n_2$ , об/мин	2751
КПД $\eta$ , %	70
Коэффициент мощности $\cos\phi$	0,86
Отношение пускового момента к номинальному $m_{п}$	2
Отношение максимального момента к номинальному $m_{max}$	2,2
Отношение пускового тока к номинальному $k_i$	4,5
Номинальное скольжение $s_{н}$ , %	8,3
Критическое скольжение $s_{кр}$ , %	50,5
Момент инерции $J$ , Н·м	0,00076

Таблица 2  
Table 2  
Параметры модели  
Model parameters

Сопротивление статора $R_s$ , Ом	40,83
Сопротивление ротора $R_r$ , Ом	13,31
Индуктивность статора $L_{sp}$ , Гн	0,04
Индуктивность ротора $L_{rp}$ , Гн	0,04
Взаимная индуктивность $L_m$ , Гн	1,43

Напряжение питания двигателя реализовано по алгоритму широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с частотой 1 кГц. При моделировании рассмотрено несколько режимов работы двигателя, включая нестационарные режимы: первый режим – 1 сломанный стержень, постоянная нагрузка 100 %; второй режим – 1 сломанный стержень, переменная нагрузка; третий режим – постепенная поломка 1 стержня, постоянная нагрузка 100 %. Анализ первого режима необходим для оценки точности нахождения параметров гармоник дефекта ротора методом матричных пучков. По результатам анализа второго и третьего режима сделан вывод об эффективности извлечения параметров гармоник в нестационарных режимах. Моделирование проводилось в среде Simulink, частота дискретизации выбрана 50 кГц, длина записи для каждого режима составила 60 с.

### 3. Результаты

Для оптимальной работы метода матричных пучков частота дискретизации понижена до 200 Гц с помощью операции децимации. Для удаления частот ШИМ к децимированному сигналу применен полосовой фильтр с полосой от 40 до 60 Гц. Обработка сигнала проходит в режиме скользящего окна с длиной окна 50 отчетов (0,25 с) и заданным числом полюсов  $M = 6$ .

#### 3.1. Первый режим: 1 сломанный стержень, постоянная нагрузка 100 %

Сигнал тока двигателя с одним сломанным стержнем представлен на рис. 2. Расчетные и найденные частоты и амплитуды гармоник дефекта (1) и (2) приведены в табл. 3.

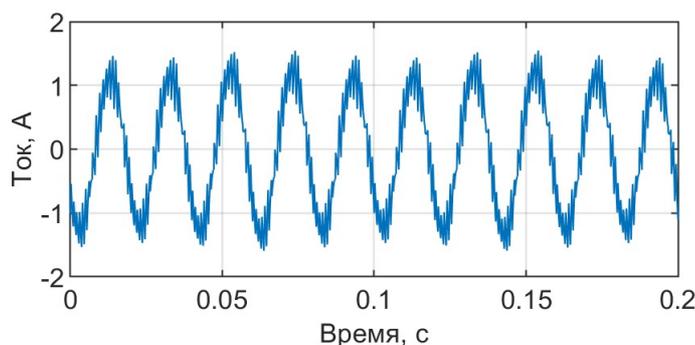


Рис. 2. Сигнал тока с одним сломанным стержнем ротора  
Fig. 2. Current signal with one broken rotor bar

Таблица 3  
Table 3  
Значения частот и амплитуд гармоник  
Values of harmonic frequencies and amplitudes

Гармоника	$f_{low}$	$f_{high}$
Расчётное значение частоты, Гц	42,137	57,863
Найденное значение частоты, Гц	42,138	57,862
Относительная погрешность частоты, %	0,002	0,002
Расчётное значение амплитуды, А	$3,67 \cdot 10^{-2}$	$1,96 \cdot 10^{-2}$
Найденное значение амплитуды, А	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$
Относительная погрешность амплитуды, %	2,18	1,02

Относительная погрешность частот гармоник стремится к нулю. Полученные значения параметров гармоник дефекта постоянны на всей длине сигнала, так как двигатель работает в стационарном режиме. При этом амплитуда левосторонней составляющей дефекта больше, чем амплитуда правосторонней, что согласуется с теорией. При данной величине нагрузки и частоте питания двигателя полученные значения амплитуд гармоник дефекта могут быть приняты в качестве пороговых значений диагностического критерия. Превышение пороговых значений однозначно свидетельствует о наличии дефекта стержня ротора.

### 3.2. Второй режим: сломанный стержень, переменная нагрузка

Изменение момента нагрузки двигателя задано в диапазоне от 80 до 100 % от номинального момента по гармоническому закону. Частота изменения момента составляет 0,5 Гц. Изменение момента, а также найденные значения частот и амплитуд гармоник сломанного стержня показаны на рис. 3.

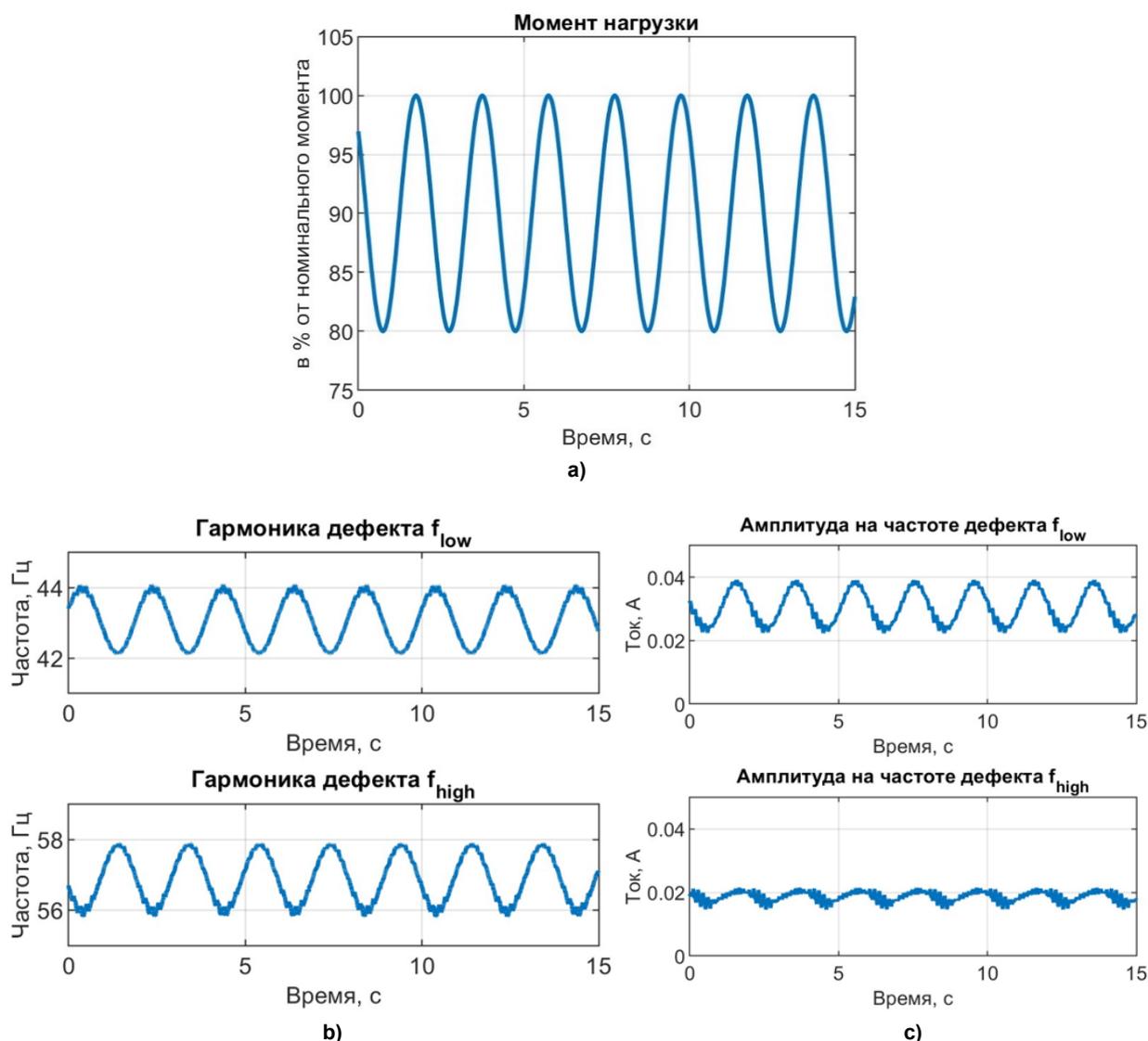


Рис. 3. Моделирование второго режима: а – изменение момента нагрузки; б – значения частот гармоник дефекта; с – значения амплитуд гармоник дефекта  
 Fig. 3. Simulation of the second mode: а – torque change; б – values of defect harmonic frequencies; с – values of defect harmonic amplitudes

На рис. 3б видно, как частоты сломанного стержня меняют свое значение в зависимости от величины момента нагрузки. Значения амплитуд на частотах дефекта также зависят от величины

момента. Амплитуды имеют максимальное значение при полной нагрузке двигателя и уменьшаются при снижении момента нагрузки (рис. 3с). Однако найденные значения амплитуды имеют колебания, величина которых увеличивается с уменьшением момента. Данное обстоятельство может вызвать трудности при выборе порогового значения диагностического критерия в случае низкой нагрузки двигателя.

### 3.3. Третий режим: постепенная поломка стержня, постоянная нагрузка 100 %

Дефект стержня ротора развивается постепенно по линейному закону. Сигнал изменения сопротивления фазы ротора и сигнал тока статора показаны на рис. 4. Видно, что с ростом сопротивления фазы ротора амплитуда тока растет, а в сигнале тока появляется низкочастотная модуляция (рис. 4b). Найденные частоты и амплитуды гармоник дефекта приведены на рис. 5. На начальном участке сигнала тока гармоники дефекта отсутствуют. В результате метод матричных пучков обнаруживает ложные гармоники (рис. 5a). Однако амплитуда этих гармоник стремится к нулю (рис. 5b). Как только сопротивление фазы ротора начинает меняться, в сигнале появляются гармоники дефекта, параметры которых метод матричных пучков находит. Амплитуда гармоник увеличивается линейно с ростом сопротивления фазы ротора.

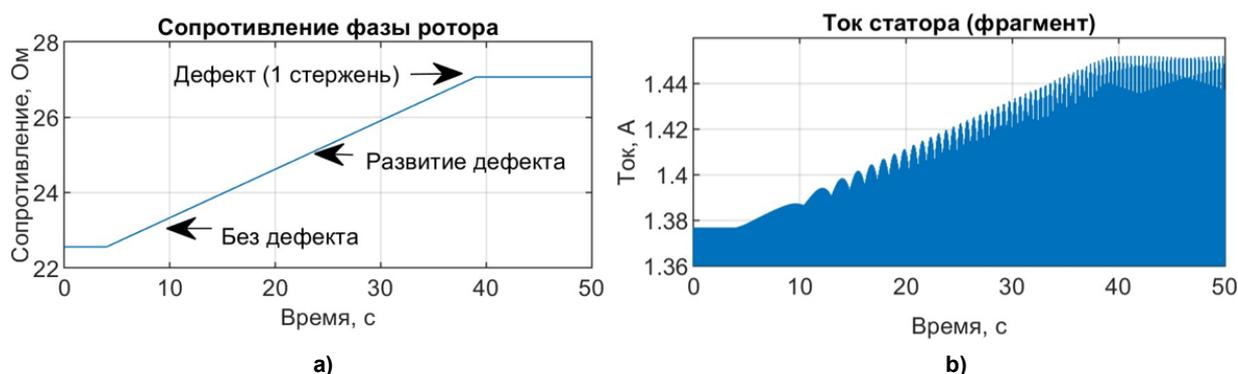


Рис. 4. Постепенная поломка стержня: а – изменение сопротивления фазы ротора; б – сигнал тока статора (увеличенный фрагмент)

Fig. 4. Gradual breakage of the bar: a – change in the resistance of the rotor phase; б – stator current signal (enlarged fragment)

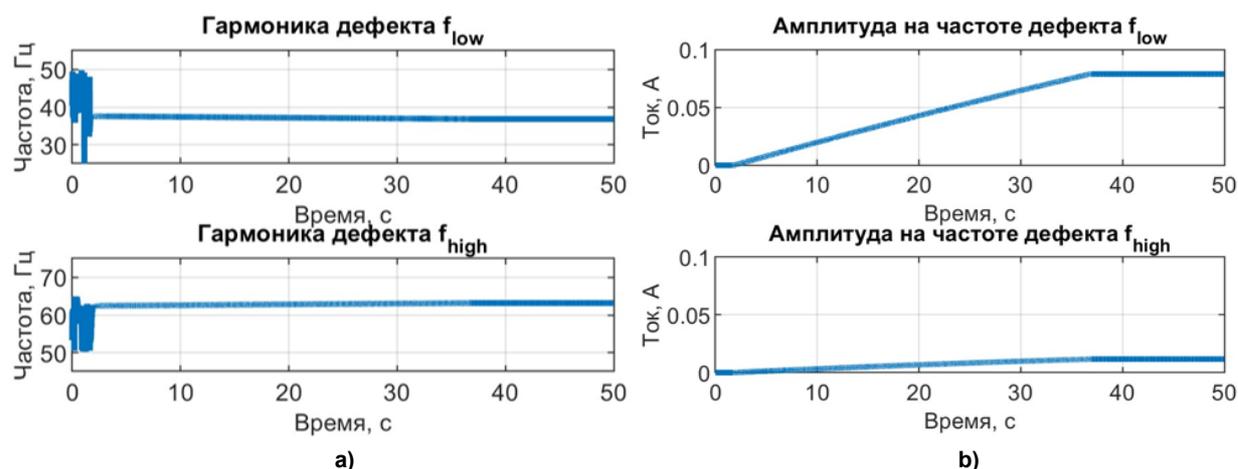


Рис. 5. Моделирование третьего режима: а – значения частот гармоник дефекта; б – значения амплитуд гармоник дефекта

Fig. 3. Simulation of the third mode: a – values of defect harmonic frequencies; б – values of defect harmonic amplitudes

### Заключение

Применение метода матричных пучков позволяет оценить параметры гармоник дефекта ротора двигателя на модельных данных тока в стационарном и нестационарном режимах. Погреш-

ность определения частот и амплитуд дефекта в стационарном режиме не превышает 2 %. Метод матричных пучков позволяет извлечь гармоники дефектов в случае гармонически меняющейся нагрузки двигателя при частоте дискретизации 200 Гц и длительности сигнала 0,25 с. Однако при снижении нагрузки значения амплитуд гармоник дефектов колеблются, что создает трудность при назначении порогового значения диагностического критерия. Также метод матричных пучков извлекает гармоники дефекта при постепенной его деградации. Метод позволяет отслеживать изменение частоты дефекта и рост амплитуды, связанный с увеличением сопротивления стержня ротора. Таким образом, метод матричных пучков потенциально может быть применен на практике для диагностики реальных двигателей.

### Список литературы

1. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques / H. Henaou, G.-A. Capolino, M. Fernandez-Cabanac et al. // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014. Vol. 8, no. 2. P. 31–42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651
2. Induction motor market – growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022–2027) // Mordor Intelligence: сайт. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/induction-motor-market> (дата обращения: 15.03.2023).
3. Efficiency assessment of induction motors operating under different faulty conditions / M. Garcia, P.A. Panagiotou, J.A. Antonino-Daviu, K.N. Gyftakis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66, no. 10. P. 8072–8081. DOI: 10.1109/TIE.2018.2885719
4. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования / Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов и др. // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 1 (42). С. 67–73. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-1(42)-67-73
5. Liu Y., Bazzi A.M. A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art // ISA Transactions. 2017. Vol. 70. P. 400–409. DOI: 10.1016/j.isatra.2017.06.001
6. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors / P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, B. Lu // IEEE Transactions on Industry Applications. 2011. Vol. 47, no. 1. P. 34–46. DOI: 10.1109/TIA.2010.2090839
7. Power spectrum-based detection of induction motor rotor faults for immunity to false alarms / J. Kim, S. Shin, S.B. Lee et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2015. Vol. 30, no. 3. P. 1123–1132. DOI: 10.1109/TEC.2015.2423315
8. Identification of false rotor fault indications produced by online MCSA for medium-voltage induction machines / S.B. Lee, D. Hyun, T. Kang et al. // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52, no. 1. P. 729–739. DOI: 10.1109/TIA.2015.2464301
9. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 1 (31). С. 61–65.
10. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора и вопросы энергосбережения / Сафин Н.Р., В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский и др. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 3. С. 34–39.
11. Токовая диагностика неисправностей подшипников асинхронных двигателей на основе быстрого преобразования Фурье / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский // Электротехника. 2016. № 12. С. 14–19.
12. Condition monitoring of industrial electric machines: state of the art and future challenges / S.B. Lee, G.C. Stone, J. Antonino-Daviu et al. // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 158–167. DOI: 10.1109/MIE.2020.3016138
13. Filippetti F., Bellini A., Capolino G. Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: state of art and future perspectives // Proceedings of IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). Paris, France, 2013. P. 196–209. DOI: 10.1109/WEMDCD.2013.6525180
14. Nandi S., Toliyat H.A., Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review / S. Nandi, H.A. Toliyat, X. Li // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, no. 4. P. 719–729. DOI: 10.1109/TEC.2005.847955

15. Reliable detection of broken rotor bars in induction motors via MUSIC and ZSC methods / D. Morinigo-Sotelo, R.J. Romero-Troncoso, J.A. Antonino-Daviu, K.N. Gyftakis // Proceedings of 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Lausanne, Switzerland, 2016. P. 2881–2886. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732932
16. Improvement of the Hilbert method via ESPRIT for detecting rotor fault in induction motors at low slip / B. Xu, L. Sun, L. Xu, G. Xu // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2013. Vol. 28, no. 1. P. 225–233. DOI: 10.1109/TEC.2012.2236557
17. Chen S., Zivanovic R. A novel high-resolution technique for induction machine broken bar detection // Proceedings of 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference. Perth, WA, Australia, 2007. P. 1–5. DOI: 10.1109/AUPEC.2007.4548040
18. Sahraoui M., Cardoso A.J.M., Ghoggal A. The use of a modified Prony method to track the broken rotor bar characteristic frequencies and amplitudes in three-phase induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, no. 3. P. 2136–2147. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2014.6871940
19. Ибряева О.Л., Салов Д.Д. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2017. Т. 6, № 1. С. 26–37. DOI: 10.14529/cmse170102
20. Метод матричных пучков для оценки параметров векторных процессов / М.П. Генри, О.Л. Ибряева, Д.Д. Салов, А.С. Семенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2017. Т. 10, № 4. P. 92–104. DOI: 10.14529/mmp170409
21. A General noise-resilient technique based on the matrix pencil method for the assessment of harmonics and interharmonics in power systems / K. Sheshyekani, G. Fallahi, M. Hamzeh, M. Kheradmandi // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, no. 5. P. 2179–2188. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2625329
22. Chahine K. Rotor fault diagnosis in induction motors by the matrix pencil method and support vector machine // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2017. Vol. 28, no. 4. DOI: 10.1002/etep.2612
23. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
24. Analysis and diagnostics of adjacent and nonadjacent broken-rotor-bar faults in squirrel-cage induction machines / G.Y. Sizov, A. Sayed-Ahmed, C.-C. Yeh, N.A.O. Demerdash // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56, no. 11. P. 4627–4641. DOI: 10.1109/TIE.2008.2011341
25. Ong C.-M. Dynamic simulation of electric machinery. Prentice Hall: New Jersey, 1998. 626 p.
26. Chen S., Zivanovic R. Modelling and simulation of stator and rotor fault conditions in induction machines for testing fault diagnostic techniques // European Transactions on Electrical Power. 2010. Vol. 20, no. 5. P. 611–629. DOI: 10.1002/etep.342
27. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. СПб.: Корона Принт, 2003. 256 с.

### References

1. Henaou H., Capolino G.-A., Fernandez-Cabanias M., Filippetti F., Bruzzese C., Strangas E., Pusca R., Estima J., Riera-Guasp M., Hedayati-Kia S. Trends in fault diagnosis for electrical machines. *IEEE Industrial electronics magazine*. 2014;8(2):31–42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651
2. Induction motor market – growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022–2027). *Mordor Intelligence: website*. Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/induction-motor-market> (accessed 15.03.2023).
3. Garcia M., Panagiotou P.A., Antonino-Daviu J.A., Gyftakis K.N. Efficiency Assessment of Induction Motors Operating Under Different Faulty Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(10):8072–8081. DOI: 10.1109/TIE.2018.2885719
4. Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Vibration protection, control and analysis systems for industrial application. *Electrical Systems and Complexes*. 2019;1(42):67–73. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2019-1(42)-67-73
5. Liu Y., Bazzi A.M. A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art. *ISA Transactions*. 2017;70:400–409. DOI: 10.1016/j.isatra.2017.06.001

6. Zhang P., Du Y., Habetler T.G., Lu B. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011;47(1):34–46. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316083
7. Kim J., Shin S., Lee S.B., Gyftakis K.N., Drif M., Cardoso A.J.M. Power spectrum-based detection of induction motor rotor faults for immunity to false alarms. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015;30(3):1123–1132. DOI: 10.1109/TEC.2015.2423315
8. Lee S.B., Hyun D., Kang T., Yang C., Shin S., Kim H., Park S., Kong T., Kim H. Identification of false rotor fault indications produced by online MCSA for medium-voltage induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016;52(1):729–739. DOI: 10.1109/TIA.2015.2464301
9. Barkov A.V., Borisov A.A. Modern diagnosis solutions of machines with electric drives by the motor current. *Metallurgical processes and equipment*. 2013;1(31):61–65. (In Russ.)
10. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A., Kazakbaev V.M. Diagnostics of induction motors based on spectral analysis of stator currents. *Energy-safety and Energy-economy*. 2014;3:34–39. (In Russ.)
11. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A. Stator current fault diagnosis of induction motor bearings based on the fast fourier transform. *Russian Electrical Engineering*. 2016;87(12):661–665. DOI: 10.3103/S1068371216120063
12. Lee S.B., Stone G.C., Antonino-Daviu J., Gyftakis K.N., Strangas E.G., Maussion P., Platero C.A. Condition monitoring of industrial electric machines: state of the art and future challenges. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2020;12(4):158–167. DOI: 10.1109/MIE.2020.3016138
13. Filippetti F., Bellini A., Capolino G. Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: state of art and future perspectives. In: *Proceedings of the IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. Paris, France; 2013. P. 196–209. DOI: 10.1109/WEMDCD.2013.6525180
14. Nandi S., Toliyat H.A., Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005;20(4):719–729. DOI: 10.1109/TEC.2005.847955
15. Morinigo-Sotelo D., Romero-Troncoso R.J., Antonino-Daviu J.A., Gyftakis K.N. Reliable detection of broken rotor bars in induction motors via MUSIC and ZSC methods. In: *Proceedings of the 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Lausanne, Switzerland; 2016. P. 2881–2886. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732932
16. Xu B., Sun L., Xu L., Xu G. Improvement of the Hilbert method via esprit for detecting rotor fault in induction motors at low slip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2013;28(1):225–233. DOI: 10.1109/TEC.2012.2236557
17. Chen S., Zivanovic R. A novel high-resolution technique for induction machine broken bar detection. In: *Proceedings of the 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference*. Perth, WA, Australia; 2007. P. 1–5. DOI: 10.1109/AUPEC.2007.4548040
18. Sahraoui M., Cardoso A.J.M., Ghoggal A. The use of a modified prony method to track the broken rotor bar characteristic frequencies and amplitudes in three-phase induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015;51(3):2136–2147. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2014.6871940
19. Ibryaeva O.L., Salov D.D. Modification of the Matrix Pencil Method using a combined evaluation of signal poles and their inverses. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017;6(1):26–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/cmse170102
20. Henry M.P., Ibryaeva O.L., Salov D.D., Semenov A.S. Matrix pencil method for estimation of parameters of vector processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modeling, Programming and Computer Software*. 2017;10(4):92–104. (In Russ.) DOI: 10.14529/mmp170409
21. Sheshyekani K., Fallahi G., Hamzeh M., Kheradmandi M. A General Noise-Resilient Technique Based on the Matrix Pencil Method for the Assessment of Harmonics and Interharmonics in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;32(5):2179–2188. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2625329
22. Chahine K. Rotor fault diagnosis in induction motors by the matrix pencil method and support vector machine. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2017;28(10):1–13. DOI: 10.1002/etep.2612
23. Voldek, A.I. *Elektricheskie mashiny: ucheb. dlya studentov vyssh. tekhn. ucheb. zavedeniy* [Electric machine. Textbook for students of higher technical educational institutions]. Leningrad: Energiya; 1978. 832 p. (In Russ.)

24. Sizov G.Y., Sayed-Ahmed A., Yeh C.-C., Demerdash N.A.O. Analysis and Diagnostics of Adjacent and Nonadjacent Broken-Rotor-Bar Faults in Squirrel-Cage Induction Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(11):4627–4641. DOI: 10.1109/TIE.2008.2011341

25. Ong C.-M. *Dynamic simulation of electric machinery*. New Jersey: Prentice Hall; 1998. 626 p.

26. Chen S., Zivanovic R. Modelling and simulation of stator and rotor fault conditions in induction machines for testing fault diagnostic techniques. *European Transactions on Electrical Power*. 2010;20(5):611–629. DOI: 10.1002/etep.342

27. German-Galkin S.G., Kardonov G.A. *Elektricheskie mashiny: Laboratornye raboty na PK* [Electric machine: Laboratory work on a PC]. St. Petersburg: Korona Print; 2003. 256 p. (In Russ.)

#### ***Информация об авторе***

**Еремеева Виктория Александровна**, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; eremeevava@susu.ru.

#### ***Information about the author***

**Victoria A. Eremeeva**, Postgraduate student of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; eremeevava@susu.ru.

#### ***Конфликт интересов***

Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

#### ***Conflict of interest***

The author declares no obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

***Статья поступила в редакцию 13.05.2024***

***The article was submitted 13.05.2024***

## ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**М.М. Пашенко**, [midubk@gmail.com](mailto:midubk@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0000-7857-6059>

**В.Д. Онискив**, [oniskivf@gmail.com](mailto:oniskivf@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9455-0446>

**В.Ю. Столбов**, [valeriy.stolbov@gmail.com](mailto:valeriy.stolbov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3259-8660>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

**Аннотация.** Повышение эффективности процессов токарной обработки на станках с ЧПУ требует разработки специального математического и информационного обеспечения для реализации адаптивного управления. Предлагается в качестве моделей процесса резания использовать нейросетевые аппроксиматоры, построенные на основе экспериментальных данных, полученных на конкретном станке с ЧПУ при обработке конкретного материала с помощью фиксированного инструмента. **Цель исследования:** проработка вопросов применения методов искусственного интеллекта для адаптивного управления процессом токарной обработки на основе полученных данных о вибрации инструмента. **Материалы и методы.** Предлагается алгоритм решения задачи оптимального адаптивного управления, обеспечивающий в автоматическом режиме максимальную производительность станка с ЧПУ. Для организации обратной связи при адаптивном управлении процессом резания непрерывно снимаются и обрабатываются данные датчика о виброускорении режущего инструмента. Вычисляется оценка удельной энергии сигнала на заданном интервале времени и устанавливается связь между ней и шероховатостью обрабатываемой поверхности детали. Для этого используется обученная нейросеть, предсказывающая по величине энергии сигнала по вибрации значение шероховатости при заданных режимах резания. **Результаты.** Предложена постановка задачи адаптивного управления процессом токарной обработки резанием с учетом износа инструмента. Разработан алгоритм интеллектуальной обработки данных о виброускорении инструмента в процессе резания и построена нейросеть, устанавливающая связь между уровнем вибрации и шероховатостью поверхности. Предложен эффективный алгоритм решения задачи оптимального адаптивного управления. Он позволяет в реальном времени подбирать режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность процесса резания при выполнении ограничения на шероховатость поверхности. **Заключение.** Исследуемые алгоритмы и модели апробированы на реальных данных, что подтверждает возможность их использования при разработке интеллектуальной информационной системы адаптивного управления процессом токарной обработки.

**Ключевые слова:** токарная обработка, адаптивное управление, износ инструмента, данные о вибрации, алгоритм управления, нейросетевые технологии

**Благодарности.** Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках федеральной программы «Приоритет-2030».

**Для цитирования:** Пашенко М.М., Онискив В.Д., Столбов В.Ю. Об одном алгоритме адаптивного управления процессом токарной обработки с использованием методов искусственного интеллекта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 43–52. DOI: 10.14529/ctcr250104

## ABOUT ONE ALGORITHM OF ADAPTIVE CONTROL OF THE TURNING PROCESS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

*M.M. Pashchenko, midubk@gmail.com*  
*V.D. Oniskiv, oniskivf@gmail.com*  
*V.Yu. Stolbov, valeriy.stolbov@gmail.com*

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*

**Abstract.** Increasing the efficiency of turning processes on CNC machines requires the development of special mathematical and information support for the implementation of adaptive control. It is proposed to use neural network approximators as models of the cutting process, constructed on the basis of experimental data obtained on a specific CNC machine during the processing of a specific material using a fixed tool. **The purpose of the study:** to study the issues of applying artificial intelligence methods for adaptive control of the turning process based on the obtained data on tool vibration. **Materials and methods.** An algorithm for solving the problem of optimal adaptive control is proposed, which ensures maximum productivity of a CNC machine in automatic mode. To organize feedback in adaptive control of the cutting process, sensor data on vibration acceleration of the cutting tool are continuously taken and processed. An estimate of the specific energy of the signal is calculated for a given time interval and a connection is established between it and the roughness of the workpiece surface. For this, a trained neural network is used, predicting the roughness value for given cutting modes based on the signal energy value about vibration. **Results.** The problem statement of adaptive control of the turning cutting process taking into account tool wear is proposed. An algorithm for intelligent processing of data on tool vibration acceleration during cutting is developed and a neural network is built that establishes a connection between the vibration level and surface roughness. An effective algorithm for solving the problem of optimal adaptive control is proposed. It allows real-time selection of cutting modes that ensure maximum cutting process productivity while meeting surface roughness constraints. **Conclusion.** The studied algorithms and models were tested on real data, which confirms the possibility of their use in the development of an intelligent information system for adaptive control of the turning process.

**Keywords:** turning, adaptive control, tool wear, vibration data, control algorithm, neural network technologies

**Acknowledgments.** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the federal program “Priority-2030”.

**For citation:** Pashchenko M.M., Oniskiv V.D., Stolbov V.Yu. About one algorithm of adaptive control of the turning process using artificial intelligence methods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):43–52. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250104

### Введение

Адаптивное управление станками является новым этапом развития металлообрабатывающего оборудования [1]. При обработке заготовок на станках с ЧПУ уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания процесса обработки и насколько изменяются исходные параметры, принятые при расчете и составлении управляющей программы (припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость технологической системы и др.).

В действительности условия процесса обработки изменяются во времени случайным образом по следующим причинам:

- непрерывно изменяются режущие свойства инструментов, которые невозможно точно определить в данный момент;
- неопределенные свойства всей технологической системы (упругие и температурные деформации, вибрации);
- для каждой заготовки из обрабатываемой партии имеется разброс припусков, твердости, структуры металла и др.

Поэтому качество обработки зависит от опыта оператора станка с ЧПУ и влияние «человеческого фактора» здесь велико [2]. Адаптивное управление станками, в отличие от обычных систем ЧПУ, обеспечивает автоматическое приспособление процесса обработки заготовки к изменяющимся условиям обработки по определенным критериям. Это приспособление осуществляется на основе информации, получаемой системой управления непосредственно в процессе обработки заготовок.

На основе получаемой информации о текущем состоянии процесса обработки система адаптивного управления станка, увеличивая или уменьшая объем снимаемого металла с заготовки путем соответствующего изменения скорости резания и подачи, поддерживает постоянным предельное значение какого-либо заданного параметра обработки (например, силы резания) или в более общем, но и более сложном случае – обеспечивает получение оптимальных значений точности, производительности или себестоимости обработки заготовок.

В рассматриваемом случае предлагается использовать подход оптимального адаптивного управления. Целью проекта является повышение производительности резания при обеспечении заданного уровня шероховатости обрабатываемой поверхности.

Общая схема оптимального адаптивного управления приведена на рис. 1. Адаптивные системы оптимального управления при обработке заготовок осуществляют автоматический поиск и поддержание таких сочетаний скорости резания  $V$  и подачи  $S$ , которые обеспечивают экстремальное значение целевой функции  $J(V,S)$  обработки (точность, производительность или себестоимость обработки) при наличии технических ограничений и действии возмущающих воздействий (колебаний припуска, твердости материала заготовки, изменения режущих свойств инструмента и др.)

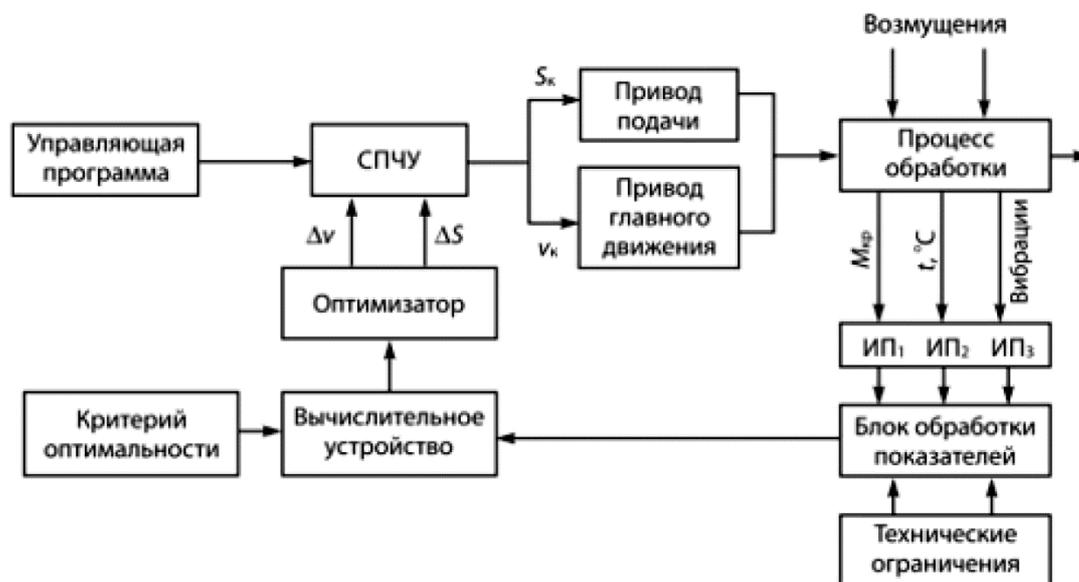


Рис. 1. Схема построения адаптивной системы оптимального управления [1]  
 Fig. 1. Scheme for constructing an adaptive optimal control system [1]

Основой для построения системы адаптивного управления станками оптимального типа является математическая модель управляемого процесса обработки, задающая аналитически систему технических ограничений области поиска оптимальных режимов резания и выражающая зависимость критерия оптимальности от параметров процесса обработки.

В последнее время с появлением новых методов интеллектуальной обработки больших данных возрос интерес к совершенствованию систем адаптивного управления процессами токарной обработки. При этом исследуются как 2-канальные системы управления (с оператором), так и одноканальные системы (без оператора).

Например, в рамках 2-канальной системы адаптивного управления E.G. Plaza с соавт. в своей работе [3] описывает метод вейвлет-преобразования пакетов, который позволяет разлагать вре-

менной сигнал на несколько независимых частотно-временных сигналов, известных как пакеты. Этот метод обеспечивает временную локализацию переходных процессов, происходящих в ходе мониторинга процессов резания, что является значительным преимуществом для мониторинга состояния оборудования и диагностики неисправностей. В рамках своего исследования E.G. Plaza предлагает осуществлять мониторинг шероховатости поверхности для оперативного принятия решений о качестве обработки поверхности заготовки. Автор также обсуждает различные аспекты мониторинга на основе замеров вибрации и последующей обработки данных сигналов, которые были изучены в литературе, а также те аспекты, которые получили недостаточное внимание.

Метод вейвлет-преобразования пакетов, описанный в статье E.G. Plaza, преимущественно используется для мониторинга состояния инструмента [4, 5]. Однако другие технологические аспекты, такие как стружкообразование [6] и шероховатость поверхности [7], изучены в меньшей мере.

В рамках одноканальной системы управления S.G. Kim и соавт. разработали методику синхронизации и хранения данных о нагрузке на основную ось и ЧПУ. Эти данные были проанализированы для получения информации о кривой управления опорной нагрузкой (RLCC). На основе полученных данных был создан адаптивный метод управления подачей, который регулирует скорость подачи инструмента в процессе черновой обработки. В ходе тестовой обработки данный метод адаптивного управления позволил уменьшить время изготовления на 4,6–12,8 %, а также увеличить стойкость инструмента до 41,7 % [8].

Y. Li и коллеги в [9] предложили стратегию адаптивного управления, комбинируя активный график подачи и управление в реальном времени. Это уменьшает влияние износа режущих инструментов на стратегию управления, улучшая адаптивность контроллера скорости подачи. Хотя износ инструмента снижает общую эффективность обработки, стойкость инструмента возрастает на 25 %. Предложенный метод позволяет адаптивно справляться с этим компромиссом, где снижение эффективности обработки может привести к увеличению стойкости инструмента в течение всего периода использования [9].

L. Wang и коллеги в [10] разработали новый алгоритм адаптивного управления АСМСА и сравнили его с тремя другими алгоритмами: NSGA-II, СНОА и IABC. Сравнительный анализ и валидация проводились с использованием моделирования и реальных экспериментов по обработке. Результаты показали, что оба метода проверки приводят к одинаковым выводам. Предложенный метод АСМСА снижает вычислительную мощность на 5,63; 4,65 и 4,51 % и повышает эффективность обработки на 27,88; 15,11 и 15,31 % соответственно по сравнению с другими алгоритмами. Кроме того, благодаря этим усовершенствованиям энергопотребление снижается на 58,21; 45,54 и 41,45 % соответственно [10].

В статье [11] представлен интеллектуальный и эффективный метод адаптивной обработки данных для повышения производительности станков с ЧПУ. Основным новшеством исследования является внедрение нового адаптивного подхода на основе методов машинного обучения, который классифицирует заготовки, сегментирует процессы и регулирует скорость подачи исключительно на основе сигналов о мощности шпинделя. Этот метод эффективно использует большие данные в процессе обработки, существенно увеличивая практическую применимость адаптивной обработки. Практические эксперименты по резке подтвердили эффективность предложенного метода [11].

P. Bakhshandeh и соавт. в [12] представили систему мониторинга и адаптивного управления на основе цифровых двойников, разработанных в данной работе. Эта система позволяет принимать обоснованные решения благодаря предоставлению информации о цифровых двойниках алгоритмам управления и коррекции неопределенностей виртуальной модели. Включение внутренних данных ЧПУ и измерений датчиков в режиме реального времени обеспечивает работу системы. Для восстановления сил резания по результатам измерений виброускорения использовался держатель, интегрированный в датчик, с применением алгоритма фильтра Калмана. Адаптивное управление силами резания осуществлялось с помощью цифровых двойников для ограничения максимальной нагрузки. Новый подход к отслеживанию износа инструмента был представлен путем совмещения совокупной толщины стружки от цифрового двойника с измерением тока

шпинделя от ЧПУ. Добавление информации виртуальной модели повысило надежность алгоритмов мониторинга и управления, что позволило избежать ложных срабатываний и переходных аномалий [12].

Подводя итоги, можно говорить о все более широком применении методов искусственного интеллекта в системах адаптивного управления процессами токарной обработки. Однако анализ рассмотренных статей показывает, что вопросы учета влияния износа инструмента на шероховатость обрабатываемой поверхности при адаптивном управлении остаются малоизученными в литературе, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в этой области.

### 1. Постановка задачи

В качестве критерия оптимальности  $J$ , характеризующего производительность процесса, выберем объем металла, снимаемого за период резания:

$$J(x(t), z(t)) = O(x, z)/T, \quad (1)$$

где  $x(t)$  – вектор-функция управления процессом резания;  $z(t)$  – функция износа инструмента;  $O$  – объем снимаемого металла;  $T$  – рассматриваемый период времени.

Требуется найти такие оптимальные управления  $x^*$ , при которых критерий оптимальности достигает максимума

$$J(x^*, z(t)) = \max J(x(t), z(t)) \quad (2)$$

при ограничениях типа равенств:

$$h(t) = F(x(t), z(t)), \quad t \in [0, T]; \quad (3)$$

$$z(t) = G(p(t)), \quad t \in [0, T] \quad (4)$$

и неравенств

$$h(t) < h^*, \quad t \in [0, T]. \quad (5)$$

Здесь  $h(t)$  – функция, характеризующая уровень шероховатости обработанной поверхности;  $p(t)$  – вектор-функция, характеризующая работу станка с ЧПУ в процессе резания (уровень вибрации, сила резания, температура и т. д.),  $h^*$  – заданное значение допустимого уровня шероховатости.

Отметим, что в задаче управления (1)–(5) функции  $F$  и  $G$  выступают в качестве модели процесса резания. Предлагается их определять с помощью нейросетевого моделирования, т. е. их можно считать нейросетевыми аппроксиматорами, построенными на основе экспериментальных данных, полученных на конкретном станке с ЧПУ при обработке конкретного материала с помощью фиксированного инструмента [13, 14].

### 2. Оценка величины вибрации инструмента

Как было отмечено выше, шероховатость обрабатываемой поверхности зависит от износа инструмента. Будем считать, что износ инструмента, в свою очередь, в основном определяется уровнем вибрации инструмента. На рис. 2 приведены результаты замеров виброускорения с помощью датчика, закрепленного на режущем инструменте токарного станка.

Для организации обратной связи при адаптивном управлении процессом резания необходимо непрерывно снимать данные датчика и обрабатывать их с помощью специального алгоритма. Желательно на основе интеллектуального анализа данных получать на заданном интервале времени объективную информацию об износе инструмента и величине шероховатости поверхности. Предлагается обрабатывать временной ряд с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [15] и получать амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) сигнала на заданном промежутке времени. На рис. 3 приведен пример АЧХ сигнала после БПФ. Видно, что на заданном интервале наблюдается конечное число частот, характеризующихся наибольшими значениями амплитуд.

1 Поперечно Замер от 04.07.2024 в 19:49:07

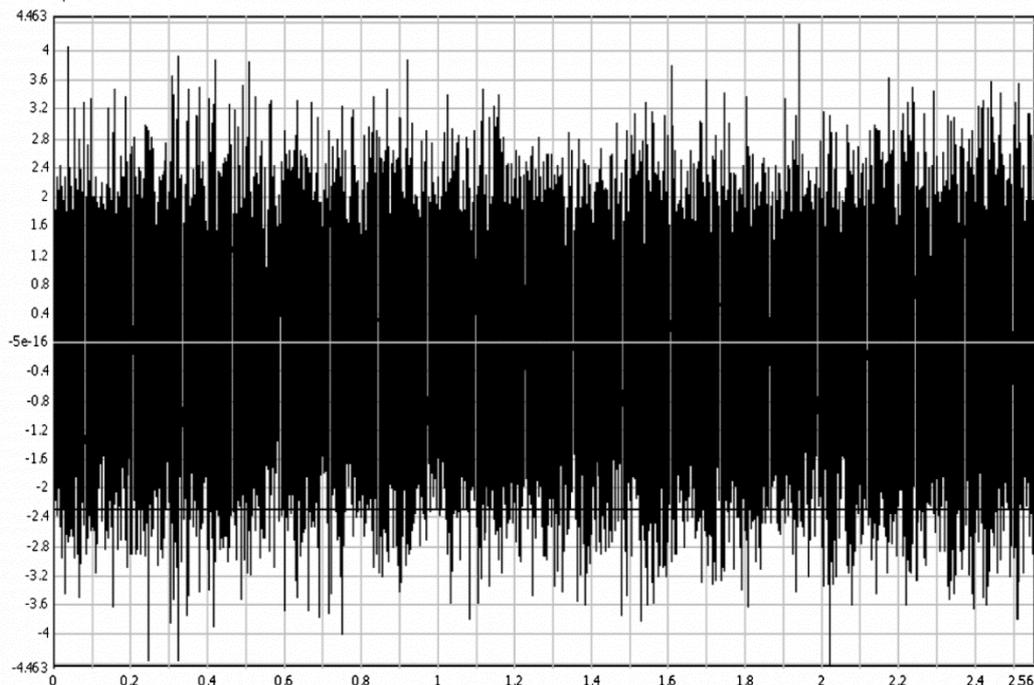


Рис. 2. Пример временного сигнала о виброускорении инструмента в процессе обработки  
Fig. 2. Example of a time signal about vibration acceleration of a tool during processing

1 Поперечно Замер от 04.07.2024 в 19:49:07

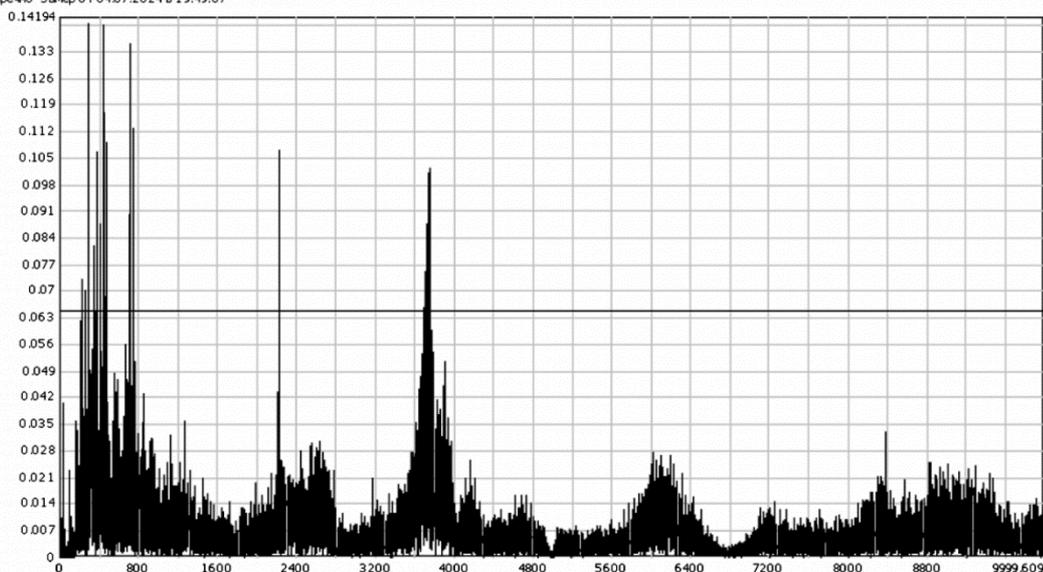


Рис. 3. Пример АЧХ обработанного сигнала с помощью БПФ  
Fig. 3. Example of frequency response of a processed signal using FFT

Предлагается заменить АЧХ одним числовым значением, вычисляя энергию сигнала на заданном интервале времени.

Известно соотношение для энергии волны:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2, \quad (6)$$

где  $m$  – масса;  $\omega$  – угловая частота;  $A$  – амплитуда колебаний.

Введем величину  $\hat{E} = E/m$  – удельную энергию колебаний на единицу массы.

Как отмечено выше, в экспериментах измерялось виброускорение. Следовательно, для расчета энергии либо необходимо дважды интегрировать данные, либо учесть следующие рассуждения:

$$\delta(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \Rightarrow \ddot{\delta}(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \Rightarrow | \quad (7)$$

$$\ddot{A}(t) = -A\omega^2 \text{ или } (\ddot{A})^2 = A^2\omega^4.$$

Теперь соотношение (6) можно записать в виде

$$\hat{E} = \frac{1}{2} \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \frac{\ddot{A}^2}{\omega^4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ddot{A}^2}{\omega^2}. \quad (8)$$

Поскольку  $\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ , здесь  $T$  – период колебаний (тело совершает полный оборот),

$\nu = \frac{1}{T}$  – частота (число оборотов за 1 с).

С учетом этого перепишем (8) в виде:

$$\hat{E} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ddot{A}^2}{\omega^2} = \frac{1}{2} \ddot{A}^2 (2\pi\nu)^{-2} = \frac{1}{8\pi^2} \cdot \frac{\ddot{A}^2}{\nu^2}. \quad (9)$$

Отметим, что после БФП имеем АЧХ для  $\ddot{A}$ , то есть  $\ddot{A}(\nu)$ .

Тогда удельная энергия сигнала (на единицу массы) имеет окончательный вид:

$$\hat{E} = \frac{1}{8\pi^2} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\ddot{A}_i^2(\nu_i)}{\nu_i^2} \right). \quad (10)$$

Заметим, что коэффициент  $\frac{1}{8\pi^2}$  в формуле (10) можно опустить. Он не важен для оценки

уровня вибрации, поскольку одинаков для всех членов ряда (10). Кроме этого, для упрощения расчетов можно ограничиваться небольшим числом членов ряда с наибольшими значениями амплитуд.

### 3. Алгоритм адаптивного управления

Для решения поставленной задачи адаптивного управления (1)–(5) предложен следующий алгоритм:

1) выбираются параметры управления процессом резания: величина подачи  $S$ , мм/об; глубина резания  $l$ , мм; скорость резания  $V$ , м/мин;

2) назначаются пределы изменения параметров:  $S_{\min} = 0,1$  мм/об;  $S_{\max} = 0,5$  мм/об;  $l = \text{fix}$ ;  $V = \text{fix}$  (глубина и скорость резания считаются постоянными и задаются из возможностей оборудования);

3) выбирается шаг управления:  $\Delta S = 0,1$  мм/об;

4) резание начинается с максимального значения подачи  $S_{\max}$ ;

5) непрерывно вычисляется удельная энергия сигнала с датчика, характеризующая уровень вибрации и износа инструмента, по формуле

$$\hat{E}^* = \sum_{i=1}^N \frac{\ddot{A}_i^2(\nu_i)}{\nu_i^2}, \quad (11)$$

где  $A_i$  – амплитуды Фурье-спектра виброускорения на заданном интервале времени обработки;  $N = 4$ ;  $\nu_i$  – частоты (берутся первые 4 частоты, соответствующие наибольшим значениям амплитуды);

6) по величине энергии с помощью обученной нейросети определяется шероховатость поверхности [13] при заданных режимах резания;

7) при достижении максимально допустимой величины шероховатости снижается величина подачи и процесс обработки продолжается дальше.

Следует отметить, что данный алгоритм обеспечивает выполнение условия (2) поставленной задачи оптимального управления, так как процесс обработки начинается с максимально возможной величины подачи инструмента с постепенным снижением ее при выходе на ограничение (5).

### Заключение

Предложен эффективный алгоритм адаптивного управления процессом резания на станке с ЧПУ в рамках оптимального подхода. Отличительной особенностью алгоритма является использование нейросетевых аппроксиматоров, задающих зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины энергии сигнала с датчика (11), характеризующей уровень вибрации и износа инструмента при различных режимах резания. Предложенный алгоритм обеспечивает максимально возможный объем съемного металла при заданной шероховатости поверхности, что значительно повышает производительность процесса токарной обработки.

### Список литературы

1. Балакшин Б.С. Адаптивное управление станками. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.
2. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 256 с.
3. Plaza E.G., Núñez López P.J. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 98. P. 902–919. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.05.028
4. Zhu K., Wong Y.S., Hong G.S. Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden Markov models // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23, no. 2. P. 547–560. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.04.010
5. Effect of different features to drill-wear prediction with back propagation neural network / J. Xu, K. Yamada, K. Seikiya et al. // *Precision Engineering*. 2014. Vol. 38, no. 4. P. 791–798. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.04.007
6. Liao Z., Axinte D.A. On monitoring chip formation, penetration depth and cutting malfunctions in bone micro-drilling via acoustic emission // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 229. P. 82–93. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.016
7. Cognitive Decision Making in Multiple Sensor Monitoring of Robot Assisted Polishing / T. Segreto, S. Karam, R. Teti, J. Ramsing // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 33. P. 333–338. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.075
8. Advanced adaptive feed control for CNC machining / S.G. Kim, E.Y. Heo, H.G. Lee et al. // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 85. P. 102621. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102621
9. Active-passive hybrid feed rate control systems in CNC machining: Mitigating force fluctuations and enhancing tool life / Y. Li, Z. Zhao, K. Wang et al. // *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 77. P. 184–195. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.09.004
10. Modelling and optimization method for energy saving of computer numerical control machine tools under operating condition / L. Wang, P. Wei, W. Li, L. Du // *Energy*. 2024. Vol. 306. P. 132556. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132556
11. Intelligent in-process enhancement technique for machining efficiency in CNC machine tools based on spindle power / Y. Jiang, K. Liu, J. Huang et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 216. P. 111495. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111495
12. Digital twin assisted intelligent machining process monitoring and control / P. Bakhshandeh, Y. Mohammadi, Y. Altintas, F. Bleicher // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2024. Vol. 49. P. 180–190. DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.01.005
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024668654. Нейросетевой аппроксиматор зависимости шероховатости поверхности от режимов резания / В.С. Данелян, А.В. Ключев, В.Ф. Макаров. Заявл. 09.08.2024; опублик. 09.08.2024.
14. Analysis of Grain Size Effect of Titanium Ti-6Al-4V Depending on Surface Roughness at Different Cutting Parameters Using Artificial Intelligence Methods / V.F. Makarov, M.V. Pesin, V.S. Danelian et al. // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2024. Vol. 6, no. 4. P. 171–177. DOI: 10.17586/2687-0568-2024-6-4-171-177
15. Альтман, Е.А. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье: моногр. Омск: Изд-во Омского ГУПС, 2019. 170 с.

### References

1. Balakshin B.S. *Adaptivnoe upravlenie stankami* [Adaptive control of machine tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1973. 688 p. (In Russ.)
2. Burkov V.N. *Osnovy matematicheskoy teorii aktivnykh sistem* [Fundamentals of the mathematical theory of active systems]. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 256 p. (In Russ.)
3. Plaza E.G., Núñez López P.J. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018;98:902–919. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.05.028
4. Zhu K., Wong Y.S., Hong G.S. Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden Markov models. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009;23(2):547–560. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.04.010
5. Xu J., Yamada K., Seikiya K., Tanaka R., Yamane Y. Effect of different features to drill-wear prediction with back propagation neural network. *Precision Engineering*. 2014;38(4):791–798. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.04.007
6. Liao Z., Axinte D.A. On monitoring chip formation, penetration depth and cutting malfunctions in bone micro-drilling via acoustic emission. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;229:82–93. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.016
7. Segreto T., Karam S., Teti R., Ramsing J. Cognitive Decision Making in Multiple Sensor Monitoring of Robot Assisted Polishing. *Procedia CIRP*. 2015;33:333–338. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.075
8. Kim S.G., Heo E.Y., Lee H.G., Kim D.W., Yoo N.H., Kim T.H. Advanced adaptive feed control for CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024;85:102621. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102621
9. Li Y., Zhao Z., Wang K., Qian N., Fu Y., Cao S. Active-passive hybrid feed rate control systems in CNC machining: Mitigating force fluctuations and enhancing tool life. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024;77:184–195. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.09.004
10. Wang L., Wei P., Li W., Du L. Modelling and optimization method for energy saving of computer numerical control machine tools under operating condition. *Energy*. 2024;306:132556. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132556
11. Jiang Y., Liu K., Huang J., Zhao D., Yang W., Wang Y. Intelligent in-process enhancement technique for machining efficiency in CNC machine tools based on spindle power. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024;216:111495. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111495
12. Bakhshandeh P., Mohammadi Y., Altintas Y., Bleicher F. Digital twin assisted intelligent machining process monitoring and control. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2024;49:180–190. DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.01.005
13. Danelian V.S., Klyuev A.V., Makarov V.F. *Neural network approximator of the dependence of surface roughness on cutting modes*. Certificate of registration of a computer program RU 2024668654, 09.08.2024. (In Russ.)
14. Makarov V.F., Pesin M.V., Danelian V.S., Stolbov V.Yu., Khabarova A.V., Polyakov A.V., Semenova I.P. Analysis of Grain Size Effect of Titanium Ti-6Al-4V Depending on Surface Roughness at Different Cutting Parameters Using Artificial Intelligence Methods. *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2024;6(4):171–177. DOI: 10.17586/2687-0568-2024-6-4-171-177
15. Altman E.A. [Fast Fourier Transform Algorithms: monograph]. Omsk: Publishing House of Omsk State University of Railways; 2019. 170 p. (In Russ.)

*Информация об авторах*

**Пашенко Максим Михайлович**, аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; midubk@gmail.com.

**Онискив Владимир Дмитриевич**, канд. техн. наук, доц. кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; oniskivf@gmail.com.

**Столбов Валерий Юрьевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; valeriy.stolbov@gmail.com.

*Information about the authors*

**Maksim M. Pashchenko**, Postgraduate student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; midubk@gmail.com.

**Vladimir D. Oniskiv**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; oniskivf@gmail.com.

**Valeriy Yu. Stolbov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; valeriy.stolbov@gmail.com.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 30.11.2024*

*The article was submitted 30.11.2024*

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья  
УДК 621.372.22  
DOI: 10.14529/ctcr250105

## ОСЛАБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ В СТРУКТУРЕ С ДВУХКРАТНЫМ МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

**А.В. Чуб**<sup>1</sup>, [andrei.chub@tusur.ru](mailto:andrei.chub@tusur.ru), <https://orcid.org/0009-0005-9084-6775>  
**К.Н. Абрамова**<sup>1</sup>, [ksenii.a.abramova@tusur.ru](mailto:ksenii.a.abramova@tusur.ru)  
**К.Д. Иконникова**<sup>1</sup>, [ikartinka@gmail.com](mailto:ikartinka@gmail.com)  
**Е.С. Жечев**<sup>1</sup>, [evgenii.zhechev@tusur.ru](mailto:evgenii.zhechev@tusur.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>  
**Т.Т. Газизов**<sup>2</sup>, [timurtsk@gmail.com](mailto:timurtsk@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3204-2291>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

<sup>2</sup> Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается метод повышения отказоустойчивости радиоэлектронного оборудования, называемый модальным резервированием, который сочетает в себе принципы резервирования и модальной фильтрации. Суть метода заключается в использовании сильной электромагнитной связи между двумя и более резервными проводниками для ослабления электромагнитных помех. Такой подход имеет ряд преимуществ, так как система может продолжать функционировать даже в случае отказа одного или нескольких проводников, что критически важно для обеспечения бесперебойной работы устройств. Метод модального резервирования эффективен в ситуациях, когда нужно минимизировать риски потери сигнала и снизить влияние помех, что делает его полезным в различных областях, где требуется высокая стабильность работы оборудования. **Цель исследования:** изучить характеристики асимметричных структур, выполненных с использованием двухкратного модального резервирования, и оценить их эффективность в различных условиях работы. **Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели использованы электродинамический и квазистатический виды анализа, а также высокочастотные измерения. Исследование проведено в три этапа: до отказа основного проводника, после первого отказа и после второго отказа, что позволило детально оценить поведение системы на разных этапах. **Результаты.** Получены частотные и временные характеристики асимметричных структур с модальным резервированием. Для анализа данных использован FSV-метод, позволивший провести сравнительный анализ данных моделирования и измерений. Результаты показали высокую эффективность метода в ослаблении электромагнитных помех и обеспечении стабильной работы системы даже при переключении питания на резервные проводники. **Заключение.** Представленные исследуемые структуры подтверждают высокую практическую применимость метода модального резервирования для повышения отказоустойчивости радиоэлектронных систем.

**Ключевые слова:** модальное резервирование, отказы, электромагнитные помехи, метод валидации выделением особенностей, электромагнитная совместимость, трапецеидальный импульс

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00139, <https://rscf.ru/project/25-29-00139/>.

**Для цитирования:** Ослабление электромагнитной помехи в структуре с двухкратным модальным резервированием / А.В. Чуб, К.Н. Абрамова, К.Д. Иконникова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 53–68. DOI: 10.14529/ctcr250105

## ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ATTENUATION IN A STRUCTURE WITH DOUBLE MODAL REDUNDANCY

A.V. Chub<sup>1</sup>, [andrei.chub@tusur.ru](mailto:andrei.chub@tusur.ru), <https://orcid.org/0009-0005-9084-6775>

K.N. Abramova<sup>1</sup>, [kseniia.n.abramova@tusur.ru](mailto:kseniia.n.abramova@tusur.ru)

K.D. Ikonnikova<sup>1</sup>, [idkartinka@gmail.com](mailto:idkartinka@gmail.com)

Ye.S. Zhechev<sup>1</sup>, [evgenii.zhechev@tusur.ru](mailto:evgenii.zhechev@tusur.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>

T.T. Gazizov<sup>2</sup>, [timurtsk@gmail.com](mailto:timurtsk@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3204-2291>

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** This paper examines a method for enhancing the fault tolerance of radio-electronic equipment, termed modal redundancy, which combines the principles of redundancy and modal filtering. The essence of this method lies in utilizing strong electromagnetic coupling between two or more redundant conductors to mitigate electromagnetic interference. This approach offers several advantages, as the system can continue to operate even in the event of failure of one or more conductors, which is crucial for ensuring uninterrupted device operation. The modal redundancy method is effective in situations where it is necessary to minimize the risks of signal loss and reduce the impact of interference, making it valuable in various fields where high operational stability of equipment is required. **Research Objective:** To investigate the characteristics of asymmetric structures implemented using double modal redundancy and to evaluate their effectiveness under various operating conditions. **Materials and Methods.** To achieve the stated objective, electrodynamic and quasi-static analyses, as well as high-frequency measurements, were employed. The study was conducted in three stages: before the failure of the main conductor, after the first failure, and after the second failure, allowing for a detailed assessment of the system's behavior at different stages. **Results.** Frequency and time-domain characteristics of asymmetric structures with modal redundancy were obtained. The FSV method was used to analyze the data, enabling a comparative analysis of simulation and measurement data. The results demonstrated the high effectiveness of the method in mitigating electromagnetic interference and ensuring stable system operation, even when power is switched to redundant conductors. **Conclusion.** The presented investigated structures confirm the high practical applicability of the modal redundancy method for enhancing the fault tolerance of radio-electronic systems.

**Keywords:** modal redundancy, failures, electromagnetic interference, feature selective validation method, electromagnetic compatibility, trapezoidal pulse

**Acknowledgments.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-00139, <https://rscf.ru/project/25-29-00139/>.

**For citation:** Chub A.V., Abramova K.N., Ikonnikova K.D., Zhechev Ye.S., Gazizov T.T. Electromagnetic interference attenuation in a structure with double modal redundancy. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):53–68. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250105

### Введение

В процессе разработки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), при эксплуатации которой регулярное обслуживание не представляется возможным, необходимо уделять большое внимание отказоустойчивости и электромагнитной совместимости. Особенно необходимо уделять внимание защите РЭА от мощных преднамеренных электромагнитных помех (ЭМП) [1]. Благодаря своей малой длительности и широкому спектру данные помехи способны проникать в электронные устройства и выводить критически важные узлы из строя. Одним из способов повышения отказоустойчивости является резервирование (рис. 1) [2].

Резервирование основано на простой идее – замена вышедшего из строя компонента на исправный. Для этого нужно иметь запасной элемент, однако сама замена может занять минуты, часы или даже дни, что для многих систем недопустимо. Резервирование может быть отдельным и общим (рис. 2), а число резервных элементов определяется кратностью резервирования ( $m$ ).

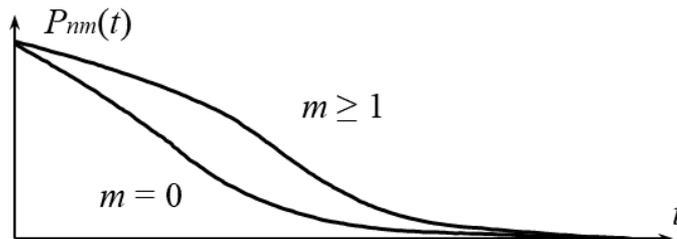


Рис. 1. Вероятность безотказной работы резервированной ( $m \geq 1$ ) и нерезервированной ( $m = 0$ ) систем  
Fig. 1. Probability of fail-safe work of redundant ( $m \geq 1$ ) and non-redundant ( $m = 0$ ) systems

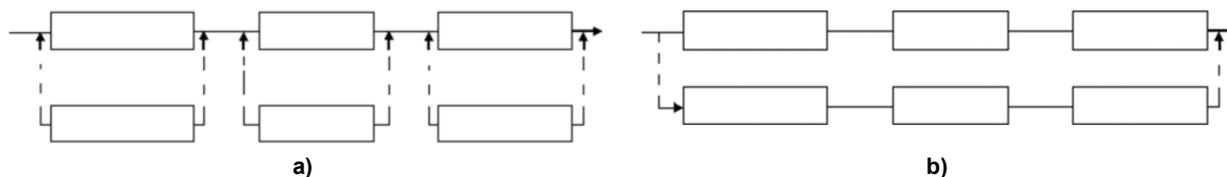


Рис. 2. Раздельное (а) и общее (б) резервирование с включением резерва замещения  
Fig. 2. Separate (a) and common (b) redundancy with switching on the reserve of substitution

При раздельном резервировании (рис. 2а) каждый отдельный элемент имеет резерв в запасе. При выходе из строя конкретного элемента цепи только он заменяется на резервный. Данный метод подходит при наличии хорошо развитой системы диагностики неисправностей, которая позволяет избежать остановки всей системы [3]. В случае применения общего резервирования, при отказе одного или нескольких элементов основной цепи происходит переключение питания на резервную цепь [4].

Чтобы повысить помехозащищенность и отказоустойчивость, существует метод модального резервирования (МР) [5]. Данный метод подразумевает под собой наличие двух и более печатных проводников (основного и резервного/резервных), между которыми образуется сильная электромагнитная связь, что позволяет за счет модальных искажений реализовать защиту электронных устройств от сверхширокополосных (СШП) ЭМП. Помимо однократного МР [6], включающего основной и резервный проводники, также существуют двухкратное [7] и трехкратное [8] МР. Они содержат два и три резервных проводника. Увеличение кратности резерва позволяет повысить отказоустойчивость электронных устройств за счет увеличения вариантов отказа, а также увеличить подавление ЭМП за счет длительности импульсов разложения. Из-за внесения большой избыточности применение многократного МР можно рассматривать для отдельных цепей, наиболее уязвимых к ЭМП в структуре с МР.

Среди данных видов МР менее изученным является двухкратное по сравнению с однократным и трехкратным. Двухкратное МР является более отказоустойчивым по сравнению с однократным и простым в реализации по сравнению с трехкратным. Метод двухкратного МР является «золотой серединой» для обеспечения отказоустойчивости, помехозащищенности и является более простым в реализации.

### Структуры с двухкратным модальным резервированием

На рис. 3 приведены поперечные сечения полосковых структур с двухкратным МР. Структура, находящаяся на рис. 3а, является двухслойной. Сигнальный и опорный проводники выполняются на нижнем слое подложки, а два оставшихся сигнальных выполняются на верхнем слое подложки зеркально нижнему слою [9]. Поперечное сечение, изображенное на рис. 3б, представляет собой однослойную структуру с исполнением сигнальных проводников по краям подложки. Сигнальные и опорные проводники расположены последовательно друг за другом, начиная с сигнального и заканчивая им же. На рис. 3с представлена однослойная структура, где опорные и сигнальные проводники расположены друг за другом, начиная с опорного и заканчивая им же.

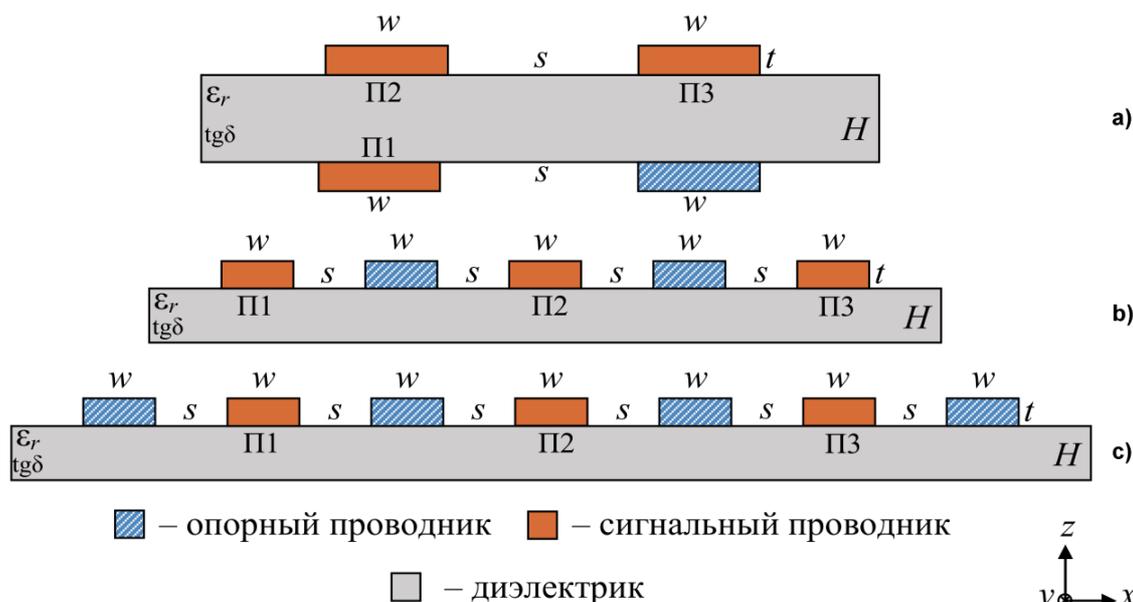


Рис. 3. Поперечные сечения двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (b) и с крайними опорными проводниками (с)  
Fig. 3. Cross sections of a double-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c)

Параметры диэлектрика и проводников представлены в таблице. Электрофизические параметры подложки были взяты для реально существующих диэлектрических материалов.

Геометрические параметры диэлектрика  
Geometrical parameters of the dielectric material

Параметр	Двухслойная структура	Однослойная структура
Ширина проводника ( $w$ ), мкм	1800	600
Расстояние между проводниками ( $s$ ), мкм	1000	900
Толщина проводника ( $t$ ), мкм	35	35
Толщина диэлектрика ( $H$ ), мкм	1500	45

В работе использованы стеклотекстолит марки FR-4 с относительной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_r$ ) – 4,5 и тангенсом угла потерь ( $\text{tg}\delta$ ) – 0,02 и препрег марки TU-85P NF [10] с  $\epsilon_r = 3,5$  и  $\text{tg}\delta = 0,035$  для однослойных структур.

Один из сигнальных проводников является основным, а два других являются резервными. Когда происходит отказ на основном проводнике, питание переключается на резервный сигнальный проводник. При возникновении второго отказа питание переключится на оставшийся сигнальный проводник. Эквивалентные схемы включения до отказа, после первого отказа и после второго отказа представлены на рис. 4. На ближний конец основного проводника подключается источник э.д.с., а дальний конец подключается через нагрузку  $R$  к схемной земле. Сопротивление нагрузки до отказа составляет 50 Ом. Это необходимо для согласования структуры с трактом. Отказ на одном из концов отказавшей цепи может быть представлен в виде низкоомной ( $K3$ ) или высокоомной ( $XX$ ) нагрузки.

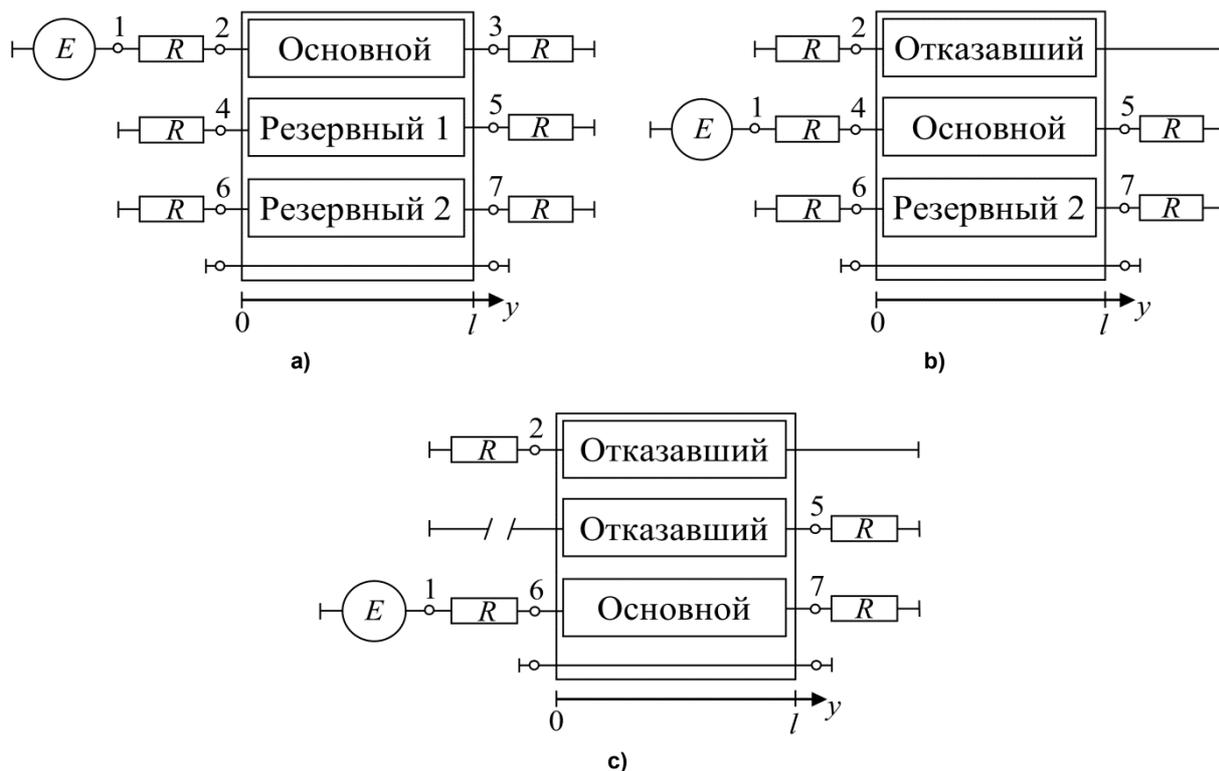


Рис. 4. Эквивалентная схема включения структур с двухкратным МР до отказа (а), после первого отказа (б), после второго отказа (с)  
Fig. 4. Connection diagrams of the structures with double MR before failure (a), after the first failure (b), after the second failure (c)

### Квазистатическое моделирование

Для предварительного расчета исследуемых структур использован квазистатический анализ. Данный подход менее ресурсозатратный, что позволяет без проблем выполнить большой объем вычислений. Система TALGAT [11] использует данный метод моделирования. В данной системе были созданы поперечные сечения исследуемых структур (рис. 5).

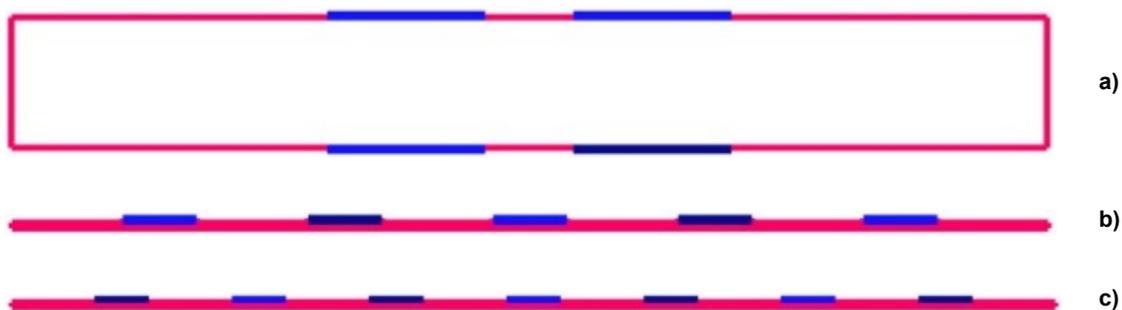


Рис. 5. Поперечные сечения двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (б) и с крайними опорными проводниками (с) в системе TALGAT  
Fig. 5. Cross sections of the double-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c) in the TALGAT system

Схемы включения исследуемых структур до отказа, после первого отказа и после второго отказа, реализованные в системе TALGAT, представлены на рис. 6. Длина двухслойной структуры составляет 520 мм, а однослойных – 200 мм.

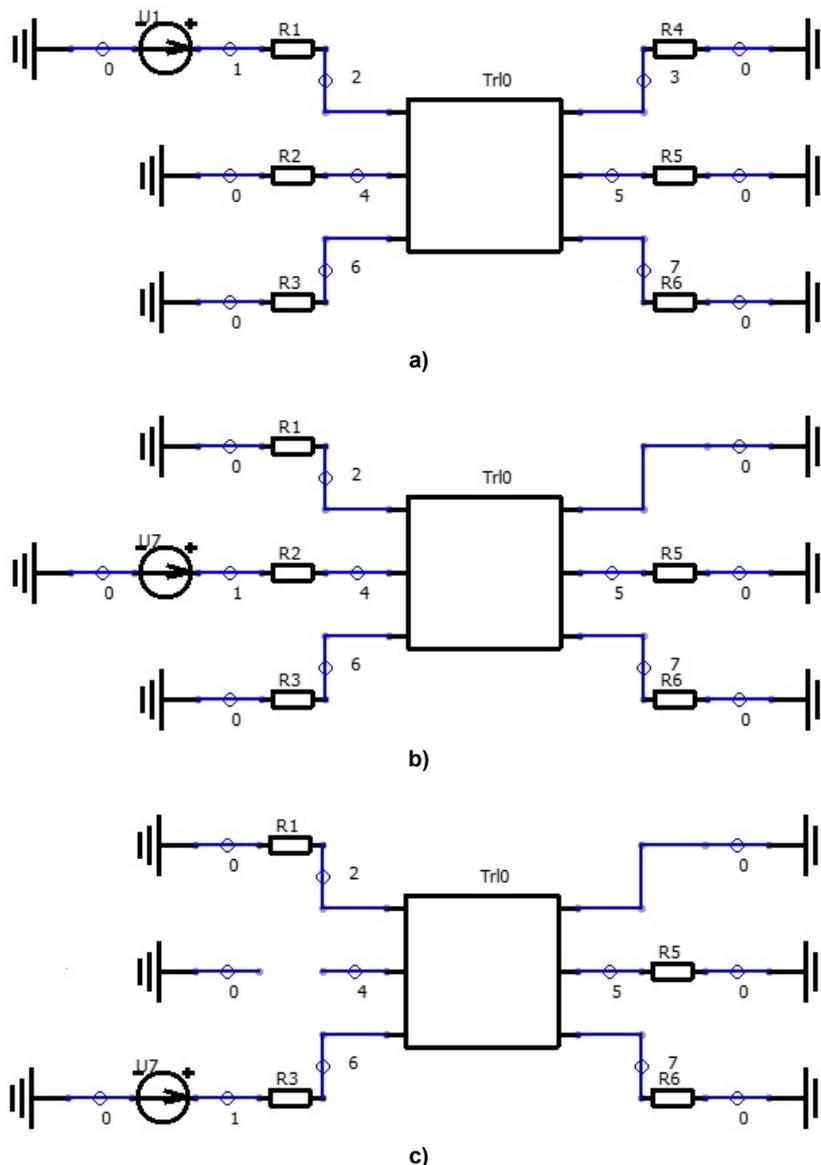


Рис. 6. Эквивалентная схема включения структур с двукратным МР до отказа (а), после первого отказа (б), после второго отказа (с) в системе TALGAT  
Fig. 6. Connection diagrams of the structures with double MR before failure (a), after the first failure (b), after the second failure (c) in the TALGAT system

Для расчета выбрана электромагнитная помеха (ЭМП) в виде трапециевидального импульса амплитудой 100 В и общей длительностью 300 пс. На рис. 7–9 приведены формы сигнала на дальнем конце основного проводника, полученные в результате воздействия ЭМП.

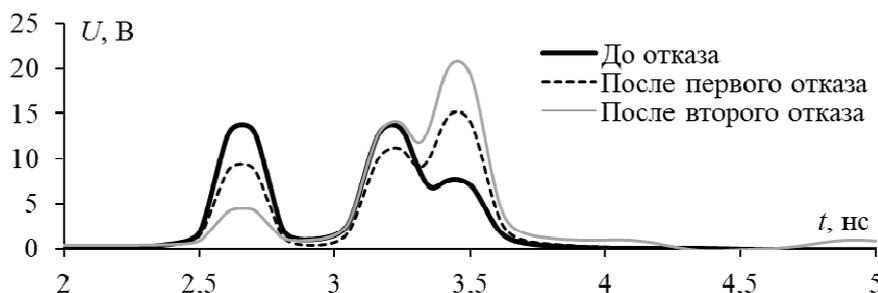


Рис. 7. Форма сигнала на дальнем конце основного проводника двухслойной структуры  
Fig. 7. Signal waveform at the far end of the main conductor of the double layer structure

Пиковое значение напряжений до отказа, после первого отказа и после второго отказа равно 13,8, 15,2 и 20,8 В соответственно. Задержка отклика составляет 2,5 нс. Полученные результаты показывают, что максимальная амплитуда ЭМП до отказа уменьшилась в 7,2 раза, после первого отказа – в 6,6 раза, а после второго отказа – в 4,8 раза.

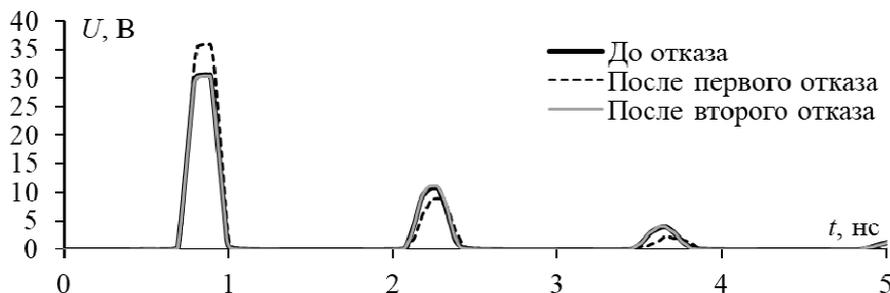


Рис. 8. Временной отклик на дальнем конце структуры с крайними сигнальными проводниками

Fig. 8. Time response at the far end of the structure with outermost signal conductors

До отказа, после первого отказа, после второго отказа максимальная амплитуда напряжений составила 30,6, 35,8 и 30,4 В соответственно. Время задержки для всех случаев составляет 0,7 нс для всех случаев. Форма напряжений имеет схожий характер даже после отказов. В случае до отказа и после второго отказа видно полное сходжение сигналов, это можно объяснить тем, что данные проводники имеют одинаковую электромагнитную обстановку, находясь на краях ПП.

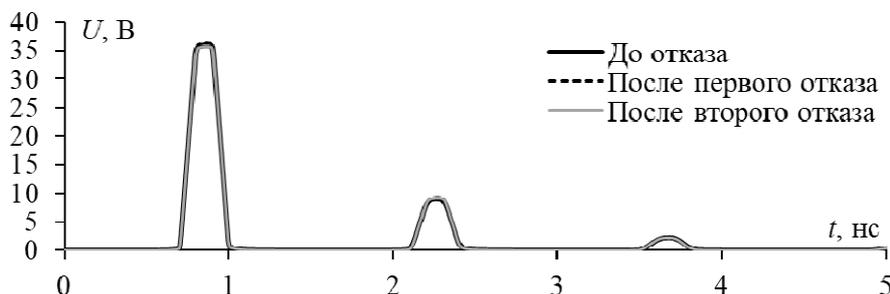


Рис. 9. Временной отклик на дальнем конце основного проводника структуры с крайними опорными проводниками

Fig. 9. Time response at the far end of the main conductor of the structure with outermost ground conductors

Максимальное напряжение на дальнем конце до отказа, после первого отказа и после второго отказа равно 35,9, 36,3 и 35,8 В соответственно. Время задержки отклика для всех случаев составляет 0,68 нс для всех случаев. Форма напряжений имеет схожий характер даже после отказов. Это говорит о том, что у всех проводников одинаковая электромагнитная обстановка.

### Электродинамическое моделирование

Система Comsol Multiphysics [12] использована для электродинамического расчета исследуемых структур. В данной системе можно рассчитывать трехмерные модели, схемы электронных устройств и другую технику. При использовании этого метода уравнения Максвелла решаются полностью, без упрощений. В ходе расчета электродинамическим подходом были созданы трехмерные модели структур с двукратным МР на двуслойной и однослойной печатной плате (рис. 10).

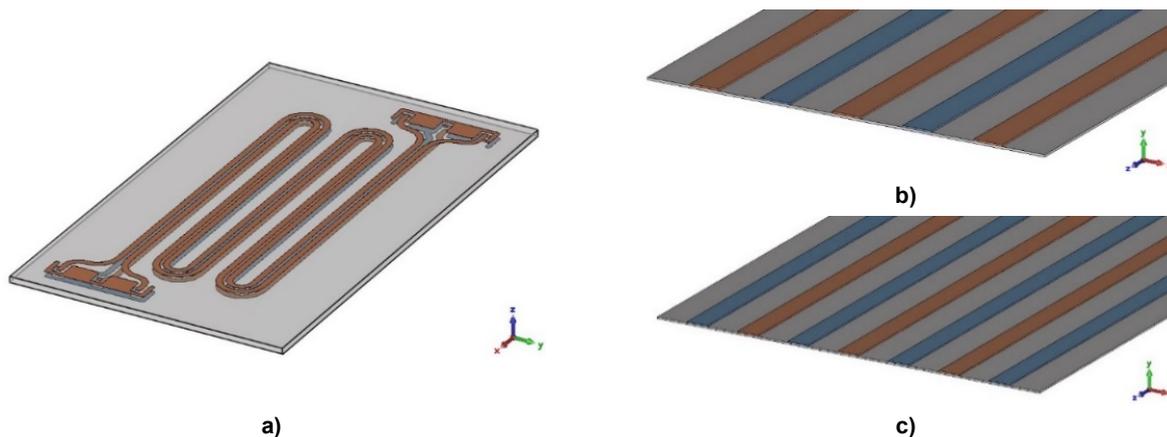


Рис. 10. Трехмерные модели двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (b) и с крайними опорными проводниками (с)  
 Fig. 10. 3D models of the two-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c)

В случае квазистатического моделирования структура представляла собой длинную ПП длиной 520 мм. В случае электродинамического подхода структура представляет собой меандр общей длиной 520 мм. Однослойные структуры геометрически остались без изменения. В результате расчета были получены временные отклики на дальних концах основного проводника (рис. 11–13).

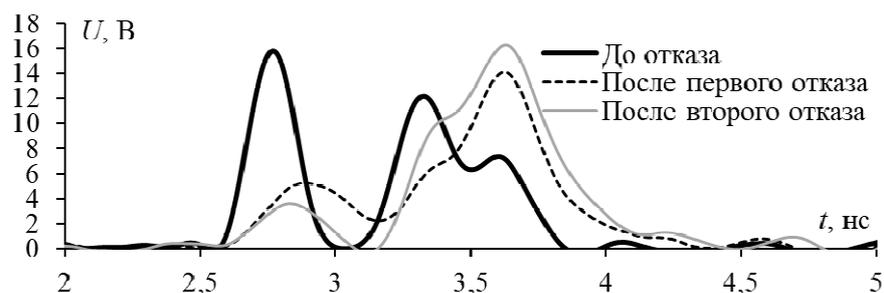


Рис. 11. Временной отклик на дальнем конце основного проводника модели двухслойной структуры  
 Fig. 11. Time response at the far end of the main conductor of the double layer structure model

Для случая до отказа, после первого отказа и после второго отказа максимальное значение амплитуды равно 15,8, 14,1 и 16,2 В соответственно. Задержка мод по отклику равна 2,55 нс. Максимальная амплитуда ЭМП до отказа уменьшилась в 6,3 раза, после первого отказа – в 7,1 раза, а после второго отказа – в 6,2 раза. По графику видно, что после отказов происходит разложение импульса помехи.

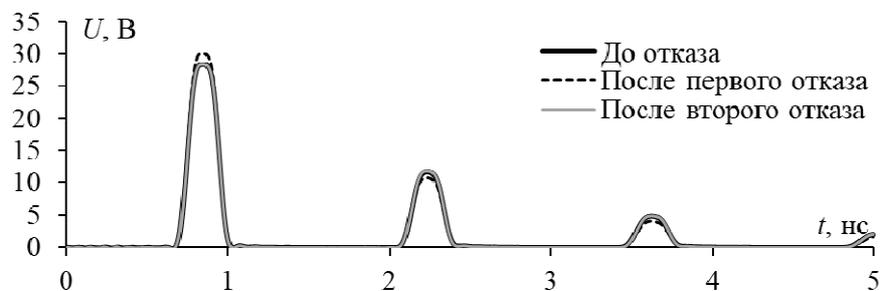


Рис. 12. Временные отклики на дальнем конце модели структуры с крайними сигнальными проводниками  
 Fig. 12. Time responses at the far end of the model structure with outermost signal conductors

Пиковое напряжение на дальнем конце до отказа, после первого отказа и после второго отказа составила 28,4, 30,1 и 28,3 В соответственно. Задержка мод по отклику равна 0,68 нс для всех случаев.

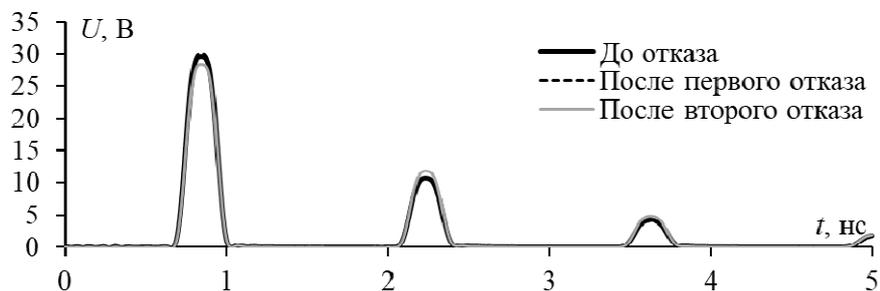


Рис. 13. Временные отклики модели структуры с крайними опорными проводниками  
Fig. 13. Time responses of the structure model with outermost ground conductors

Амплитуда помехи на дальнем конце до отказа, после первого отказа и после второго отказа составила 29,6, 30,1 и 28,3 В соответственно. Время задержки равно 0,67 нс для всех случаев.

### Экспериментальное исследование

На рис. 14 изображена лабораторная установка для измерения частотных характеристик, которая состоит из исследуемого устройства (ИУ), высокочастотных кабелей, векторного анализатора цепей (ВАЦ) R4M18 (Микран) [13], персонального компьютера.



Рис. 14. Экспериментальная установка  
Fig. 14. Experimental setup

Перед началом измерений выполнена двухпортовая SOLT (Short-Open-Load-Thru) калибровка ВАЦ. Далее к одному из сигнальных проводников подключался ВАЦ. К оставшимся сигнальным проводникам подключалась согласованная нагрузка 50 Ом. Для имитации отказа на один из концов сигнального проводника подключалась низкоомная или высокоомная нагрузка. Измерения проводились в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц с шагом 10 МГц, после чего полученные данные сохранялись в документ в формате SNP. Данный документ импортировался в Comsol, где проводился дальнейший расчет временного отклика. В Comsol создается модель ИУ. После на вход модели подается воздействие в виде трапецеидального импульса.

Изготовлены прототипы исследуемых структур (рис. 15) Для изготовления двухслойной структуры был использован фольгированный стеклотекстолит класса FR-4 размером 130 × 75 мм. Для однослойных структур использовался односторонний полиимид марки TU-85P NF.

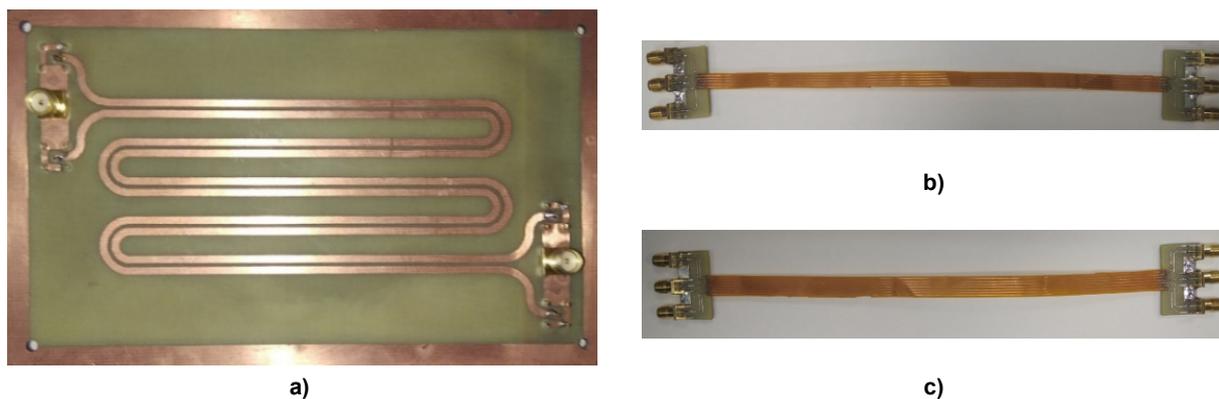


Рис. 15. Прототипы двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (b) и с крайними опорными проводниками (с)  
Fig. 15. Prototypes of the two-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c)

В результате эксперимента были получены временные отклики на дальнем конце основного проводника. Данные зависимости представлены на рис. 16–18.

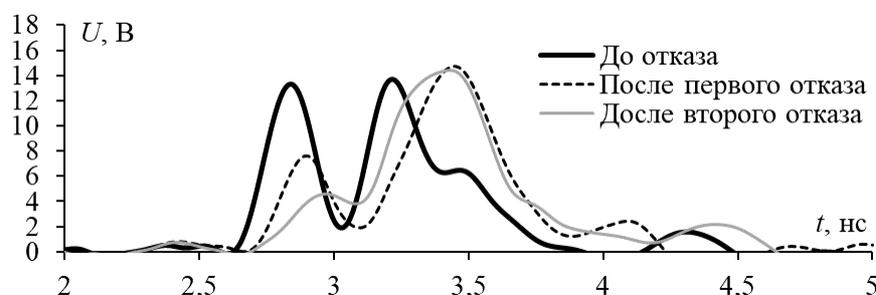


Рис. 16. Временной отклик на дальнем конце основного проводника прототипа двухслойной структуры  
Fig. 16. Time response at the far end of the main conductor of the prototype double-layer structure

Напряжение на дальнем конце основного проводника равны 13,7 В до отказа, 14,7 В после первого отказа, 14,4 В после второго отказа. Задержка составляет до отказа 2,64 нс, после первого отказа – 2,67 нс и после второго отказа – 2,7 нс.

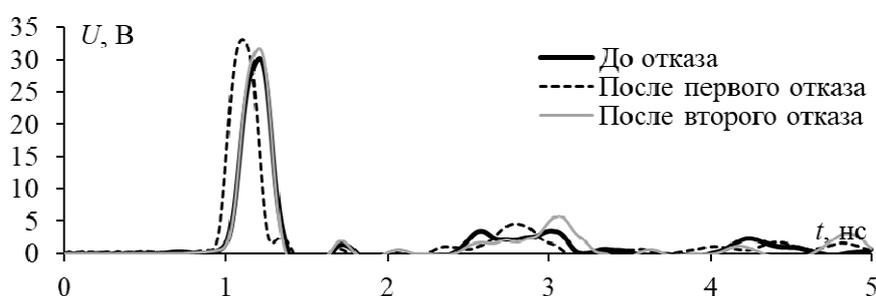


Рис. 17. Временные отклики на дальнем конце прототипа структуры с крайними сигнальными проводниками  
Fig. 17. Time responses at the far end of a prototype structure with outermost signal conductors

Пиковое значение напряжения на дальнем конце основного проводника равны 30,14 В до отказа, 33,2 В после первого отказа, 31,7 В после второго отказа. Задержка составляет до отказа 0,91 нс, после первого отказа – 0,78 нс и после второго отказа – 0,89 нс.

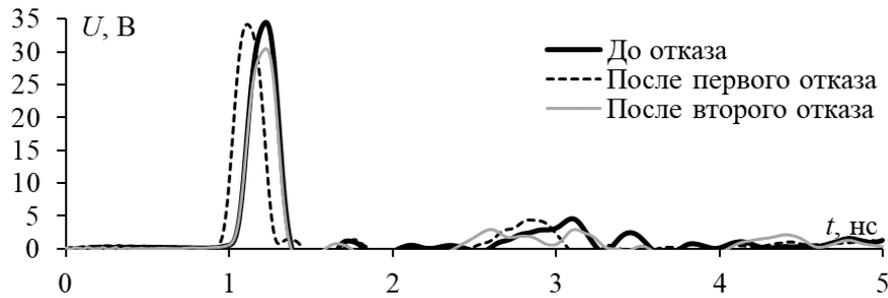


Рис. 18. Временные отклики на дальнем конце прототипа структуры с крайними опорными проводниками  
Fig. 18. Time responses at the far end of a prototype structure with outermost ground conductors

Пиковое напряжение составило до отказа 34,55 В, после первого отказа – 34,26 В, и после второго отказа – 30,52 В. Время задержки до отказа и после второго отказа составляет 1,02 нс, а для случая после первого отказа составляет 0,96 нс.

### Сравнительный анализ моделирования и эксперимента

В данной статье проводится сравнение результатов моделирования и эксперимента с помощью метода валидации выделением особенностей (Feature Selective Validation, FSV) [14]. Оценка с помощью метода FSV используется для определения приемлемости соответствия между эталоном и новыми результатами. Этот метод сочетает измерение разности амплитуд (ADM) и измерение разности характера (FDM), который дает лучшее представление о согласии между двумя наборами данных. Затем ADM и FDM объединяются для формирования глобального измерения разности (GDM). FSV-метод был откалиброван таким образом, чтобы соответствовать человеческому «экспертному» сравнению для принятия решений, которые в некоторой степени субъективны, но будут содержать ярлыки, описывающие соответствие, такие как «отлично», «очень хорошо», «хорошо», «плохо» и т. д. [15]. В качестве валидационного эталона выступает один набор данных, в качестве «новых результатов» выступает другой набор данных.

В процессе моделирования и эксперимента были получены матрицы рассеяния. Благодаря полученным данным были построены частотные зависимости в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц. На рис. 19 представлена частотная зависимость вносимых потерь двухслойной структуры.

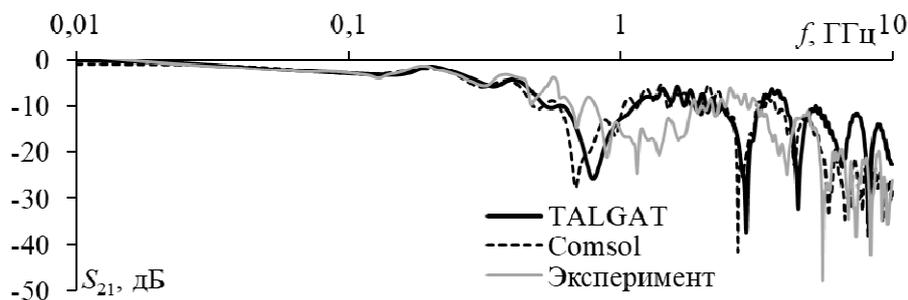


Рис. 19. Частотные зависимости вносимых потерь двухслойной структуры  
Fig. 19. Frequency dependences of insertion loss of a double-layer structure

Частотные зависимости применялись для FSV-анализа. На рис. 20 изображены гистограммы глобального измерения разности. В качестве валидационного эталона выступает один из двух результатов.

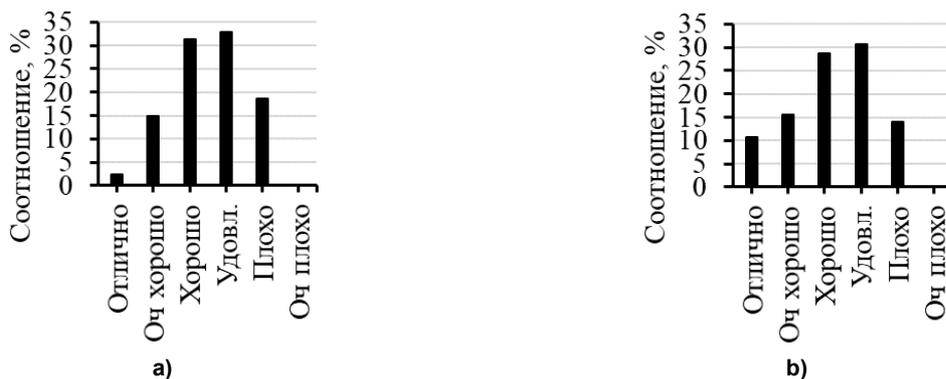


Рис. 20. Гистограмма GDM для результатов TALGAT и Comsol (a) и Comsol и эксперимента (b) двухслойной структуры

Fig. 20. GDM histogram for the results of TALGAT and Comsol (a) and Comsol and experiment (b) double layer structure

Полученные гистограммы показывают, что частотная зависимость, полученная в системе TALGAT и COMSOL, согласуются с оценкой «удовлетворительно». В то же время 49 % дискретных значений частотной зависимости имеют оценку «отлично», «очень хорошо» и «хорошо». Сравнение результатов, полученных с помощью эксперимента и COMSOL, показало, что 55 % дискретных значений согласуются с оценкой «отлично», «очень хорошо» и «хорошо». Далее на рис. 21 представлены частотные зависимости однослойной структуры с крайними сигнальными проводниками.

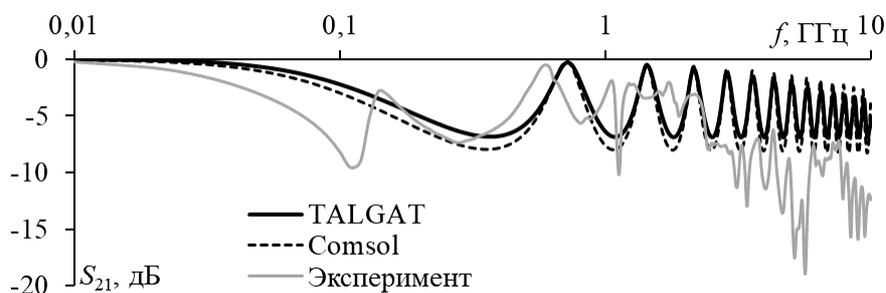


Рис. 21. Частотные зависимости вносимых потерь однослойной структуры с крайними сигнальными проводниками

Fig. 21. Frequency dependences of insertion loss of a single-layer structure with outermost signal conductors

На рис. 22 изображены гистограммы GDM для FSV-анализа.

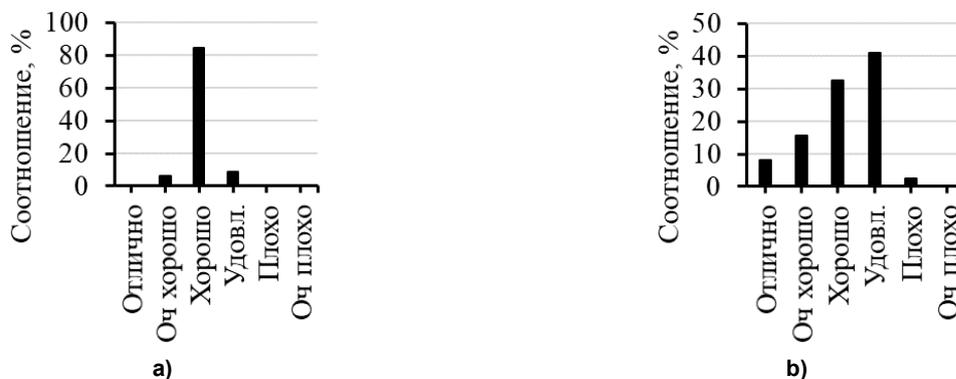


Рис. 22. Гистограмма GDM для результатов TALGAT и COMSOL (a) и COMSOL и эксперимента (b) однослойной структуры с крайними сигнальными проводниками

Fig. 22. GDM histogram for the results of TALGAT and COMSOL (a) and COMSOL and experiment (b) single layer structure with outermost signal conductors

Гистограммы показывают, что результаты TALGAT и COMSOL согласуются с оценкой «хорошо». В то же время результаты COMSOL и эксперимента согласуются с оценкой «удовлетворительно». Однако 56 % дискретных значений согласуются с оценками «хорошо», «очень хорошо» и «отлично». На рис. 23 представлены частотные зависимости структуры с крайними опорными проводниками.

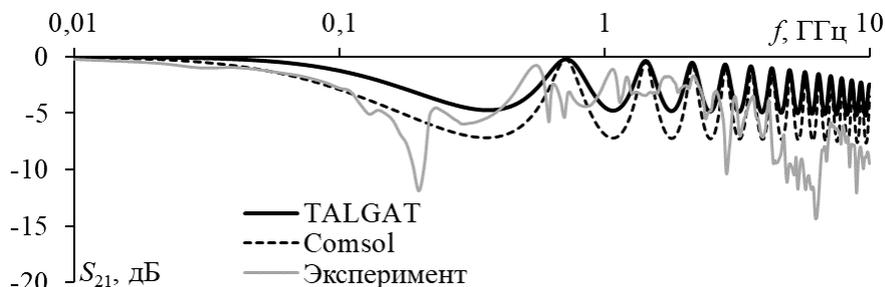


Рис. 23. Частотные зависимости вносимых потерь однослойной структуры с крайними опорными проводниками  
Fig. 23. Frequency dependences of insertion loss of a single-layer structure with outermost ground conductors

На рис. 24 изображены гистограммы глобального измерения разности.

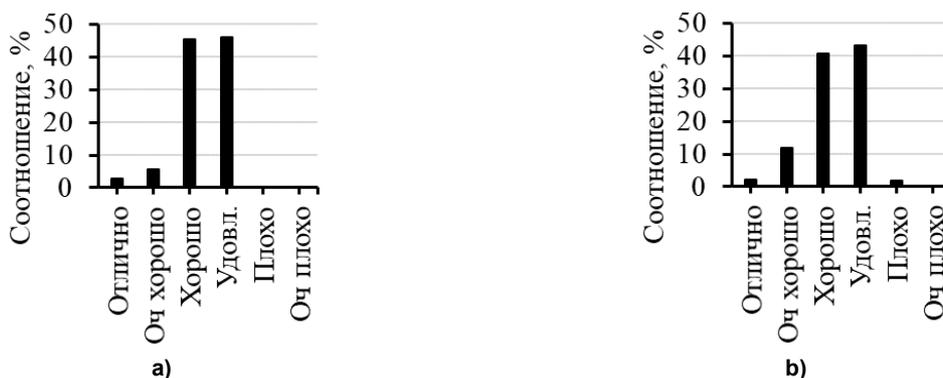


Рис. 24. Гистограмма GDM для результатов TALGAT и COMSOL (a) и COMSOL и эксперимента (b) однослойной структуры с крайними опорными проводниками  
Fig. 24. GDM histogram for the results of TALGAT and COMSOL (a) and COMSOL and experiment (b) single layer structure with outermost ground conductors

Из полученной гистограммы видно, что частотные зависимости, полученные в системе TALGAT и COMSOL, согласуются с оценкой «удовлетворительно». Тем не менее 54 % дискретных значений частотной зависимости согласуются с оценками «отлично», «очень хорошо» и «хорошо». Далее был проведен сравнительный анализ результатов моделирования в системе COMSOL и эксперимента, который показал, что значения больше всего согласуются с оценкой «удовлетворительно». Однако 55 % дискретных значений согласуются с оценками «хорошо», «очень хорошо» и «отлично».

### Заключение

Представлен анализ ослабления ЭМП амплитудой 100 В в структурах с двухкратным МР. Разработаны и созданы модели исследуемых структур для компьютерного расчета и экспериментального измерения. Вычисление и измерение проводилось до отказа, после первого отказа и после второго отказа. Двухслойная структура показала ослабление помехи в среднем в 6,5 раза во всех случаях, в то же время однослойные показали ослабление в 3 раза. Далее с помощью FSV-метода была получена оценка сходимости результатов моделирования и эксперимента. Данный метод показал, что сходимость результатов согласуется с оценкой «удовлетворительно» и «хорошо».

Все исследуемые структуры, представленные в данной работе, справляются с подавлением ЭМП. Двухслойная структура справляется лучше с подавлением электромагнитного воздействия, однако уступает двум оставшимся в гибкости. Структура с крайними опорными проводниками справляется хуже с подавлением воздействий по сравнению со структурой с крайними сигнальными проводниками, однако благодаря своему способу трассировки все три сигнальных проводника окружены опорными, и это показывает, что даже после возникновения отказа ослабления ЭМП остается на прежнем уровне.

### Список литературы

1. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 256 с.
2. Солодов В.С., Калитёнков Н.В. Надежность радиоэлектронного оборудования и средств автоматики: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 220 с.
3. Шарафутдинов В.Р. Способы резервирования элементов радиотехнических устройств на основе модальной фильтрации: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2019. 153 с.
4. Чепегин И.В. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. 156 с.
5. Орлов П., Газизов Т., Буичкин Е. Оценка эффективности модальной фильтрации в различных типах резервированных электрических соединений // Международная Сибирская конференция по управлению и связи. 2016. С. 1–3.
6. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307
7. Пат. 2752233 Российская Федерация. Способ прокладки печатных проводников на двухслойных печатных платах снаружи и внутри сигнальных слоев для схем с резервированием / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев. 2020122274; заявл. 06.07.20; опубл. 23.07.2021, Бюл. № 21. 8 с.
8. Пат. 2738955 Российская Федерация. Способ трехкратного резервирования межсоединений / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов, А.В. Медведев; заявитель и патентообладатель Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. № 2019138502; заявл. 27.11.19; опубл. 21.12.2020, Бюл. № 36. 8 с.
9. Чуб А.В., Абрамова К.Н. Ослабление электромагнитной помехи в структуре с двукратным модальным резервированием до и после отказов // Перспективы развития фундаментальных наук. 2024. С. 175–177.
10. High-Tg Halogen Free No-flow Prepreg TU-84P NF // Taiwan Union Technology Corporation: website. URL: <https://www.tuc.com.tw/en-us/products-detail/id/22> (дата обращения: 14.07.2024).
11. TALGAT Система компьютерного моделирования электромагнитной совместимости // TALGAT: website. URL: <https://talgat.org/talgat-software/> (дата обращения: 14.07.2024).
12. Введение в COMSOL Multiphysics. URL: [https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf) (дата обращения: 02.08.2024).
13. Векторные анализаторы цепей P4M // Контрольно-измерительные приборы: сайт. URL: <https://kipltd.ru/product/vektornye-analizatory-cepej-p4m-r4m-18-2> (дата обращения: 24.07.2024).
14. Bongiorno J., Mariscotti A. Uncertainty and Sensitivity of the Feature Selective Validation (FSV) Method. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/16/2532> (дата обращения: 10.08.2024).
15. Шайманов Н.Ю., Осинцев А.В., Иванов А.А. Об использовании метода FSV в задачах электромагнитной совместимости // Электронные средства и системы управления. 2023. № 1-2. С. 50–52.

### References

1. Gazizov T.R. *Elektromagnitnaya sovместimost' i bezopasnost' radioelektronnoy apparatury: ucheb. posobie* [Electromagnetic compatibility and security of radio-electronic equipment. Training manual]. Tomsk: TML-Press; 2007. 256 p. (In Russ.)
2. Solodov V.S., Kalitenkov N.V. *Nadezhnost' radioelektronnogo oborudovaniya i sredstv avtomatiki: ucheb. posobie dlya vuzov* [Reliability of radio-electronic equipment and automation equipment. Training manual for universities]. 3rd ed., ster. St. Petersburg: Lan'; 2022. 220 p. (In Russ.)

3. Sharafutdinov V.R. *Sposoby rezervirovaniya elementov radiotekhnicheskikh ustroystv na osnove modal'noy fil'tratsii: dis. kand. tekhn. nauk* [Methods of redundancy of elements of radio technical devices on the basis of modal filtering. Cand. sci. diss.]. Tomsk, 2019. 153 p. (In Russ.)

4. Chepegin I.V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk: ucheb. posobie* [Reliability of technical systems and anthropogenic risk. Training manual]. Kazan: Kazan National Research Technological University; 2017. 156 p. (In Russ.)

5. Orlov P., Gazizov T., Buichkin E. [Evaluation of modal filtering efficiency in different types of redundant electrical connections]. In: *Mezhdunarodnaya Sibirskaya konferentsiya po upravleniyu i svyazi* [International Siberian Conference on Management and Communication]. 2016. P. 1–3. (In Russ.)

6. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. Analysis of reservation methods based on modal filtration. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019;(3):117–144. (In Russ.) DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307

7. Gazizov T.R., Medvedev A.V. *Sposob prokladki pechatnykh provodnikov na dvukhsloynnykh pechatnykh platakh snaruzhi i vnutri signal'nykh sloev dlya skhem s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors on double-layer printed circuit boards outside and inside the signal layers for redundant circuits]. Patent RF, no. 2752233, 2021. (In Russ.)

8. Sharafudinov V.R., Gazizov T.R., Medvedev A.V. *Sposob trekhkratnogo rezervirovaniya mezhsoedineniy* [Method of triple redundancy of interconnections]. Patent RF, no. 2738955, 2020. (In Russ.)

9. Chub A.V., Abramova K.N. [Electromagnetic interference attenuation in a structure with double modal redundancy before and after failures]. In: *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk* [Prospects for the development of the fundamental sciences]. 2024. P. 175–177. (In Russ.)

10. High-Tg Halogen Free No-flow Prepreg TU-84P NF. *Taiwan Union Technology Corporation: website*. Available at: <https://www.tuc.com.tw/en-us/products-detail/id/22> (accessed 14.07.2024).

11. TALGAT Electromagnetic compatibility computer modelling system. *TALGAT: website*. Available at: <https://talgat.org/talgat-software/> (accessed 14.07.2024).

12. *Introduction to COMSOL Multiphysics*. (In Russ.) Available at: [https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf) (accessed 02.08.2024).

13. *Vektornye analizatory tsepey P4M* [P4M Vector Circuit Analysers]. *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory: sayt* [Control and measuring devices: website]. (In Russ.) Available at: <https://kipltd.su/product/vektornye-analizatory-cepej-p4m-r4m-18-2> (accessed 24.07.2024).

14. Bongiorno J., Mariscotti A. Uncertainty and Sensitivity of the Feature Selective Validation (FSV) Method. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/16/2532> (accessed 10.08.2024).

15. Shaymanov N.Yu., Osintsev A.V., Ivanov A.A. [On the use of the FSV method in electromagnetic compatibility problems]. In: *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic means and control systems]. 2023. No. 1-2, P. 50–52. (In Russ.)

### **Информация об авторах**

**Чуб Андрей Викторович**, аспирант кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; [andrei.chub@tusur.ru](mailto:andrei.chub@tusur.ru).

**Абрамова Ксения Николаевна**, аспирант кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; [ksenia.n.abramova@tusur.ru](mailto:ksenia.n.abramova@tusur.ru).

**Иконникова Кристина Дмитриевна**, магистрант кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; [ikartinka@gmail.com](mailto:ikartinka@gmail.com).

**Жечев Евгений Сергеевич**, канд. техн. наук, доц. кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; [evgenii.zhechev@tusur.ru](mailto:evgenii.zhechev@tusur.ru).

**Газизов Тимур Тальгатович**, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия; [timurtsk@gmail.com](mailto:timurtsk@gmail.com).

***Information about the authors***

**Andrey V. Chub**, Postgraduate student of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; andrei.chub@tusur.ru.

**Ksenia N. Abramova**, Postgraduate student of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; ksenia.n.abramova@tusur.ru.

**Kristina D. Ikonnikova**, Master's student of the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; idkartinka@gmail.com.

**Yevgeniy S. Zhechev**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Senior Researcher of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; evgenii.zhechev@tusur.ru.

**Timur T. Gazizov**, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; timurtsk@gmail.com.

***Вклад авторов:*** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Contribution of the authors:*** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

***Статья поступила в редакцию 09.01.2025***

***The article was submitted 09.01.2025***

# Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья  
УДК 004.9 + 656.071.1  
DOI: 10.14529/ctcr250106

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СБОРА И АНАЛИЗА ТРЕБОВАНИЙ РАБОТОДАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ИТ-СПЕЦИАЛИСТОВ

**А.В. Затонский**<sup>1</sup>, [zhenon@narod.ru](mailto:zhenon@narod.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

**П.А. Шаклеина**<sup>2</sup>, [wpolina28@gmail.com](mailto:wpolina28@gmail.com)

**Р.В. Красовский**<sup>3</sup>, [romus-kras@mail.ru](mailto:romus-kras@mail.ru)

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия

<sup>2</sup> ООО «КВАЗАР», Березники, Россия

<sup>3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**Аннотация.** Развитие цифровой экономики требует наличия высококвалифицированных ИТ-специалистов, способных удовлетворить растущие потребности рынка. Несмотря на значительное увеличение спроса на ИТ-кадры, система образования не всегда соответствует ожиданиям работодателей. Кадровый дефицит и несоответствие компетенций выпускников потребностям рынка являются ключевыми проблемами, что требует разработки новых подходов к образовательным программам. **Цель исследования.** Основной целью исследования является разработка концепции управления подготовкой ИТ-специалистов, которая учитывает современные требования работодателей. Реализация предложенной методологии создаст условия для модернизации учебных программ и достижения более высокого уровня корреляции между квалификацией выпускников и текущими потребностями рынка труда. **Материалы и методы.** Реализация исследовательских целей осуществлялась посредством применения алгоритмов машинного обучения и методологии анализа масштабных информационных массивов в сочетании с систематическим отслеживанием вакансий с крупных онлайн-платформ по поиску работы. Осуществлялся сбор и систематизация данных о требованиях работодателей, а также их сравнение с профессиональными и образовательными стандартами. Важную роль сыграло использование технологий Natural Language Processing (NLP) для автоматизированного анализа текстов вакансий. **Результаты.** В результате исследования была разработана концепция сбора и обработки требований работодателей для оптимизации образовательных программ ИТ-специалистов. Разработана система мониторинга и анализа открытых данных, что позволяет регулярно обновлять образовательные программы в соответствии с изменениями на рынке труда. Внедрение данной системы способствует сокращению разрыва между профессиональными компетенциями выпускников и потребностями работодателей. **Заключение.** Результаты исследования подтверждают, что системный подход к управлению подготовкой ИТ-кадров с использованием данных о требованиях работодателей способствует улучшению качества образовательных программ и повышению конкурентоспособности выпускников. Это поможет более эффективно адаптировать систему образования к вызовам цифровой экономики, обеспечивая рынок труда востребованными специалистами.

**Ключевые слова:** ИТ-специалисты, требования работодателей, образовательные программы, машинное обучение, компетенции, рынок труда, профессиональные стандарты

**Для цитирования:** Затонский А.В., Шаклеина П.А., Красовский Р.В. Современные методы сбора и анализа требований работодателей для подготовки ИТ-специалистов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 69–82. DOI: 10.14529/ctcr250106

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250106

## MODERN METHODS OF COLLECTING AND ANALYZING EMPLOYERS REQUIREMENTS FOR TRAINING IT WORKERS

A.V. Zatonkiy<sup>1</sup>, [z xenon@narod.ru](mailto:z xenon@narod.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>  
P.A. Shakleina<sup>2</sup>, [wpolina28@gmail.com](mailto:wpolina28@gmail.com)  
R.V. Krasovskiy<sup>3</sup>, [romus-kras@mail.ru](mailto:romus-kras@mail.ru)

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

<sup>2</sup> LLC "QUASAR", Berezniki, Russia

<sup>3</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

**Abstract.** The development of the digital economy requires highly qualified IT specialists capable of meeting the growing demands of the market. Despite the significant increase in demand for IT professionals, the education system often fails to meet employers' expectations. The shortage of skilled personnel and the mismatch between graduates' competencies and market needs are key problems, which necessitate the development of new approaches to educational programs. **Aim.** The main objective of the research is to develop a concept for managing IT specialist training that takes into account modern employer requirements. This will optimize educational programs and improve the alignment of graduates' skills with current labor market demands. **Materials and methods.** To achieve the research objectives, machine learning methods and big data analysis were employed, along with vacancy monitoring from major online job platforms. Data on employer requirements were collected and systematized, and then compared with professional and educational standards. Natural Language Processing (NLP) technologies played a key role in the automated analysis of job vacancy texts. **Results.** The study resulted in the development of a concept for gathering and processing employer requirements to optimize IT specialist educational programs. A monitoring and analysis system for open data was created, allowing for regular updates to educational programs in line with labor market changes. The implementation of this system helps reduce the gap between graduates' professional competencies and employers' needs. **Conclusion.** The research results confirm that a systematic approach to managing IT specialist training, using employer requirements data, improves the quality of educational programs and increases graduates' competitiveness. This approach will help the education system more effectively adapt to the challenges of the digital economy, providing the labor market with in-demand specialists.

**Keywords:** IT specialists, employer requirements, educational programs, machine learning, competencies, labor market, professional standards

**For citation:** Zatonkiy A.V., Shakleina P.A., Krasovskiy R.V. Modern methods of collecting and analyzing employers requirements for training IT workers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2025;25(1):69–82. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250106

### Введение

В России обучение исторически базировалось на адаптированном немецком методе, который обеспечивал студентам прочные фундаментальные знания, являющиеся основой для дальнейшего общепрофильного и профессионального обучения [1]. Несмотря на своей разносторонний и фундаментальный характер, старая система образования, ориентированная на всеобщность и бесплатность, стала восприниматься как затратная и недостаточно эффективная. Это обусловило потребность в более экономичной образовательной системе, соответствующей рыночным условиям. В результате был выбран «болонский» процесс, который предлагал структуру, ориентированную на гибкость и соответствие требованиям современного рынка труда.

Трансформация системы высшего образования была инициирована в 1990-х годах и характеризовалась имплементацией комплекса инновационных элементов: унифицированной структуры образовательных уровней, компетентностной парадигмы, системы академических кредитов, модульного принципа организации обучения и балльно-рейтинговой системы оценивания. Переориентация на прагматический подход привела к реконцептуализации образовательной деятельности как сервисной функции для потребителя образовательных услуг. Данная трансформация

обусловила коммерциализацию интеллектуального пространства, оказав существенное влияние на все компоненты образовательной системы.

Законодательные изменения, внесенные в Трудовой кодекс Российской Федерации в декабре 2012 года, ознаменовались появлением нового нормативного инструмента – профессионального стандарта. Разработанная система профессиональных стандартов обеспечивает формализацию требований к квалификации специалистов в соответствии с реальными потребностями рынка труда, отвечая запросам работодателей на привлечение специалистов, готовых к оперативному включению в рабочий процесс.

Существует несколько подходов к моделированию требований профессиональных и образовательных стандартов, учитывающих запросы работодателей. Некоторые авторы предлагают комплексный подход, который сочетает анализ требований работодателей с исследованием профессиональных и образовательных стандартов [2]. Например, авторы [3] предлагают методику, основанную на анализе профессиональных стандартов и нормативных документов. Они приводят примеры профессиональных стандартов для различных ИТ-специальностей и предлагают использовать эти стандарты при разработке образовательных программ. Такой подход обеспечивает целостное представление о необходимых компетенциях и помогает интегрировать требования бизнеса и нормативные образовательные стандарты.

Другие исследователи [4] уделяют особое внимание анализу рынка труда и проведению анкетирования работодателей для выявления требуемых компетенций специалистов. Этот метод включает сбор данных о текущих и прогнозируемых потребностях работодателей, что позволяет более гибко адаптировать образовательные программы к запросам рынка.

Также создание и использование баз данных, содержащих описания компетенций и требований работодателей, является еще одним подходом к моделированию требований. Такие базы данных могут служить основой для разработки моделей специалистов. Например, в США была создана система Occupational Information Network (O\*NET), содержащая описания более 1000 профессий и связанных с ними компетенций. Использование таких баз данных позволяет стандартизировать требования и предоставляет обширную информацию для разработки образовательных программ.

Многие исследователи в данной области рассматривают вакансии как средство определения требований работодателей. Во многих статьях утверждается, что путем выявления и анализа компетенций, указанных в текстах вакансий, можно корректировать учебные планы и адаптировать образовательные программы таким образом, чтобы компетенции, которые студенты получают в процессе обучения, были актуальны для работодателей.

Например, исследователи [5] утверждают, что в сфере информационных технологий наблюдается определенная проблема с кадровым потенциалом, в которой одной из самых узких точек является недостаточный приток абитуриентов на ИТ-направления и их неполноценная подготовка в области ИТ в системе образования.

В целом оба подхода имеют свои преимущества и недостатки, и выбор определенного подхода зависит от целей и задач моделирования специалиста.

Однако стоит отметить, что рассмотренные подходы больше фокусируются на рынке труда и требованиях работодателей, поэтому в них могут быть упущены нюансы, связанные с профессиональными и образовательными стандартами. Поэтому выделение ключевых компетенций и навыков для каждой специальности может быть затруднительным при построении моделей на основе данных только о вакансиях [6]. Наиболее полно учитываются профессиональные и образовательные стандарты в подходах, где используются экспертные оценки и опросы, однако эти методы требуют большого количества времени и ресурсов на их проведение.

Формирование релевантной модели специалиста требует имплементации системного подхода с возможностью агрегирования и анализа разнообразных источников информации: открытых сведений о запросах компаний, регламентированных профессиональных и образовательных стандартов, а также экспертных оценок и опросов. Важно также учитывать текущие тенденции рынка труда и динамику изменений в востребованности навыков. Для автоматизации критериев отбора соискателей на работу можно использовать как общедоступную статистику вакансий и предпочтений работодателей на крупных сайтах, так и использовать узкопрофессиональные источники информации.

Есть другая версия: несмотря на реформы, направленные на адаптацию системы образования к рыночным условиям, проблема несоответствия компетенций выпускников требованиям работодателей в сфере ИТ остается актуальной. В условиях стремительного развития цифровой экономики и возрастающего кадрового голода (<https://hh.ru/>, <https://superjob.ru/>, <https://rabota.ru/>) необходим более точный и оперативный механизм мониторинга и анализа требований рынка труда [7]. Существующие подходы, основанные на анализе профессиональных стандартов [3, 8], анкетировании работодателей [4] или использовании баз данных компетенций (O\*NET), недостаточно учитывают динамику изменений в ИТ-отрасли. В данной работе предлагается применение методов машинного обучения и NLP для анализа данных с веб-ресурсов, посвященных поиску работы, что позволит автоматизировать процесс адаптации образовательных программ к актуальным запросам ИТ-рынка и способствовать формированию конкурентоспособной отечественной ИТ-индустрии.

В текущих реалиях становится очевидным, что устойчивое развитие цифровой экосистемы невозможно без развитой отечественной ИТ-отрасли. Государственная политика последних лет характеризуется внедрением широкого спектра стимулирующих механизмов: налоговых льгот, преференциальных условий участия в государственных закупках и стратегических программ импортозамещения. Однако для полноценного развития цифровой экономики требуется формирование национальной ИТ-индустрии, обеспечивающей создание и поддержку программных решений высокого качества, способных эффективно конкурировать с зарубежными аналогами [9].

Особенность российского ИТ-рынка заключается в том, что, несмотря на его возникновение в начале 1990-х годов, он до сих пор остается практически не капитализированным. Разработка сильной и капитализированной отечественной ИТ-отрасли должна стать существенным элементом государственной стратегии по цифровой трансформации. Темпы дальнейшего развития этой отрасли зависят от способности государства справиться с рядом ключевых задач:

- кадровый дефицит: ИТ-индустрия значительно зависит от человеческого капитала, составляющего около 70 % бизнеса. Однако существующая система образования выпускает недостаточное число специалистов, и притом не всегда соответствующих современным требованиям рынка. В ближайшие пять лет ожидается потребность в 350 тысячах ИТ-специалистов, тогда как выпуск ежегодно составляет лишь около 150 тысяч человек;
- недостаток исследований и разработок: в отрасли все еще используется научный задел советского периода, который вскоре может быть исчерпан. Инвестиции в новые исследования и разработки остаются на низком уровне, что ограничивает потенциал для инноваций;
- несовершенство законодательной базы;
- низкий уровень координации действий органов государственной власти при поддержке ИТ-отрасли.

В ИТ-отрасли России трудятся около 300 тысяч высококвалифицированных специалистов. Плюс 700 тысяч человек работает на предприятиях, непосредственно связанных с ИТ-отраслью. По числу рабочих мест, показателям выработки и экспорта ИТ-отрасль России уже обогнала многие отрасли отечественной экономики.

Согласно плану мероприятий государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», развитие информационных технологий и подготовка высококвалифицированных специалистов выделены как ключевые приоритеты для экономического прогресса страны. Направление «Кадры и образование» акцентирует внимание на необходимости создания условий для формирования конкурентоспособных ИТ-кадров, которые смогут удовлетворить растущие потребности цифрового сектора. Это включает в себя модернизацию образовательных программ, внедрение новых технологий обучения и развитие партнерств между образовательными учреждениями и индустрией [10].

По данным HeadHunter, количество вакансий для ИТ-специалистов в России в январе 2023 года выросло на 63 % по сравнению с тем же периодом 2022 года и достигло 58 700 за неполный месяц. В компании сообщили, что увеличение числа вакансий началось с ноября 2022 года, и объяснили это тем фактом, что «появилась определенность с ИТ-проектами на 2023 год». Также было отмечено, что определенную роль сыграла осенняя волна переезда сотрудников, в которой большинство сотрудников могли уволиться. Она имела значительное влияние на процессы по трудоустройству работников компании.

Кроме того, рост спроса на ИТ-специалистов подтвердил сервис «Авито Работа», по данным которого в январе число вакансий выросло на 52 %, по итогам 2022 года – на 7 %. В «Яндексе» сейчас открыто больше 1000 вакансий, причем нестандартного оттока сотрудников не наблюдается, отметил представитель компании. В «МТС Диджитал» сообщили, что найм на работу в 2022 году вырос в четыре раза, до 220 человек в месяц, объяснив это развитием новых продуктов.

Согласно статистическим данным, спрос на квалифицированных специалистов существенно превосходит предложение. Это связано с растущей потребностью в ИТ-профессионалах в сферах, где активно происходят процессы автоматизации, цифровизации и аналитики. Однако парадоксально, что, по данным статистических исследований, количество абитуриентов, выбирающих специальности в области информационных технологий, демонстрирует тенденцию к снижению.

Несоответствие между компетенциями, которые работодатели ожидают от специалистов, и теми, которые формируются в процессе обучения в образовательных учреждениях, объясняет возникший дисбаланс. Работодатели нередко требуют практические навыки и специфические знания, которые не всегда акцентируются в традиционных учебных программах. Этот разрыв стимулирует потенциальных студентов искать альтернативные пути обучения, такие как онлайн-курсы и программы повышения квалификации, чтобы получить востребованные на рынке навыки. Это явление способствует укреплению тенденции перехода от традиционных форм обучения к электронному обучению на дистанционных платформах [2], что особенно актуально в быстро меняющемся мире технологий.

Законодательные изменения, на момент 2025 года уже вступившие в силу, устанавливают обязательность ежемесячного предоставления работодателями сведений об открытых вакансиях. Несоблюдение данного требования предусматривает штрафные санкции. Следует подчеркнуть, что процедура публикации информации о вакантных должностях для организаций и ИП подверглась корректировке еще в 2023 году. В настоящее время большинство компаний предпочитает публиковать сведения о вакансиях на специализированных интернет-площадках: Hh.ru, Superjob.ru, Rabota.ru и т. д.

Основным инструментом поиска ИТ-специалистов для компаний выступают описанные выше digital-платформы. Размещаемые на этих ресурсах вакансии являются достоверным отражением актуальных требований работодателей к профессиональным компетенциям кандидатов. Непрерывное отслеживание, аналитическая обработка и классификация данных требований становятся фундаментальной основой формирования эффективных образовательных программ в вузах [11]. Такой методологический подход особенно востребован в ИТ-индустрии, где критически важно обеспечить соответствие квалификации выпускников актуальным потребностям рынка труда.

В данной работе предлагается использовать методы машинного обучения и анализа данных для мониторинга и систематизации требований работодателей, что позволяет автоматизировать процесс создания рекомендаций для образовательных программ [12]. В отличие от традиционных методов, основанных на экспертных оценках и опросах, такие подходы значительно ускоряют обработку больших объемов данных и минимизируют субъективный фактор. Применение технологий Natural Language Processing (NLP) позволяет эффективно анализировать текстовые данные вакансий и выявлять ключевые компетенции, востребованные на рынке труда. В отличие от ручного анализа, это дает более точные результаты и обеспечивает возможность обновления данных в режиме реального времени. Кроме того, автоматизированные системы мониторинга позволяют быстро реагировать на изменения в требованиях работодателей, что делает образовательные программы более гибкими и актуальными.

Интерес к анализу требований работодателей в ИТ-сфере обусловлен важностью оценки конкурентоспособности рынка труда, раскрытия релевантных навыков и технологий и заявленных характеристик вакансий. Для трудоустройства студентов и организации найма бизнесу такая информация полезна, поскольку позволяет разрабатывать стратегии профессионального роста и концентрировать усилия на ключевых для успешной карьеры навыках. Применение предлагаемых методов может радикально изменить подход к разработке образовательных программ для человека. Анализ требований работодателей, вузам поможет проводить актуализацию программ обучения в режиме реального времени на всех уровнях и различных формах образовательных программ. Это приведет к выпуску более квалифицированного специалиста, способного решать задачи любого бизнеса [13].

Для создания актуальных программ подготовки кадров в сфере ИТ необходимо учитывать быстро меняющиеся требования работодателей к компетенциям ИТ-специалистов. С каждым годом рынок труда предъявляет все новые запросы на знания выпускников вузов [14]. Это делает необходимым разработку эффективных методов сбора и анализа этих требований, чтобы образовательные программы соответствовали реальным нуждам отрасли [15].

Проблема заключается в создании системы, которая позволит автоматизировать процесс мониторинга и классифицировать требования работодателей с использованием технологий анализа данных и машинного обучения. Например, применение методов обработки естественного языка (NLP) и анализа больших объемов текстовой информации из вакансий может существенно повысить точность и скорость получения данных о востребованных компетенциях. Цель работы – создать методы и инструменты для эффективного сбора и анализа требований к ИТ-специалистам, чтобы обновить образовательные программы в вузах и подготовить специалистов, соответствующих требованиям работодателей.

### **1. Описание предметной области**

Требования стандартов, будь то профессиональные или образовательные, можно моделировать по-разному. В моделировании таких стандартов нужно учитывать ожидания работодателей. Авторы статей, которые занимались похожими вопросами, предлагали интегрированный подход. Он сочетал в себе сами требования работодателей и анализ компетенций (полученных или получаемых) обучающихся. Авторы [3, 8] описывали методику, которая будет опираться на анализ информации в профессиональных стандартах вместе с нормативными документами. Авторы предоставили примеры профессиональных стандартов для некоторых ИТ-специальностей и рекомендовали использовать их при создании образовательных программ. Измененная, дополненная методика [4] рекомендует применять анализ рынка труда и проводить опросы среди работодателей, чтобы определить нужные специалистам компетенции.

Так как существует множество вакансий, размещаемых работодателями, они постоянно находятся в динамике – появляются новые, исчезают старые вакансии, полезно использовать доступные средства для обработки большого количества данных (big data). Также появляется возможность использовать плюсы машинного обучения, в частности – выявление общих признаков в данных, способность выявлять тенденции спроса (в нашем случае тенденции изменения спроса на ключевые навыки). Для примера можно взять разработку Barb Human из Австралии. Она и ее команда применили машинное обучение в системе с названием PredictiveHire (теперь Sapia AI). Данная система анализирует тексты вакансий и резюме соискателей, в итоге определяя более подходящих соискателей для вакансий.

Существует также другой подход – создание баз данных со всеми желаемыми компетенциями будущих сотрудников. Каждая компетенция имеет свое описание, а в совокупности данные используются для разработки моделей требуемых специалистов. Одной из популярных подобных разработок можно назвать разработанную в США Occupational Information Network. Она содержит по меньшей мере 1000 профессий и компетенций для них.

Таким образом, в мире пытаются решить самые разные проблемы, связанные с компетенциями студентов (соискателей) и ожиданиями работодателей. Можно сделать вывод, что требования работодателей (их ожидания от соискателей) важны при разработке модели специалиста. Благодаря учёту этого фактора будет возможно принимать своевременные решения в части составления образовательных программ. Для этого можно использовать машинное обучение, использовать базы данных с описаниями компетенций, различных требований. Это обеспечит более точные, актуальные модели специалистов по потребностям современного рынка труда.

Таким образом, наш объект исследования – процесс сопоставления и анализа профессиональных требований, предъявляемых работодателями к квалификации специалистов в сфере ИТ. Совокупность методологических подходов, аналитических моделей и алгоритмических решений, применяемых в процессе обработки и систематизации общедоступной информации, – это предмет исследования.

Целью работы является определение наиболее подходящей концепции сбора и обработки требований работодателей к компетенциям ИТ-специалистов для создания рекомендаций по разработке актуальных образовательных программ ИТ-специалистов, а также улучшение процесса определения общих требований, которые работодатели предъявляют к компетенциям соискателей.

Для реализации поставленной цели нужно решить следующие исследовательские задачи:

- 1) исследовать существующие теоретические модели и методологические подходы, которые помогают определить общие требования к компетенциям ИТ-специалистов, чтобы разработать на их основе комплекс рекомендаций по совершенствованию образовательного процесса;
- 2) определить комплекс методов и алгоритмических решений для реализации процессов отслеживания, сбора и предварительного анализа открытых данных, отражающих актуальные запросы работодателей к соискателям;
- 3) исследовать существующие алгоритмы автоматизированной генерации рекомендаций для реализации образовательных программ, ориентируясь на обобщенные запросы работодателей.

## **2. Современные теоретико-методологические подходы**

В методологии формирования профессиональной модели специалиста выделяются две основные траектории. Первая основывается на интеграции актуальных запросов и критериев, предъявляемых работодателями. Такой методологический подход можно кратко описать как инструкцию: создание модели ключевых навыков будущих кадров – это просмотр, чего требует рынок труда [16]. Для этого нужно изучить вакансии на рынке труда, в результате чего определить требуемые ключевые навыки выпускников. Это могут быть как профессиональные знания, так и способность работать в команде или навыки коммуникации.

Важную роль в актуализации учебных программ может сыграть сотрудничество учебных заведений с работодателями. Работодатели могут сообщить требуемые ключевые навыки, которые они бы хотели получить от будущих кадров. Работодатели могут участвовать в разработке учебных программ или, к примеру, стажировок, могут в итоге создавать новые места для трудоустройства, точно зная, кого они получают. Сам учебный процесс должен основываться на решении практических задач, это даст студентам не только теоретические знания решения проблемы или задачи, а еще и позволит испытать их в действии неоднократно, совершенствуя свои способности и прочно укрепляя теоретическую базу, что, вероятно, увеличит их конкурентоспособность. Модель подготовки специалиста должна учитывать современные тенденции и требования рынка труда.

Вторая методология основывается на нормативных документах, закрепленных в системе профессиональных и образовательных стандартов. По этой методологии модель специалиста, которую требуется построить, должна учитывать требования работодателя. Методология строится еще и на учете профессиональных и образовательных стандартов. В этом подходе важны не только технические знания в виде компетенции в профильных технологиях, умений работать с современным оборудованием и ПО, но и общие качества – коммуникативные, стремление к саморазвитию и готовность осваивать новые технологии [17]. Вторая методология подразумевает изменения в структуре профессиональной подготовки – выпускаемые специалисты должны эффективно работать в современных реалиях, а в ходе их обучения требуется усиление гуманитарной составляющей, к примеру, это может быть рассмотрение вопросов научно-технического прогресса, вопросы исторического развития техники, экологии, взаимодействия «человек – техносфера» [18].

Содержание профессиональной подготовки было разработано на основе поиска интеграции социально и профессионально значимых качеств личности. В результате были созданы программы с интегрированным содержанием и модульной организацией. Реализация интегральных основ базировалась на следующих принципах:

- акцент на активном участии студентов в учебном процессе, развитии их творческих способностей, критического мышления и самостоятельности;
- интеграция различных научных дисциплин и предметов, что позволяет сформировать целостное представление о профессиональной деятельности и выработать комплексный подход к решению задач в профессии;
- включение в учебные программы студентов тем о социальной ответственности профессионалов, общечеловеческих ценностях и этических аспектах;
- формирование навыков самостоятельного поиска, анализа и применения знаний, необходимых для профессиональной деятельности и социальной адаптации.

Описываемый подход поддерживает личностное развитие студентов (благодаря структурированию содержания профессиональной подготовки), которое оказывает влияние на успешный карьерный рост. Личностное развитие студентов включает в себя как профессиональные, так и гу-

манитарные, социальные аспекты [19]. Получается, что современный выпускник будет не просто подготовлен в профессиональном плане, но еще он будет обладать всеми теми качествами, которые помогут ему работать в любом коллективе и добиваться целей работы вне зависимости от среды [20]. В таком случае студент будет постоянно готов к обучению, чтобы обеспечить свою успешную карьеру в быстро движущемся мире.

Резюмируя вышесказанное, можно сказать, что каждый подход обладает своими сильными сторонами, но не избавлен от слабых сторон. Выбор подхода должен зависеть от целей и задач моделирования специалиста. Предложенные подходы в основном сосредоточены на запросах работодателей, что может привести к упущению деталей, связанных с образовательными стандартами. При ориентировании в определении ключевых навыков и компетенций только на данные из вакансий может быть сложно получить точный результат. Для повышения точности результата следует присмотреться к подходам, в которых используют экспертные оценки, опросы [21]. Они более полно учитывают стандарты, но требуют значительных ресурсов.

Для создания эффективной модели специалиста лучше использовать комплексный подход. Он должен объединять различные открытые источники данных, то есть данные вакансий от работодателей, профессиональные стандарты и экспертные мнения. Важно учитывать тенденции на рынке труда и изменения в востребованности навыков. Говоря про автоматизацию сбора критериев отбора кандидатов, можно использовать как общедоступную статистику, так и специализированные источники информации.

### **3. Концепция управления подготовкой ИТ-кадров**

Концепция управления подготовкой ИТ-кадров – это системный подход к планированию, развитию, оценке и контролю над подготовкой сотрудников в сфере информационных технологий. Такая концепция предполагает создание и использование эффективных и инновационных методик обучения и развития, а также партнерских отношений между работодателями и учебными заведениями.

Основные принципы концепции управления подготовкой ИТ-кадров:

- 1) обучение должно быть постоянным процессом, включающим как формальное обучение, так и индивидуальное самообучение;
- 2) обучение должно быть направлено на практическое применение знаний и умений в работе;
- 3) обучение должно быть ориентировано на актуальные потребности бизнеса, наиболее востребованные компетенции;
- 4) управление подготовкой ИТ-кадров должно основываться на передовых технологиях и инновациях, что позволит подготовить сотрудников к изменяющимся требованиям рынка;
- 5) взаимодействие между учебными заведениями, владельцами бизнеса и профессиональными ассоциациями должно быть ключевым элементом управления подготовкой ИТ-кадров, так как это позволит эффективно использовать ресурсы и создавать оптимальные условия для обучения.

Целью концепции управления подготовкой ИТ-кадров является обеспечение сферы ИТ квалифицированными специалистами в современном цифровом мире. В рамках данной концепции процесс подготовки ИТ-специалистов может быть организован следующим образом:

- сбор и структурирование данных о требованиях работодателей. Для этого могут использоваться методы обработки естественного языка, такие как анализ текстов на ключевые слова и фразы, классификация текстов по темам и др. Собранные данные могут быть представлены в виде специализированных баз данных, содержащих информацию о навыках, знаниях и опыте, необходимых для работы в сфере ИТ;
- определение ключевых понятий, являющихся базовыми единицами модели. Такими понятиями могут быть технологии (языки программирования, базы данных и т. д.), области знаний (разработка ПО, системное администрирование и т. д.) и профессиональные навыки (анализ требований, проектирование ИТ-систем и т. д.);
- разработка программы обучения на основе полученных данных. В рамках программы могут быть предусмотрены курсы и семинары, ориентированные на освоение определенных технологий и навыков, а также проектная деятельность, направленная на практическое применение полученных знаний. В качестве оценки эффективности обучения может использоваться сравнение полученных учениками образовательных результатов с актуальными профессиональными компетенциями, отраженными в информационной базе требований потенциальных работодателей;

• систематическая актуализация информационной базы профессиональных требований и последующая модификация образовательных программ помогут обеспечить динамичное развитие учебного процесса. Такой подход поможет поддержанию релевантности образовательного контента, гибкой адаптации к трансформациям, происходящим на рынке ИТ-специалистов. Это создаст условия для динамического совершенствования процесса подготовки кадров в соответствии с тенденциями отрасли.

Методологический подход к формированию образовательного процесса ИТ-кадров, базирующийся на анализе публично доступной информации о профессиональных требованиях компаний, позволяет создать эффективную и актуальную систему обучения, реагирующую на изменения рынка труда.

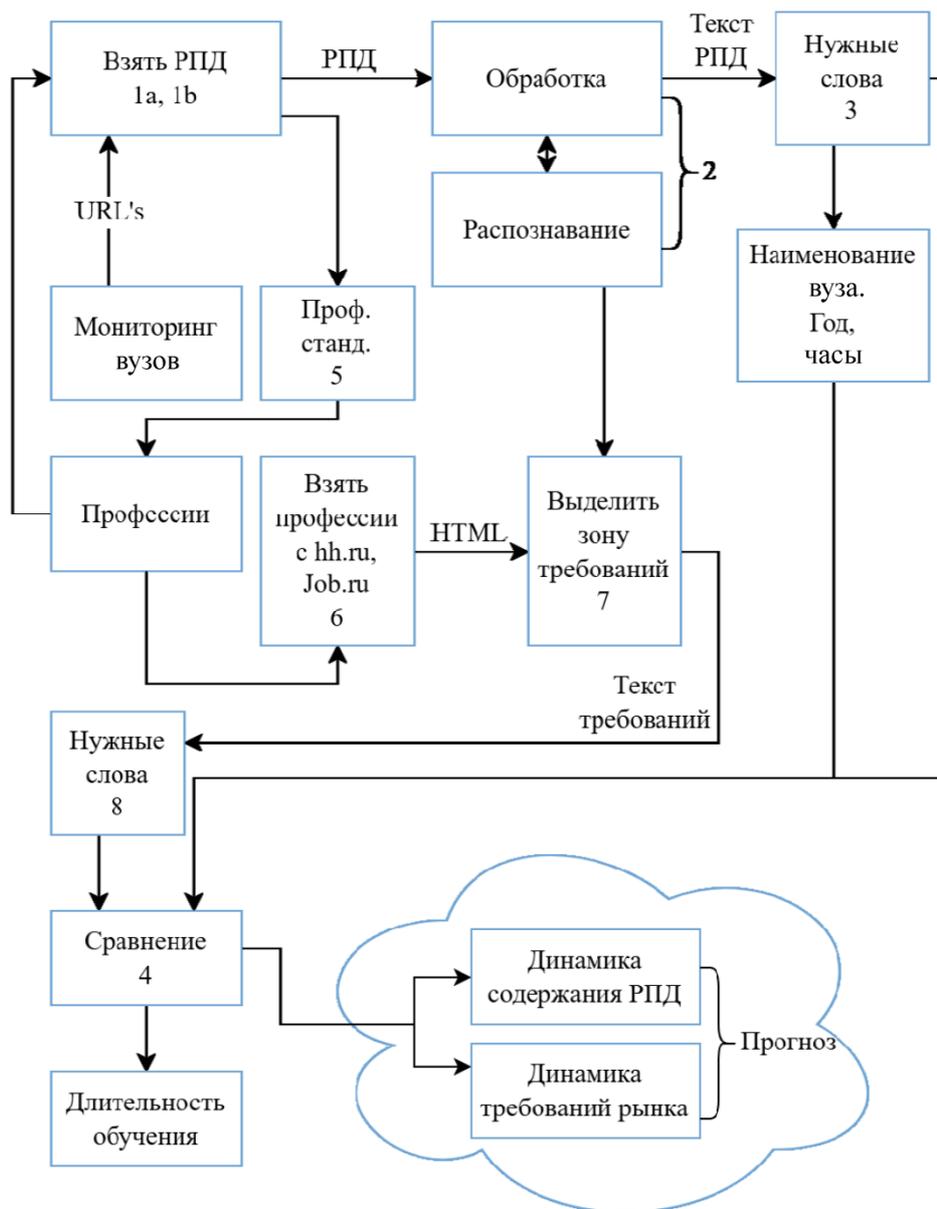


Схема концепции  
Concept diagram

Рассмотрим схему предлагаемой концепции. Она включает в себя следующие технологические модули (см. рисунок):

- мониторинг (вузы – РПД, сайты с вакансиями);
- первичная обработка;
- выделение содержания ООП;

- сравнение (главный модуль);
- выделить профессии из профессионального стандарта;
- взять профессии с сайтов по поиску работы;
- выделить необходимые требования;
- выделение содержания требований работодателя.

*Описания модулей со схемы концепции*

1. Мониторинг и сбор РПД с сайтов вузов. В данном случае можно использовать специальные программы для автоматизации процесса, например, парсинг (веб-скрейпинг) сайтов с помощью программных ботов.

2. Обработка и распознавание профессиональных компетенций. Для этого неплохо подойдут инструменты машинного обучения и анализа информации, а именно нейронные сети, алгоритмы кластеризации и т. д. К примеру, Natural Language Processing (NLP) и Text Mining. Это сможет упростить нам процесс анализа и получить более точный результат.

3. Описание структуры и основных элементов из основной образовательной программы высшего образования (ООП ВО), а для выделения необходимой информации из ООП ВО следует обратиться к соответствующим нормативным актам и структурам, которые определяют ее содержание и структуру. Основным принцип при этом заключается в том, чтобы обратить внимание на цель и задачи программы, а также на то, какие знания, навыки и компетенции должны быть сформированы у студента в результате обучения.

4. Сравнение ключевой информации с ООП ВО и требований работодателей. В ООП ВО студенты изучают принципы ИТ-направления, практическое применение языков программирования, таких как Java, C++, Python. Работодатели ожидают от выпускников знания основных концепций ООП, умение разрабатывать программы на языках программирования и умение их применять.

Также работодатели требуют от сотрудников следующего:

- знания алгоритмов и структуры данных;
- навыки разработки ПО;
- способность проводить тестирование ПО;
- анализировать информацию;
- разрабатывать веб-приложения;
- опыт работы с системами контроля версий, такими как Git.

Во время изучения и последующего сравнения основных моментов из ООП ВО, реализуемых на базе ФГОС ВО, и требований работодателей с сайтов о трудоустройстве можно отметить тот факт, что образовательная программа предлагает студентам изучение практических навыков, которые могут пригодиться им в будущем при работе или для развития карьеры. Однако, к сожалению, в ней могут быть не указаны какие-то специфические технические требования, которые могут быть необходимы некоторым работодателям [22, 23].

5. Для выделения профессии из профессионального стандарта:

1) нужно изучить профессиональные стандарты в ИТ, найти информацию о профессиях, требуемых квалификациях, должностных обязанностях;

2) изучить информацию о каждой профессии, проведя анализ требований. Определить, какие ключевые навыки необходимы для успешной работы в этой профессии;

3) изучить информацию о вакансиях в ИТ-области.

6. Выбор профессии с сайтов по поиску работы:

- поиск информации на сайтах, таких как Indeed, HeadHunter и др.;
- ввести в поисковую строку желаемую профессию;
- изучить вакансии, опубликованные на сайте. Прочитать требования к соискателю, должностные обязанности, условия работы, зарплату и др.

7. Выбор профессии с сайтов по поиску работы и необходимые требования. На страницах вакансий обычно указываются следующие требования:

- квалификационные требования (образование, опыт работы в данной области);
- навыки и компетенции;
- личностные качества;
- требования к уровню владения языками и компьютерным программным обеспечением.

8. Для выделения содержания требований работодателя необходимо изучить вакансию на сайте поиска работы и обратить внимание на требования к соискателям и на обязанности.

Далее следует анализировать требования работодателя, выявлять их сходства и отличия с требованиями, выделенными из профессионального стандарта при изучении профессии в третьем пункте. Важно также обращать внимание на конкретные компетенции и навыки, которые работодатель выделяет в своих требованиях.

### **Заключение**

Таким образом, рассмотренная концепция может помочь студентам и выпускникам определить необходимые требования для достижения успеха в карьере в ИТ-сфере.

Кроме того, в дальнейшем данная система сможет учитывать требования работодателей, а также изменения в сфере ИТ-технологий. Это позволит осуществлять подготовку обучающихся в соответствии с современными профессиональными стандартами и востребованными компетенциями. Данный подход способствует устранению несоответствий между образовательными результатами выпускников и актуальными запросами рынка труда. Система также направлена на идентификацию и последующую ликвидацию разрыва между навыками, формируемыми в процессе обучения, и профессиональными требованиями работодателей. Рекомендательная система также позволит оптимизировать процесс создания образовательных программ, сократить затраты на разработку и увеличить эффективность обучения.

В процессе анализа данных было выявлено значительное расхождение между компетенциями, предлагаемыми образовательными учреждениями, и требованиями работодателей:

- 64 % вакансий для Backend-разработчиков требовали знания современных фреймворков, таких как Node.js, Django и Spring, которые не всегда включены в учебные программы;
- 70 % вакансий для Frontend-разработчиков указывали на необходимость знания библиотек и фреймворков, таких как React, Angular и Vue.js;
- 60 % вакансий для DevOps-инженеров включали требования по знанию Docker и Kubernetes, которые редко рассматриваются в образовательных программах;
- 55 % вакансий упоминали опыт работы с облачными платформами (AWS, Google Cloud, Microsoft Azure), что свидетельствует о необходимости введения соответствующих курсов.

По итогу можно отметить несколько пробелов в текущих образовательных программах, это:

- несоответствие между навыками, приобретаемыми студентами в учебных заведениях, с реально востребованными навыками работодателями. Для уменьшения пробела требуется регулярное обновление образовательных программ учебных заведений;
- учебные программы нередко акцентируют внимание на теоретической подготовке студентов. Работодатели же ищут кандидатов с хорошо развитыми навыками практической части, с опытом работы над реальными проектами;
- программы подготовки ИТ-кадров являются устаревшими. Они не учитывают быстрое развитие технологий и изменения в ИТ-сфере. Из-за этого выпускники не обладают необходимыми навыками для успешного трудоустройства;
- программы подготовки студентов отстают в работе с современными инструментами, такими как облачные вычисления, искусственный интеллект и машинное обучение, которые, в свою очередь, становятся стандартом в индустрии;
- софт-скиллы, или же гибкие навыки, будь то работа в команде, коммуникации и управление проектами, – в этой области у выпускников имеются пробелы, ограничивающие их способность интегрироваться в профессиональные коллективы.

Анализ выявил определенные пробелы в текущих образовательных программах, которые не всегда охватывают множество востребованных на рынке навыков и компетенций. На основе результатов анализа можно сформулировать рекомендации по актуализации образовательных программ. Реализация рекомендаций может повысить качество образовательных программ, делая их более соответствующими требованиям рынка труда.

В целом такой подход поможет улучшить качество образования, повысить конкурентоспособность выпускников и удовлетворенность работодателей квалификацией специалистов, которых они нанимают.

### Список литературы

1. Сухова Е.Е. Особенности трансформации систем высшего образования Германии и России в контексте болонского процесса: автореф. ... дис. канд. социол. наук. М., 2006. 27 с.
2. Климова Ю.О. Анализ соответствия уровня компетенций выпускников ИТ-специальностей требованиям работодателей // Вопросы территориального развития. 2021. Т. 9, № 1. С. 1–18. DOI: 10.15838/tdi.2021.1.56.5
3. Гузаиров М.Б., Герасимова И.Б. Системный подход к оценке качества образовательного процесса // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 5. С. 29–33.
4. The use of Ontologies in the Development of a Mobile E-Learning Application in the Process of Staff Adaptation / A. Bakanova, N.E. Letov, D. Kaibassova et al. // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019. Vol. 8, iss. 2S10. P. 780–789. DOI: 10.35940/ijrte.B1144.0982S1019
5. Лебедева Т.Ф., Муравьев С.А. Профессиональные стандарты в сфере информационных технологий как руководство к действию // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2016. № 4 (24). С. 92–97.
6. Яруллин Д.В., Файзрахманов Р.А. Построение модели ИТ-специалиста на основе нечеткой кластеризации для системы поддержки принятия решений в сфере кадрового обеспечения // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2020). 2020. Т. 1. С. 250–254.
7. Спирин И.С. О проблемах подготовки ИТ-специалистов в вузе в период цифровой трансформации российской экономики // Мир науки, культуры, образования. 2021. № 4 (89). С. 234–238. DOI: 10.24412/1991-5497-2021-489-234-238
8. Ширяев О.В. Модели и алгоритмы управления учебным процессом с учетом мониторинга требований работодателей (на примере магистерской подготовки): дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский гос. авиац. техн. ун-т, 2017. 148 с.
9. Подготовка инженерных кадров для цифровой экономики России: моногр. / В.Н. Зимин, Т.Ю. Цибизова, Е.В. Чернега и др. М.: Изд-во Московского гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2017. 176 с. ISBN 978-5-7038-4856-2.
10. Игнатъева Е.А., Базылев Я.С. Особенности формирования цифровых компетенций в современных условиях рынка труда // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 11-4 (74). С. 152–157. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-11-4-152-157
11. Морозова О.А., Алтухова Н.Ф. Подготовка к профессиональной проектной деятельности: задачи вуза // Казанский педагогический журнал. 2022. № 1 (150). С. 52–61. DOI: 10.51379/kpj.2022.151.1.006
12. Яруллин Д.В. Интеллектуальная система управления подготовкой ИТ-специалистов на основе денотативной аналитики // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 3. С. 141–164. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.03.08
13. Калевко В.В., Лагереv Д.Г., Подвесовский А.Г. Управление образовательной программой вузов в контексте подготовки конкурентоспособных разработчиков программного обеспечения // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 4. С. 803–814. DOI: 10.25559/SITITO.14.201804.803-814
14. Поздеева С.Н., Зайчикова И.В. Вузовская подготовка ИТ-специалистов в современных условиях // Известия Байкальского государственного университета. 2024. Т. 34, № 1. С. 71–77. DOI: 10.17150/2500-2759.2024.34(1).71-77
15. Касьянова Е.В. Развитие гибких навыков, профессионально-значимых для ИТ-специалистов // Педагогическая информатика. 2023. № 3. С. 178–191.
16. Каракозов С.Д., Худжина М.В., Петров Д.А. Проектирование содержания профессиональных компетенций образовательного стандарта ИТ-специалиста на основе требований профессиональных стандартов и работодателей // Информатика и образование. 2019. № 7 (306). С. 7–16. DOI: 10.32517/0234-0453-2019-34-7-7-16
17. Касьянова Е.В. Актуальность развития гибких навыков будущих ИТ-специалистов // Преподаватель XXI век. 2023. № 4-1. С. 59–69. DOI: 10.31862/2073-9613-2023-4-59-69
18. Аншина М.Л. Особенности обучения ИТ с учетом современных ролей предоставления ИТ-услуг // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. Т. 11, № 1. С. 27–30.

19. Мягкие компетенции для ИТ специалистов / А.А. Алетдинова, З.А. Капелюк, М.И. Дроздова, С.А. Городкова // Вестник академии. 2022. № 2. С. 64–69. DOI: 10.36871/v.a.2022.06.02.007
20. Калевко В.В., Лагерев Д.Г., Подвесовский А.Г. Управление образовательной программой вузов в контексте подготовки конкурентоспособных разработчиков программного обеспечения // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 4. С. 803–814. DOI: 10.25559/SITITO.14.201804.803-814
21. Деева Е.А. Формирование перечня профессиональных компетенций для образовательных программ ИТ-специалистов с использованием экспертных оценок // Инновации и инвестиции. 2023. № 9. С. 300–303.
22. Климова Ю.О., Устинова К.А. Несоответствие уровня подготовки ИТ-кадров требованиям работодателей: проблемы и пути их преодоления // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2021. Т. 14, № 5. С. 202–219. DOI: 10.15838/esc.2021.5.77.12
23. Матвеева А.И. Проблемы и перспективы развития открытого дистанционного образования в условиях электронной культуры // Тенденции развития электронного образования в России и за рубежом: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2020. С. 95–98.

### References

1. Sukhova E.E. *Osobennosti transformatsii sistem vysshego obrazovaniya Germanii i Rossii v kontekste bolonskogo protsessa: avtoref. dis. kand. sotsiol. nauk* [Features of the transformation of higher education systems in Germany and Russia in the context of the Bologna process. Abstract of Cand. sci. diss.]. Moscow; 2006. 27 p. (In Russ.)
2. Klimova Yu.O. Correspondence analysis of the competence level of graduates of IT specialties with employers' requirements. *Territorial Development Issues*. 2021;9(1):1–18. (In Russ.) DOI: 10.15838/tdi.2021.1.56.5
3. Guzairov M.B., Gerasimova I.B. The system approach to the evaluate of educational process quality. *Vestnik UGATU*. 2007;9(5):29–33. (In Russ.)
4. Bakanova A., Letov N.E., Kaibassova D., Kuzmin K.S., Loginov K.V., Shikov A.N. The use of Ontologies in the Development of a Mobile E-Learning Application in the Process of Staff Adaptation. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019;8(2S10):780–789. DOI: 10.35940/ijrte.B1144.0982S1019
5. Lebedeva T. F., Muravyov S. A. Professional standards in the IT sector as a guide to action. *Professional Education in Russia and Abroad*. 2016;4(24):92–97. (In Russ.)
6. Yarullin D.V., Fayzrakhmanov R.A. [Developing a Model of an IT Specialist Based on Fuzzy Clustering for a Decision Support System in Human Resources]. In: *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2020)* [International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2020)]. 2020. Vol. 1. P. 250–254. (In Russ.)
7. Spirin I.S. About problems of training IT specialists at a university during the digital transformation of the Russian economy. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya = The World of Science, Culture and Education*. 2021;4(89):234–238. (In Russ.) DOI: 10.24412/1991-5497-2021-489-234-238
8. Shiryayev O.V. *Modeli i algoritmy upravleniya uchebnym protsessom s uchetom monitoringa trebovaniy rabotodateley (na primere magistrskoy podgotovki): dis. kand. tekhn. nauk* [Models and Algorithms for Managing the Educational Process Considering Employer Requirements (on the Example of Master's Training). Cand. sci. diss.]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2017. 148 p. (In Russ.)
9. Zimin V.N., Tsibizova T.Yu., Chernega E.V., Sergeev D.A., Avgustan O.M. *Podgotovka inzhenernykh kadrov dlya tsifrovoy ekonomiki Rossii: monografiya* [Training of Engineering Personnel for the Digital Economy of Russia. Monograph]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2017. 176 p. (In Russ.) ISBN 978-5-7038-4856-2.
10. Ignateva E.A., Bazylev Ya.S. Features of the formation of digital competencies in modern labor market conditions. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2022;11-4(74):152–157. (In Russ.) DOI: 10.24412/2500-1000-2022-11-4-152-157
11. Morozova O.A., Altukhova N.F. Preparation for professional project activity: tasks of the university. *Kazan pedagogical journal*. 2022;1(150):52–61. (In Russ.) DOI: 10.51379/kpj.2022.151.1.006
12. Yarullin D.V. Intelligent control system for IT specialists training based on denotative analytics. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2022;(3):141–164. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2022.03.08

13. Kalevko V.V., Lagerev D.G., Podvesovskii A.G. Educational program management of universities in the context of training competitive software developers. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2018;14(4):803–814. (In Russ.) DOI: 10.25559/SITITO.14.201804.803-814
14. Pozdeeva S.N., Zaychikova I.V. Training of IT specialists at the university in modern conditions. *Bulletin of Baikal State University*. 2024;34(1):71–77. (In Russ.) DOI: 10.17150/2500-2759.2024.34(1).71-77
15. Kas'yanova E.V. Development of soft skills, professionally significant for IT specialists. *Pedagogical Informatics*. 2023;(3):178–191. (In Russ.)
16. Karakozov S.D., Khudzhina M.V., Petrov D.A. Development of the content of professional competencies of the educational standard of an IT specialist based on the requirements of occupational standards and employers' needs. *Informatics and Education*. 2019;7(306):7–16. (In Russ.) DOI: 10.32517/0234-0453-2019-34-7-7-16
17. Kasyanova E.V. Relevance of the Development of Soft Skills of Future IT Specialists. *Prepodavatel XXI vek. Russian Journal of Education*. 2023;4-1:59–69. (In Russ.) DOI: 10.31862/2073-9613-2023-4-59-69
18. Anshina M.L. [Features of IT Training Considering Modern Roles in IT Service Delivery]. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2015;11(1):27–30. (In Russ.)
19. Aletdinova A.A., Kapelyuk Z.A., Drozdova M.I., Gorodkova S.A. Soft competencies for IT professionals. *Bulletin of the Academy*. 2022;(2):64–69. (In Russ.) DOI: 10.36871/v.a.2022.06.02.007
20. Kalevko V.V., Lagerev D.G., Podvesovskii A.G. Educational program management of universities in the context of training competitive software developers. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2018;14(4):803–814. (In Russ.) DOI: 10.25559/SITITO.14.201804.803-814
21. Deeva E.A. Formation of a list of professional competencies for educational programs of IT specialists using expert assessments. *Innovacii i investicii*. 2023;(9):300–303. (In Russ.)
22. Klimova Yu.O., Ustinova K.A. Mismatch between the level of training of IT personnel and the requirements of employers: problems and solutions. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2021;14(5):202–219. DOI: 10.15838/esc.2021.5.77.12
23. Matveeva A.I. [Problems and Prospects for the Development of Open Distance Education in the Context of Electronic Culture]. In: *Tendentsii razvitiya elektronnoy obrazovaniya v Rossii i za rubezhom: materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Trends in the Development of Electronic Education in Russia and Abroad: Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference]. Ekaterinburg; 2020. P. 95–98. (In Russ.)

#### **Информация об авторах**

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; [z Xenon@narod.ru](mailto:z Xenon@narod.ru).

**Шаклеина Полина Андреевна**, инженер технической поддержки, ООО «КВАЗАР», Березники, Россия; [wpolina28@gmail.com](mailto:wpolina28@gmail.com).

**Красовский Роман Валерьевич**, аспирант кафедры информационных технологий и автоматизированных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; [romus-kras@mail.ru](mailto:romus-kras@mail.ru).

#### **Information about the authors**

**Andrey V. Zatonkiy**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; [z Xenon@narod.ru](mailto:z Xenon@narod.ru).

**Polina A. Shakleina**, Technical Support Engineer, LLC “QUASAR”, Berezniki, Russia; [wpolina28@gmail.com](mailto:wpolina28@gmail.com).

**Roman V. Krasovskiy**, Postgraduate Student of the Department of Information Technologies and Automated Systems, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; [romus-kras@mail.ru](mailto:romus-kras@mail.ru).

*Статья поступила в редакцию 13.08.2024*

*The article was submitted 13.08.2024*

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF MANAGING HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS: RESEARCH ANALYSIS

**O.V. Loginovskiy**, [loginovskiiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiiov@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The problem of improving the efficiency of managing higher education institutions has recently acquired special significance. Russia's confrontation with Western countries, which has significantly intensified in recent years, has led to the fact that Russian universities are no longer considered not only in the ratings of world foreign agencies, but also began to be excluded in general, as well as Russian papers from the collections of scientific research abroad. As a result, trying to remain on the lists of universities of foreign rating agencies, domestic universities perform largely useless work. In this regard, Russian universities lose time and money trying to achieve an increase in their position in foreign rankings. **The paper aims** to analyze the research of domestic and foreign scientists in the field of improving the effectiveness of managing educational institutions and to develop conceptual provisions to improve the quality of managing higher education institutions in Russia. **Materials and methods.** The paper considers the most significant studies of Russian and foreign scholars, who have studied the issues of higher education institutions development management in certain years, as well as some analytical articles and materials that aim to achieve similar results. It also uses well-known methods of analysis and comparison of various studies traditionally used in the field of management. **Results.** The paper presents the research analysis and comparison of works on improving the quality of management of Russian and foreign higher education institutions. **Conclusion.** The formation of conceptual provisions to improve the efficiency of managing higher education institutions in Russia should be focused not only and not so much on improving the ratings of universities, but on making their activities much more productive. This can only be achieved by ensuring that universities develop in accordance with the key objectives of the development of the respective regions and the country as a whole, and are focused not on secondary, but on key technical directions of promising the dynamics of the national economy.

**Keywords:** management, improving efficiency, educational institutions, strategic development, operational management

**For citation:** Loginovskiy O.V. Improving the efficiency of managing higher education institutions: research analysis. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):83–98. DOI: 10.14529/ctcr250107

Обзорная статья  
УДК 378.1  
DOI: 10.14529/ctcr250107

## АНАЛИЗ НАУЧНЫХ РАБОТ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСШИМИ УЧЕБНЫМИ ЗАВЕДЕНИЯМИ

**О.В. Логиновский**, [loginovskiiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiiov@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Проблема повышения эффективности управления высшими учебными заведениями в последнее время приобретает особое значение. Противостояние России со странами Запада, значительно усилившееся в последние годы, привело к тому, что российские вузы перестали рассматриваться не только в рейтингах мировых зарубежных агентств, но и вообще стали исключаться, как и российские статьи из сборников научных исследований за рубежом. В результате, пытаясь сохраниться в списках вузов зарубежных рейтинговых агентств, отечественные университеты выполняют во многом бесполезную работу. В этой связи российские вузы теряют время и деньги на

попытки достичь повышения своего положения в зарубежных рейтингах. **Целью данной работы** является осуществление анализа исследований отечественных и зарубежных ученых в области повышения эффективности управления учреждениями образования и разработка концептуальных положений по совершенствованию качества управления высшими учебными заведениями в России. **Материалы и методы.** В качестве материалов, подлежащих анализу, в работе рассматриваются наиболее существенные исследования российских и зарубежных авторов, изучавших в те или иные годы вопросы управления развитием высших учебных заведений, а также некоторые аналитические статьи и материалы, ставящие перед собой целью достижение аналогичных результатов. В работе используются широко известные методы анализа и сопоставления разнообразных исследований, традиционно применяемые в области управления. **Результаты.** В статье представлены результаты анализа и сопоставления работ по повышению качества управления российскими и зарубежными высшими учебными заведениями. **Заключение.** Формирование концептуальных положений по повышению эффективности управления высшими учебными заведениями в России должно быть ориентировано не только и не столько на повышение рейтингов университетов, сколько на то, чтобы их деятельность стала гораздо более продуктивной, чем в настоящее время. Этого можно достичь лишь за счет того, чтобы университеты развивались в соответствии с ключевыми задачами развития соответствующих регионов и страны в целом и были ориентированы не на второстепенные, а на главные магистральные технические направления перспективной динамики народного хозяйства.

**Ключевые слова:** управление, повышение эффективности, образовательные учреждения, стратегическое развитие, оперативное управление

**Для цитирования:** Loginovskiy O.V. Improving the efficiency of managing higher education institutions: research analysis // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 83–98. DOI: 10.14529/ctcr250107

## Introduction

The problem of improving the efficiency of higher education institutions (HEI) has existed for many decades, but in recent years it has become increasingly important due to the need to integrate management and decision-making processes to the level of systemic, complexly interrelated development. All this becomes even more acute in the conditions of confrontation of our country with the USA and its satellites in the NATO bloc, when the issues of technological independence, import substitution, further promotion of scientific research, which in the last 30 years was conducted with the use of western equipment, modern foreign technologies and materials, come to the forefront. The very process of information technology dynamics in terms of digitalization, development of computing facilities and systems, technologies of data transmission, storage and processing, as well as means of their analysis using, among other things, artificial intelligence, gives special significance to the problem under consideration.

Over the last 30 years, research in the field of improving the efficiency of HEIs management in Russia has been carried out in line with pro-Western ideologies with the focus on the calculation of indicators of HEIs' performance, necessary for the formation of appropriate ratings, prepared according to the developed methods of various foreign agencies. At the same time, it should be noted that the race for indicators, carried out within the framework of foreign methods, will never allow Russian universities to reach the top positions of world rankings, as these methods are fully oriented to highlighting the advantages of foreign universities, authors, approaches and concepts.

Thus, the actual goal of improving the activity of educational institutions in Russia is the development of such conceptual provisions, methods and models of higher education institutions management, which will contribute to a significant increase in the effectiveness of their activities, taking into account the solution of state and regional tasks in the field of industrial renewal, development of territories, introduction of digital technologies, etc. Undoubtedly, higher education institutions should become one of the main participants of this process.

## 1. Foreign studies in the field of improving the efficiency of university management

Studies on improving the management of higher education institutions have a long history.

Back in the 70s of the last century, scientists and specialists in the field of management by analogy with the creation of approaches and concepts of functioning of industrial enterprises realized the need to

present an educational institution as an integral system, which could be structured and developed in a variety of ways with the use of appropriate methodological and technical developments [1–3].

One of the first major works [4] on the problem of implementing strategic management in higher education institutions proposed the following innovations:

- The need to form administrative management structures in HEIs, which would streamline the existing various academic units (moreover, it was postulated that the academic staff of HEIs should take an active non-indirect participation in the development of management decisions together with the relevant employees of administrative structures). The aim of all this was to “bring the decision-making process out of the closet”, to make it “explicit, clear and public” [4];

- The development of universities in the context of changes in the world around them. This should lead to universities finding their niche in the higher education ecosystem, “behaving like an organism that needs to feed, change and adapt to its environment” [4].

These ideas were perceived by many at that time as a new way of thinking about how universities should plan their development. Later on, they received a concrete reference in the adopted and implemented strategies of American [5–11], European [12–18], Australian, Chinese and other universities [19–21]. It should be noted that all these examples reflect the specifics and features of universities and their adaptation to changing conditions.

The improvement of the above methodologies further led to the fact that by now the main components that constitute the essence of the strategic approach to university management have been formulated: goal setting, strategic analysis, development of strategy and its implementation plan, strategic changes and strategic control [22–25].

Thus, the idea of a strategic model of a university seeking to gain an advantage over its competitors by providing better services was formed. The implementation of this strategic model allowed HEIs with higher indicators, measured in different ways, to receive priority funding in larger amounts at the expense of reducing the financial support to institutions of higher education with lower indicators.

Thus, it should be stated that the overwhelming part of research in the field of strategic management of higher education institutions, related to the process of rating universities, does not allow it to become a panacea for the real development of higher education institutions. It translates the results of universities' work into the plane of “artificial reality”, which in many respects does not reflect the actual achievements of managerial activity of heads of educational institutions.

In addition to the concepts of strategic management of universities, other management ideas of different nature have appeared in the foreign scientific literature in recent years. These include:

- an approach to attract professional managers to work within the administrative structures of universities [26]. This practice is aimed at ensuring that university managers can manage the activities of educational institutions more effectively;

- the approach to the formation of new mechanisms for assessing innovation activity, which can be realized in two directions: the definition and selection of other rating indicators, or the transition to other, more elaborate and qualitative assessment procedures [27];

- the concept of forming a model of a digital university [28], characterized by network organization, flexible structure, quickly adapting to changes in the external environment, the development of management decisions based on data, the use of advanced methods of control and reporting due to the digitalization of all processes;

- search for alternative effective models of organization of universities of the future, free from the frameworks, standards, rules that have been established in classical universities for centuries [29].

A number of foreign studies are also devoted to the interaction of universities with industrial enterprises, organizational and management structures of territorial nature and other institutions and organizations [30–36]. These ideas were developed in the late twentieth and early twenty-first centuries and are associated with the modernization of the regional economy based on the active use of knowledge. One of the ideas of this kind is to find mechanisms of effective interaction between universities, whose management area includes education, research and social services, on the one hand, and various objects of regional importance, on the other hand, whose management area is focused on education, innovation and cultural needs [31].

At the same time, the expected results of university activities include: development of new economic and commercial concepts, contribution to science and technological innovation, development of local

communities, innovation in environmental protection. Such cooperation with industry, population and other subjects should eventually play an active role in economic growth and solving complex social problems [27].

Domestic scientists also analyzed foreign studies. In particular, the models of engineering education [37], technology transfer [38], cases of strategic management implementation, issues of university typologization and various approaches to management [35, 36, 39] were considered.

It should be noted some reasons why the developments of foreign researchers are not very suitable for practice in the management of domestic universities. One of such considerations is the fact that in our country higher education institutions have insufficient autonomy in the formation and adoption of managerial decisions, which should be coordinated with higher educational structures (departments, ministries), as well as state authorities of regional and federal scales. In addition, the opportunities for entrepreneurial activity of universities are largely limited and significantly constrained by the current tax legislation and the unwillingness of a significant part of university staff to engage in such activities.

## **2. Studies on improving the efficiency of university management in Russia**

It goes without saying that the issues of development of higher education institutions in our country were studied even in the period of the Soviet Union. However, the change of social order in Russia that took place in the 1990s led to the fact that domestic educational organizations began to be regarded as fully similar institutions in the West.

Among the earliest studies in the field of educational management in modern Russia, one should note the attempts to fully transfer the achievements of Western concepts and approaches to the theory of development and practice of Russian universities [40–43]. However, the current state of affairs and specific features of Russian universities are so different from their foreign counterparts that the use of such Western experience has not yielded positive results. The use of strategic management theory of business structures to the development of educational institutions did not bring the desired results either.

By 2008, a more or less structured set of methodological recommendations on the implementation of strategic management in Russian universities was formed in Russian education, which contained, in addition to numerous examples of the development and implementation of strategic plans, also contained a description of methods and tools of strategic management [44, 45]. Nevertheless, today this complex is largely outdated and does not allow university managers to achieve the necessary effect.

Numerous publications [42, 44, 46–58] have developed various concepts of strategic management of educational institutions, which were applied by the heads of a number of universities in our country.

In this context, we can distinguish the main directions of this practice: the approach to management taking into account the positions of stakeholders [46–48, 59]; project-oriented model of the university [42, 49, 50]; process model of university management [51]; various methods of designing programs of strategic development of universities [46, 54–58]; recommendations on the use of marketing tools as a means of increasing the competitiveness of universities [52, 53], ecosystem approach [39].

It is also necessary to note a whole group of analytical studies concerning the improvement of the quality of educational results [60–64]. Researchers distinguish a number of main groups of factors affecting the quality of education [62]. These include:

- formulation of the mission of university development taking into account its priority directions and cultural features;
- formation of a set of educational programs and their filling in accordance with the actual needs of students and employers, as well as taking into account the state and regional requirements;
- creation of digital infrastructure of the educational institution, carried out in full compliance with the development of digitalization of regional and state authorities;
- development and use of modern programs and platforms for e-learning and assessment of educational results;
- organization of a comfortable living and learning environment for undergraduate and postgraduate students;
- ensuring the inclusion of freshmen and foreign students in the educational process through adaptation programs;
- creation of feedback procedures between the participants and managers of the educational process;
- development and management of quality assessment procedures.

Among other measures to improve the quality of educational results, some other measures are also highlighted today: preparing the transition to a student-centered model of higher education institution, using procedures for the formation of individual educational trajectories; providing access through personal accounts of students and teachers to electronic resources of universities; creating a complex of “smart classrooms” in universities; using models and algorithms that process a wide variety of information based on the methods of big data analysis [65–74].

It should be noted that recently the number of publications concerning the problems of ensuring closer interaction between universities and industrial enterprises of the defense complex and other high-tech industries has increased [75–87]. In this regard, universities should make some significant efforts to make such a linkage as constructive and effective as possible. This is the only way to ensure that the production process of the above-mentioned enterprises can be based on effective domestic technologies and developments [87–89].

### **3. Analysis of foreign and domestic approaches to the formation of conceptual provisions to improve the efficiency of managing higher education institutions**

The various studies on the improvement of higher education institutions' management presented in Sections 1 and 2 show that the topics of these developments are mainly focused on the issues of strategic management of universities. At the same time, the issues of operational management of higher education institutions are also studied, but to a much lesser extent and volume, and their results are not presented as significant and important as for the concepts of strategic management. The latter, in the author's opinion, is quite obvious and should be oriented to the interests of specific higher education institutions within the framework of their specifics and peculiarities of development.

As already mentioned in Section 1, the problems of strategic management in higher education institutions abroad, which have been studied for many decades, have formed several main directions:

- the need to achieve consistency of managerial decisions of representatives of administrative and academic management;
- expectation of innovations in response to the obsolescence of technologies and knowledge;
- competition of universities for funding through the achievement of certain indicators;
- the complexity of transferring the tools and methods of strategic management applicable in commercial organizations for profit maximization to the activities of an educational institution pursuing other goals.

It goes without saying that a number of previously developed concepts of strategic management of higher education institutions have ceased to be relevant and are mainly of historical and analytical nature.

By now, strategic concepts of development of different types of higher education institutions have been formed, examples of which are large research universities, general education institutions with high social accessibility, entrepreneurial universities, open universities and others.

The implementation of these and other concepts of strategic management of higher education institutions is based on a number of previously mentioned well-known approaches, which can be combined into two large groups: comprehensive approaches, focused on a complete study of the future picture of university development, and problematic approaches, focusing on a limited set of alternative programs for the development of an educational organization.

Considering the domestic research in the field of strategic management of higher education institutions, it should be noted that the overwhelming part of these studies, to a greater or lesser extent, repeats the already established approaches to the management of higher education institutions, formulated in foreign sources.

As a result, the concepts of strategic development of universities presented in Section 2 are, to a large extent, a kind of linking of the well-known Western concepts (methods and development programs) to the conditions of functioning of higher education institutions in our country [40, 44, 47, 54].

It should be noted that the development of strategic management concepts for Russian universities was mainly carried out by domestic scientists and specialists in economic sciences [39, 46, 56, 68].

It should be emphasized that most foreign and domestic developments in the field of university management are focused on the inclusion of universities in world rankings (THE, QS, ARWU, etc.) and increasing their positions in these rankings [27, 35, 44, 48, 54].

It seems that the formation of conceptual provisions to improve the efficiency of higher education institutions management in Russia should be focused not only and not so much on improving the ratings of universities, but on making their activities much more productive than at present. This can only be achieved by ensuring that universities develop in accordance with the key objectives of the development of the respective regions and the country as a whole, and are oriented not on secondary, but on the main technical directions of the promising dynamics of the national economy. This is what is mostly lacking in those developments in the field of university efficiency, which are still being carried out to improve their position in the rating hierarchies of various foreign agencies. A significant disadvantage of the domestic concepts for improving the efficiency of universities is that the Russian developments in this area are not aimed at interaction with federal and regional government bodies, which support the most important industrial enterprises of the region, producing products for the defense-industrial complex, and other areas of urban and region-forming importance. It is very important to realize that many economic concepts and developments to improve the competitiveness of universities are not universal. They are applicable mainly for universities of widely demanded specialties (economic, legal, design, etc.). At the same time, they do not contribute much to improving the efficiency of educational institutions in high-tech engineering and technical areas, which are so necessary for the national economy.

It should also be noted that a detailed presentation of concepts and developments in the field of improving the efficiency of HEIs is hardly appropriate. The full disclosure of university strategies can be presented only as part of the documents of official use in the interaction of public authorities with universities, industrial enterprises and other objects involved in these developments.

Thus, the conceptual provisions for improving the effectiveness of universities should include:

- clear positioning of federal state and regional interests in the development of the respective constituent entities of the Russian Federation, cities and territories, with the participation in this development of higher educational institutions stationed in the respective regions;
- vision of the heads of educational institutions in the region on the development of their institutions, taking into account the respective positions of federal and regional government bodies and other stakeholders;
- assessment of the necessity and expediency of interaction of educational institutions with industrial enterprises and business communities of the region and other territories of the country;
- development and use of relevant models and technologies in educational institutions and other facilities in the region, especially digital development technologies;
- ensuring the improvement of the quality of personnel training for industrial enterprises, organizations and institutions of the region at all levels of vocational education, as well as improving the qualification of industrial and economic workers in the field of digital, information and management technologies.

### **Conclusion**

Considering the results of foreign and domestic studies in the field of improving the effectiveness of management of educational institutions, it can be seen that to date, various approaches, concepts, models and developments aimed at achieving more effective results of strategic and operational management of higher education institutions are still largely contradictory.

In foreign concepts and approaches to the strategic management of educational institutions, despite the fact that they were developed in a much longer period of time than in our country, the rating approach to the evaluation of the work of higher education institutions prevails. As a result, the methods and technologies for improving the ratings of universities, having come to the forefront, in some ways do not allow foreign universities to develop as they might have developed in the absence of rating dogma.

In a shorter period of time, having passed the way from free floating to the similar foreign practice of chasing rating indicators among the world totality of universities, domestic universities are also far from creating the most constructive and effective mechanisms of university management. Transitioning from one “fashionable” concepts of educational institutions development to another, it is not always possible to achieve the goal of effective development of universities. In this regard, the modern concept of development of Russian universities should refuse from the fact that the main ways and mechanisms of university development are rigidly subordinated to the desire to achieve maximum ratings in the world hierarchy of universities.

Thus, the composition and content of the main directions of development of Russian universities can and should be based on the conceptual scientific provisions presented in Section 3 of this article. HEI managers should abandon the task of chasing the increase of ratings and fully focus their efforts on identifying and using the most important means and methods to achieve the goals of university management with the least expenditure of time, material and human resources.

### References

1. Cohen M.D., March, J.G, *Leadership and Ambiguity: The American College President*. A General Report Prepared for the Carnegie Commission on Higher Education. McGraw-Hill, New York, NY; 1972.
2. Weick K.E. Educational organizations as loosely coupled systems. *Administrative Science Quarterly*. 1976;21:1–19.
3. Clark B.R. *The Higher Education System: Academic Organization in Cross-National Perspective*. University of California Press, Berkeley, CA; 1983.
4. Keller G. *Academic Strategy: The Management Revolution in American Higher Education*. JHU Press; 1983.
5. Chaffee E.E. The concept of strategy: from business to higher education. In: *Smart J. (Ed.) Higher Education: Handbook of Theory and Research*. Agathon Press, New York, NY; 1985. Vol. 1. P. 133–172.
6. Boldt D.B. University Strategic Management: A Businessman's View. *The International Journal of Educational Management*. 1991;5(5). DOI: 10.1108/09513549110135616
7. Bryson J.M. *Strategic Planning for Public and Nonprofit Organizations*. Jossey-Bass, San Francisco, CA; 1995.
8. Peterson M.W., Dill D.D., Mets L.A. Using contextual planning to transform institutions. In: *Peterson M.W., Dill D.D., Mets L.A. and Associates (Eds.). II Planning and Management in a Changing Environment: A Handbook on Redesigning Postsecondary Institutions*. Jossey-Bass, San Francisco, CA; 1997. P. 127–157.
9. Rowley D.J. *Strategic Change in Colleges and Universities: Planning to Survive and Prosper*. Jossey-Bass Higher and Adult Education Series, Jossey-Bass Inc., San Francisco, CA; 1997.
10. Clark B.R. *Creating Entrepreneurial Universities: Organizational Pathways of Transformation*. Pergamon Press, New York, NY; 1998.
11. Rhoades G. Who's doing it right Strategic activity in public research universities. *The Review of Higher Education*. 2000;24(1):41–66.
12. Groves R.E.V., Pendlebury M.W., Stiles D.R. A critical appreciation of the uses for strategic management thinking, systems and techniques in British universities. *Financial Accountability & Management*. 1997;13(4):293–312. DOI: 10.1111/1468-0408.00040
13. Thys-Clement F., Wilkin L. Strategic management and universities: outcomes of a European survey. *Higher Education Management*. 1998;10:13–28.
14. Bayenet B., Feola C., Tavemier M. Strategic management of universities evaluation policy and policy evaluation. *Higher Education Management*. 2000;12(2):65–80.
15. Shattock M. Strategic management in European universities in an age of increasing institutional self-reliance. *Tertiary Education and Management*. 2000;6(2):93–104.
16. Antoinetti J.-F., De Roten F.C., Leres J.-F. Experience of Swiss universities in public eyes. *Higher Education in Europe*. 2002;(3).
17. Dyson R.G. Strategic development and SWOT analysis at the university of Warwick. *European Journal of Operational Research*. 2004;152(3):631–640. DOI: 10.1016/s0377-2217(03)00062-6
18. Morgan A. Higher Education Reform in the Balkans: the Bologna Process. *International Higher Education*. 2004;(34). DOI: 10.6017/ihe.2004.34.7400
19. Poole D. Moving towards professionalism: the strategic management of international education activities at Australian universities and their faculties of business. *Higher Education*. 2001;42(4):395–435.
20. Chen Sh. The Features and Trends of University Development in Australia and China. *Higher Education Policy*. 2007;20(2):207–216. DOI: 10.1057/palgrave.hep.8300147
21. Kozhakhmetova A.B. (Ed.). *V poiskakh effektivnoy modeli kazakhstanskogo universiteta: monografiya* [In search of an effective model for Kazakhstan's university: Monograph]. Almaty; 2021. 272 p. (In Russ.)

22. Freeman R.E. *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Cambridge University Press; 2010. 276 p.
23. Shattock M. *Managing Successful Universities*. Maidenhead: McGraw-Hill Education, Open University Press, 2010. 225 p.
24. Hill C., Jones, G., Schilling M. *Strategic Management: Theory: An Integrated Approach*. Mason, OH: Cengage Learning; 2010.
25. Strike T. (Ed.). *Higher Education Strategy and Planning: A Professional Guide*. Abingdon: Routledge; 2018. 257 p.
26. Liu Wei. Higher education leadership development: an international comparative approach. *International Journal of Leadership in Education*. 2019;24:1–19. DOI: 10.1080/13603124.2019.1623920
27. Cinar R., Benneworth P., Coenen L. Changing conceptualization of innovation in the European Union and its impact on universities: Critical junctures and evolving institutional demands. *Research Evaluation*. 2024;33:rvad006. DOI: 10.1093/reseval/rvad006
28. Sułkowski Ł. *Managing the digital university: paradigms, leadership, and organization*. New York: Routledge; 2023. 286 p. DOI: 10.4324/9781003366409
29. Staley D.J. *Alternative universities: speculative design for innovation in higher education*. Baltimore, USA: Johns Hopkins University Press; 2019. 280 p. Available at: <https://muse.jhu.edu/book/66169> (accessed 18.08.2024).
30. Cyert R.M., Goodman P.S. Creating effective university-industry alliances: an organizational learning perspective. *Organizational Dynamics*. 1997;25(4):45–57. DOI: 10.1016/S0090-2616(97)90036-X
31. Goddard J.B., Chatterton P. Regional Development Agencies and the knowledge economy: Harnessing the potential of Universities. *Environment and Planning C: Government and Policy*. 1999;17(6):685–699. DOI: 10.1068/c170685
32. Elmuti D., Abebe M., Nicolosi M. An overview of strategic alliances between universities and corporations. *Journal of Workplace Learning*. 2005;17(1/2):115–129. DOI: 10.1108/13665620510574504
33. Arbo P., Benneworth P. Understanding the Regional Contribution of Higher Education Institutions: A Literature Review. *OECD Education Working Papers*. 2007, No. 9. OECD Publishing. DOI: 10.1787/161208155312. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/5205708>.
34. Perkmann M., Neely A., Walsh K. How should firms evaluate success in university-industry alliances? A performance measurement system. *R&D Management*. 2011;41(2):202–216. DOI: 10.1111/j.1467-9310.2011.00637.x
35. Parakhina V., Godina O., Boris O., Ushvitsky L. Strategic management in universities as a factor of their global competitiveness. *International Journal of Educational Management*. 2017;31:62–75. DOI: 10.1108/IJEM-03-2016-0053. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/312155468> (accessed 18.08.2024).
36. Drugova E.A. Alternative models of universities of the future: on the book “Alternative universities: speculative design for innovation in higher education” by David J. Staley (Baltimore, Usa: Johns Hopkins University Press, 2019). *University Management: Practice and Analysis*. 2020;24(2):167–175. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2020.02.022
37. Lider A.M., Slesarenko I.V., Solovyev M.A. Best practices of engineering training in world leading universities. *University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(1):18–34. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2021.01.002
38. Ovchinnikova N.E., Lazarenko D.G. The analysis of conceptual theoretical approaches to the problem of technology transfer in foreign universities. *University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(1):62–82. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2021.01.005
39. Akberdina V.V., Vasilenko E.V. The university as a participant of the regional innovation ecosystem: a typology of basic behavioral strategies. *University Management: Practice and Analysis*. 2022;26(2):9–26. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2022.02.009
40. Balobanov A.E., Klyuev A.K. [Strategic planning for university development]. *University Management: Practice and Analysis*. 2002;(2):19–27. (In Russ.)
41. Klyuev A.K., Korunov S.M. [Strategies of university development (based on the materials of the pilot seminar of the project “Strategic Planning in Russian Universities”)]. *University Management: Practice and Analysis*. 2003;(3):43–50. (In Russ.)

42. Grudzinskiy A.O. [Concept of a project-oriented university]. *University Management: Practice and Analysis*. 2003;(3):24–37. (In Russ.)
43. Kniazev E.A. About universities and their strategies. *University Management: Practice and Analysis*. 2005;(4):9–17. (In Russ.)
44. Veretennikova O.B., Drantusova N.V., Klyuev A.K. et al. [Developing the strategy of an educational institution: methodological recommendations]. *University Management: Practice and Analysis*. 2008;4(56):3–403. (In Russ.)
45. Titova N.L. (Sci. ed.). *Strategii razvitiya rossiyskikh vuzov: otvety na novye vyzovy* [Strategies for the Development of Russian Higher Education Institutions: Responses to New Challenges]. Moscow: MAKS Press; 2008. 668 p. (In Russ.)
46. Solodukhin K.S. *Strategicheskoe upravlenie vuzom kak steykholder-kompaniye* [Strategic management of higher education institution as a stakeholder-company]. St. Petersburg: Polytechnic University Publ.; 2009. 290 p. (In Russ.)
47. Belousova E.V., Gorshkova O.V., Solodukhin K.S. *Strategicheskoe planirovanie v universitete (opyt VGUES)* [Strategic planning at the university (experience of VSUES)]. Vladivostok: VSUES Publ.; 2006. 230 p. (In Russ.)
48. Lazarev G.I. About the choice of the innovative development vector of the Far East federal university. *University Management: Practice and Analysis*. 2010;1(65):17–22. (In Russ.)
49. Strongin R.G. et al. *Upravlenie vuzom v sovremennykh usloviyakh (opyt Nizhegorodskogo universiteta)* [Management of higher education institution in modern conditions (experience of Nizhny Novgorod University)]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University Publ.; 2010. 170 p. (In Russ.)
50. Lisichkina Yu.S., Ivannikova M.S. *Operatsionnyy menedzhment kak instrument povysheniya effektivnosti realizatsii proektov dvoynogo diploma v vuzakh Rossii: monografiya* [Operational management as a tool to improve the efficiency of dual degree projects in Russian universities: Monograph]. Moscow: Nauchnaya biblioteka; 2015. 163 p. (In Russ.)
51. Artemyev A.V., Elshin L.A. Development and justification of the use of the process model of university management in modern conditions. *Kazan economic vestnik*. 2020;2(46):87–97. (In Russ.)
52. Prokhorov A.V., Pyadysheva T.G. Modern directions of marketing in the field of educational services. *Tambov university review. Series: Humanities*. 2021;26(195):39–49. (In Russ.) DOI: 10.20310/1810-0201-2021-26-195-39-49
53. Matveev N.V., Lazareva E.I. Features of the university marketing system as a management object in modern conditions. *THEORIA: Pedagogy, Economics, Law*. 2022;3(2):27–36. (In Russ.) DOI: 10.51635/27129926\_2022\_2\_27
54. Mrdulyash P.B. The Practice of Development Planning in the Format of Strategic Sessions. *University Management: Practice and Analysis*. 2019;23(1-2):155–164. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2019.01-2.013
55. Ostrovkin D.L., Sandler D.G. Strategic management at the university: a modern view of Russian authors. *Almanac "Crimea"*. 2021;28:69–87. (In Russ.)
56. Vannikova E.N., Suvorova A.V., Nagaslaeva I.O. Problems of strategic management in university management. *Transbaikal state university journal*. 2021;27(8):95–100. (In Russ.) DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-95-100
57. Ostrovkin D.L., Sandler D.G. Creation of the university's strategic development program: development technology and key projects. *Leadership and Management*. 2022;9(2):581–602. (In Russ.) DOI: 10.18334/lim.9.2.114708
58. Tomilin O.B. Postponed Problems of University Management: A Strategic Dimension. *University Management: Practice and Analysis*. 2022;26(2):38–58. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2022.02.011
59. Vagner A.R., Voronin A.V. How will Relations between Universities and Stakeholders Develop? *University Management: Practice and Analysis*. 2022;26(3):4–9. (In Russ.)
60. Storgeckaja E.V. The development of Russian universities in the context of National High School institutional crisis. *University Management: Practice and Analysis*. 2014;6(94):42–48. (In Russ.)
61. Panasyuk V.P., Tret'yakova N.V. *Kachestvo obrazovaniya: innovatsionnye tendentsii i upravlenie: monografiya* [Quality of Education: Innovative Trends and Management: Monograph]. Ekaterinburg: Russian state professional pedagogic university; 2018. 201 p. (In Russ.) Available at: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0635-8>. ISBN 978-5-8050-0635-8.

62. Sukhanova E.A., Terent'ev E.A. (Eds.). *Universitetskaya natsional'naya initsiativa kachestva obrazovaniya: analiz situatsii v kontekste novykh zadach razvitiya sistemy. Analiticheskiy doklad* [University National Initiative of Education Quality: Analysis of the Situation in the Context of New Challenges of System Development. Analytical report]. Tomsk: Tomsk state university; 2023. 32 p. (In Russ.)

63. *Metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu novykh instrumentov upravleniya kachestvom obrazovaniya na osnove opyta vedushchikh rossiyskikh universitetov* [Methodological recommendations on the use of new tools for education quality management based on the experience of leading Russian universities]. (In Russ.) Available at: [https://high-edu-quality.ru/research\\_project](https://high-edu-quality.ru/research_project) (accessed 19.08.2024).

64. Galazhinsky E.V., Sukhanova E.A. How to Ensure the Quality of the University Education in the Era of Change. *University Management: Practice and Analysis*. 2023;27(1):6–11. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2023.01.001

65. Merkulova A.V. *Issledovanie i razrabotka korporativnoy informatsionnoy sistemy dlya upravleniya vuzom na osnove tekhnologii otkrytykh sistem: monografiya* [Research and development of corporate information system for university management based on open systems technology: Monograph]. Magnitogorsk: Magnitogorsk state university; 2008. 153 p. (In Russ.) ISBN 978-5-86781-600-1.

66. Loginovskiy O.V., Lyubitsyn V.N., Nesterov M.I. *Upravlenie sovremennym vuzom na baze razvitoy informatsionnoy sistemy: monografiya* [Management of modern higher education institution on the basis of developed information system: Monograph]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2013. 539 p. (In Russ.)

67. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monografiya* [Effective management of organizational and production structures: Monograph]. Moscow: INFRA-M; 2020. 456 p. (In Russ.)

68. Shishalova Yu.S. Development of the Institute of Higher Education in the Digital Economy: Business Model of the University of Tomorrow. *BENEFICIUM*. 2021;1(38):34–48. (In Russ.) DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2021.1(38).34-48

69. Gaag A.V., Butova O.V., Ryabova N.N. Problems of managing the university human capital at the educational environment digitalization context. *Professional education in the modern world*. 2021;11(4):47–53. (In Russ.) DOI: 10.20913/2618-7515-2021-4-6

70. Odintsova T.N., Timonina V.A. [Prospects of digital transformation of HEI management in the conditions of modern digital technologies]. In: *Sustainable economic development: international and national aspects: collection of articles of the V International scientific and practical conference*. Novopolotsk; 2022. P. 235–238. (In Russ.)

71. Sokolova I.A., Sokolov A.V., Kalinovskaya N.A. Competence-based approach to the management of human resources of a university in the conditions of digitalization of education. *Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Economics and Law*. 2022;(4):102–106. (In Russ.) DOI: 10.37882/2223-2974.2022.04.29

72. Timonina V.A., Timokhin D.K., Lisitskaya N.M. Features of educational organization strategic management in the context of digital transformation. *Actual problems of economics and management*. 2022;4(36):117–124. (In Russ.)

73. Reznik S.D., Chemezov I.S. *Menedzhery universiteta: teoriya, praktika i effektivnost' organizatsii lichnoy raboty* [University managers: theory, practice and effectiveness of personal work organization]. Moscow: INFRA-M; 2021. 306 p. (In Russ.)

74. Drugova E.A., Kalachikova O.N. Understanding the process of decision-making in universities in a VUCA-world. *University Management: Practice and Analysis*. 2019;23(1-2):81–92. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2019.01-2.006

75. Smirnov V.A. University integration into regional processes: possible strategies and key risk factors. *University Management: Practice and Analysis*. 2014;(6):57–68. (In Russ.)

76. Pelikhov N.V., Karataeva G.E., Groshev A.R., Bezuevskaya V.A., Karataev A.S., Kosenok S.M. University in the region, as it is now, and how it should be. *University Management: Practice and Analysis*. 2017;21(4):116–129. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2017.04.055

77. Sandler D.G., Sushchenko A.D., Kuznetsov P.D., Pechenkina T.E. Employment for university graduates and its measure the higher education quality. *University Management: Practice and Analysis*. 2018;22(3):73–85. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2018.03.028

78. Leshukov O.V. Model of Federal-Regional Relations in Governance of Higher Education in the Russian Federation. *Ekonomika regiona = Economy of region*. 2020;16(1):201–212. (In Russ.) DOI: 10.17059/2020-1-15
79. Panikarova S.V., Vlasov M.V., Draskovic V. Higher Education System as a Driver of the Country's Innovative Development. *University Management: Practice and Analysis*. 2020;24(1):96–105. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2020.01.007
80. Usmanov M.R., Shushkin M.A., Nazarov M.G., Krylov P.A. Barriers to Effective Interaction of Russian Universities and Companies. *University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(1):83–93. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2021.01.006
81. Blinova T.N., Fedotov A.V., Kovalenko A.A. The Structure of Personnel Training within Getting Higher Education Meets the Needs of Economy: Problems and Solutions. *University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(2):13–33. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2021.02.012
82. Firsova A.A., Preobrazhenskiy Yu.V. Universities' Training Programs Congruence to the Needs of the Regional Labour Market: Sectoral Analysis. *University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(2):34–48. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2021.02.013
83. Kosareva M. [Moving away from the Bologna system: what will the new higher education be like?]. (In Russ.) Available at: [https://rapsinews.ru/incident\\_publication/20230614/308997727.html](https://rapsinews.ru/incident_publication/20230614/308997727.html) (accessed 20.08.2024).
84. Tomskikh A.A. Territorial Management of a Regional University: Growth Management Factors. *Transbaikal state university journal*. 2023;29(2):101–111. (In Russ.) DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-101-111
85. Berezin A.S., Minaeva O.A., Medveditskova A. S., Yurova O.V. Development of university project ecosystem for the benefit of the region's key stakeholders. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2023;13(1):453–470. (In Russ.) DOI: 10.18334/vinec.13.1.117040
86. Drondin A.L. Current trends in quality management of higher education. *Yurist VUZa*. 2023;(5):11–17. (In Russ.)
87. Alexander Vagner: SUSU at the turn of the decade is moving into a new era of its development. *Rektor VUZa*. 2023;(7):10–11. (In Russ.)
88. Blinova T.N., Kovalenko A.A., Semionova E.A., Fedotov A.V., Shevtsov E.S. The Personnel of Russian Technological Sovereignty: Former Problems and Immediate Solutions. *University Management: Practice and Analysis*. 2022;26(4):37–55. (In Russ.) DOI: 10.15826/umpa.2022.04.029
89. Panychev A.Yu., Pokrovskaya O.D. The role of a modern University in the formation of technological sovereignty of the country. *Alma mater. Vestnik vysshei shkoly*. 2023;(4):11–19. (In Russ.) DOI: 10.20339/AM.04-23.011

### Список литературы

1. Cohen M.D., March J.G. Leadership and Ambiguity: The American College President. A General Report Prepared for the Carnegie Commission on Higher Education. McGraw-Hill, New York, NY, 1972.
2. Weick K.E. Educational organizations as loosely coupled systems // *Administrative Science Quarterly*. 1976. Vol. 21. P. 1–19.
3. Clark B.R. The Higher Education System: Academic Organization in Cross-National Perspective. University of California Press, Berkeley, CA, 1983.
4. Keller G. Academic Strategy: The Management Revolution in American Higher Education. JHU Press, 1983.
5. Chaffee E.E. The concept of strategy: from business to higher education // Smart J. (Ed.) Higher Education: Handbook of Theory and Research. Agathon Press, New York, NY, 1985. Vol. 1. P. 133–172.
6. Boldt D.B. University Strategic Management: A Businessman's View // *The International Journal of Educational Management*. 1991. Vol. 5, no. 5. DOI: 10.1108/09513549110135616
7. Bryson J.M. Strategic Planning for Public and Nonprofit Organizations. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 1995.
8. Peterson M.W., Dill D.D., Mets L.A. Using contextual planning to transform institutions // *II Planning and Management in a Changing Environment: A Handbook on Redesigning Postsecondary*

Institutions / M.W. Peterson, D.D. Dill, L.A. Mets and Associates (Eds.). Jossey-Bass, San Francisco, CA, 1997. P. 127–157.

9. Rowley D.J. Strategic Change in Colleges and Universities: Planning to Survive and Prosper. Jossey-Bass Higher and Adult Education Series, Jossey-Bass Inc., San Francisco, CA, 1997.

10. Clark B.R. Creating Entrepreneurial Universities: Organizational Pathways of Transformation. Pergamon Press, New York, NY, 1998.

11. Rhoades G. Who's doing it right Strategic activity in public research universities // The Review of Higher Education. 2000. Vol. 24, no. 1. P. 41–66.

12. Groves R.E.V., Pendlebury M.W., Stiles D.R. A critical appreciation of the uses for strategic management thinking, systems and techniques in British universities // Financial Accountability and Management, 1997. Vol. 13, no. 4. P. 293–312. DOI: 10.1111/1468-0408.00040

13. Thys-Clement F., Wilkin L. Strategic management and universities: outcomes of a European survey // Higher Education Management. 1998. Vol. 10. P. 13–28.

14. Bayenet B., Feola C., Tavemier M. Strategic management of universities evaluation policy and policy evaluation // Higher Education Management. 2000. Vol. 12, no. 2. p. 65–80.

15. Shattock M. Strategic management in European universities in an age of increasing institutional self-reliance. Tertiary Education and Management, 2000. Vol. 6, no. 2. P. 93–104.

16. Antoinetti J.-F., De Roten F.C., Leres J.-F. Experience of Swiss universities in public eyes // Higher Education in Europe. 2002. No. 3.

17. Dyson R.G. Strategic development and SWOT analysis at the university of Warwick // European Journal of Operational Research. 2004. Vol. 152, no. 3. P. 631–640. DOI: 10.1016/s0377-2217(03)00062-6

18. Morgan A. Higher Education Reform in the Balkans: the Bologna Process // International Higher Education. 2004. No. 34. DOI: 10.6017/ihe.2004.34.7400

19. Poole D. Moving towards professionalism: the strategic management of international education activities at Australian universities and their faculties of business // Higher Education. 2001. Vol. 42, no. 4. P. 395–435.

20. Chen Sh. The Features and Trends of University Development in Australia and China // Higher Education Policy. 2007. Vol. 20, no. 2. P. 207–216. DOI: 10.1057/palgrave.hep.8300147

21. В поисках эффективной модели казахстанского университета: моногр. / под ред. А.Б. Кожахметова. Алматы, 2021. 272 с.

22. Freeman R.E. Strategic Management: A Stakeholder Approach. Cambridge University Press; 2010. 276 p.

23. Shattock M. Managing Successful Universities. Maidenhead: McGraw-Hill Education: Open University Press, 2010. 225 p.

24. Hill C., Jones, G., Schilling M. Strategic Management: Theory: An Integrated Approach. Mason, OH: Cengage Learning, 2010.

25. Higher Education Strategy and Planning: A Professional Guide / T. Strike (Ed.). Abingdon: Routledge, 2018. 257 p.

26. Liu Wei. Higher education leadership development: an international comparative approach // International Journal of Leadership in Education. 2019. Vol. 24. P. 1–19. DOI: 10.1080/13603124.2019.1623920

27. Cinar R., Bennenworth P., Coenen L. Changing conceptualization of innovation in the European Union and its impact on universities: Critical junctures and evolving institutional demands // Research Evaluation. 2024. Vol. 33. P. rvad006. DOI: 10.1093/reseval/rvad006

28. Sułkowski Ł. Managing the digital university: paradigms, leadership, and organization. New York: Routledge, 2023. 286 p. DOI: 10.4324/9781003366409

29. Staley D.J. Alternative universities: speculative design for innovation in higher education. Baltimore, USA: Johns Hopkins University Press, 2019. 280 p. URL: <https://muse.jhu.edu/book/66169> (дата обращения: 18.08.2024).

30. Cyert R.M., Goodman P.S. Creating effective university-industry alliances: an organizational learning perspective // Organizational Dynamics. 1997. Vol. 25, no. 4. P. 45–57. DOI: 10.1016/S0090-2616(97)90036-X

31. Goddard J.B., Chatterton P. Regional Development Agencies and the knowledge economy: harnessing the potential of universities // Environment and Planning C: Government and Policy. 1999. Vol. 17, no. 6. P. 685–699. DOI: 10.1068/c170685

32. Elmuti D., Abebe M., Nicolosi M. An overview of strategic alliances between universities and corporations // *Journal of Workplace Learning*. 2005. Vol. 17, no. 1/2. P. 115–129. DOI: 10.1108/13665620510574504
33. Arbo P., Benneworth P. Understanding the Regional Contribution of Higher Education Institutions: A Literature Review // *OECD Education Working Papers*. 2007, No. 9. OECD Publishing. DOI: 10.1787/161208155312. URL: <https://www.researchgate.net/publication/5205708>
34. Perkmann M., Neely A., Walsh K. How should firms evaluate success in university-industry alliances? A performance measurement system // *R&D Management*. 2011. Vol. 41, no. 2. P. 202–216. DOI: 10.1111/j.1467-9310.2011.00637.x
35. Strategic management in universities as a factor of their global competitiveness / V. Parakhina, O. Godina, O. Boris, L. Ushvitsky // *International Journal of Educational Management*. 2017. Vol. 31. 62–75. DOI: 10.1108/IJEM-03-2016-0053. URL: <https://www.researchgate.net/publication/312155468> (дата обращения: 18.08.2024).
36. Другова Е.А. Альтернативные модели университетов будущего: о книге David J. Staley «Alternative universities: speculative design for innovation in higher education» (Baltimore, USA: Johns Hopkins University Press, 2019) // *Университетское управление: практика и анализ*. 2020. Т. 24, № 2. С. 167–175. DOI: 10.15826/umpra.2020.02.022
37. Лидер А.М., Слесаренко И.В., Соловьев М.А. Современный опыт инженерно-технической подготовки в ведущих зарубежных университетах // *Университетское управление: практика и анализ*. 2021. Т. 25, № 1. С. 18–34. DOI: 10.15826/umpra.2021.01.002
38. Овчинникова Н.Э., Лазаренко Д.Г. Анализ концептуальных теоретических подходов к проблеме организации трансфера технологий в зарубежных университетах // *Университетское управление: практика и анализ*. 2021. Т. 25, № 1. С. 62–82. DOI: 10.15826/umpra.2021.01.005
39. Акбердина В.В., Василенко Е.В. Университет как участник региональной инновационной экосистемы: типология базовых стратегий поведения // *Университетское управление: практика и анализ*. 2022. Т. 26, № 2. С. 9–26. DOI: 10.15826/umpra.2022.02.009
40. Балобанов А.Е., Ключев А.К. Стратегическое планирование развития университета // *Университетское управление: практика и анализ*. 2002. № 2. С. 19–27.
41. Ключев А.К., Корунов С.М. Стратегии вузовского развития (по материалам пилотного семинара проекта «Стратегическое планирование в российских университетах») // *Университетское управление: практика и анализ*. 2003. № 3. С. 43–50.
42. Грудзинский А.О. Концепция проектно-ориентированного университета // *Университетское управление: практика и анализ*. 2003. № 3. С. 24–37.
43. Князев Е.А. Об университетах и их стратегиях // *Университетское управление: практика и анализ*. 2005. № 4. С. 9–17.
44. Разработка стратегии образовательного учреждения: метод. рекомендации / О.Б. Веретенникова, Н.В. Дрантусова, А.К. Ключев [и др.] // *Университетское управление: практика и анализ*. 2008. № 4 (56). С. 3–403.
45. Стратегии развития российских вузов: ответы на новые вызовы / под науч. ред. Н.Л. Титовой. М.: МАКС Пресс, 2008. 668 с.
46. Солодухин К.С. Стратегическое управление вузом как стейкхолдер-компанией. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 290 с.
47. Белоусова Е.В., Горшкова О.В., Солодухин К.С. Стратегическое планирование в университете (опыт ВГУЭС) / под общ. ред. Г.И. Мальцевой. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2006. 230 с.
48. Лазарев Г.И. К вопросу о выборе вектора инновационного развития Дальневосточного федерального университета // *Университетское управление: практика и анализ*. 2010. № 1 (65). С. 17–22.
49. Управление вузом в современных условиях (опыт Нижегородского университета) / [Р.Г. Стронгин и др.]. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2010. 170 с.
50. Лисичкина Ю.С., Иванникова М.С. Операционный менеджмент как инструмент повышения эффективности реализации проектов двойного диплома в вузах России: моногр. М.: Научная библиотека, 2015. 163 с.
51. Артемьев А.В., Ельшин Л.А. Разработка и обоснование использования процессной модели управления университетом в современных условиях // *Казанский экономический вестник*. 2020. № 2 (46) С. 87–97.

52. Прохоров А.В., Пядышева Т.Г. Современные направления маркетинга в сфере образовательных услуг // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2021. Т. 26, № 195. С. 39–49. DOI: 10.20310/1810-0201-2021-26-195-39-49
53. Матвеев Н.В., Лазарева Е.И. Особенности маркетинговой системы вуза как объекта управления в современных условиях // THEORIA: педагогика, экономика, право. 2022. Т. 3, № 2. С. 27–36. DOI: 10.51635/27129926\_2022\_2\_27
54. Мрдуляш П.Б. Проектирование развития в формате стратегических сессий // Университетское управление: практика и анализ. 2019. Т. 23, № 1-2. С. 155–164. DOI: 10.15826/umpra.2019.01-2.013
55. Островкин Д.Л., Сандлер Д.Г. Стратегическое управление в вузе: современный взгляд российских авторов // Альманах «Крым». 2021. № 28. С. 69–87.
56. Ванникова Е.Н., Суворова А.В., Нагаслаева И.О. Стратегический менеджмент в управлении региональным университетом // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 8. С. 95–100. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-95-100
57. Островкин Д.Л., Сандлер Д.Г. Создание программы стратегического развития университета: технология разработки и ключевые проекты // Лидерство и менеджмент. 2022. Т. 9, № 2. С. 581–602. DOI: 10.18334/lm.9.2.114708
58. Томилин О.Б. Отложенные проблемы университетского менеджмента: стратегическое измерение // Университетское управление: практика и анализ. 2022. Т. 26, № 2. С. 38–58. DOI: 10.15826/umpra.2022.02.011
59. Вагнер А.Р., Воронин А.В. Как будут развиваться отношения университетов и стейкхолдеров? // Университетское управление: практика и анализ. 2022. Т. 26, № 3. С. 4–9.
60. Строгеецкая Е.В. Развитие российских университетов в условиях институционального кризиса национальной высшей школы // Университетское управление: практика и анализ. 2014. № 6 (94). С. 42–48.
61. Панасюк В.П., Третьякова Н.В. Качество образования: инновационные тенденции и управление [Электронный ресурс]: моногр. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. 201 с. URL: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0635-8>. ISBN 978-5-8050-0635-8.
62. Университетская национальная инициатива качества образования: анализ ситуации в контексте новых задач развития системы. Аналитический доклад / под ред. Е.А. Сухановой, Е.А. Терентьева. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2023. 32 с.
63. Методические рекомендации по использованию новых инструментов управления качеством образования на основе опыта ведущих российских университетов [Электронный ресурс]. URL: [https://high-edu-quality.ru/research\\_project](https://high-edu-quality.ru/research_project) (дата обращения: 19.08.2024).
64. Галажинский Э.В., Суханова Е.А. Как обеспечить качество университетского образования в эпоху перемен // Университетское управление: практика и анализ. 2023. Т. 27, № 1. С. 6–11. DOI: 10.15826/umpra.2023.01.001
65. Меркулова А.В. Исследование и разработка корпоративной информационной системы для управления вузом на основе технологии открытых систем: моногр. Магнитогорск: Магнитогорский гос. ун-т, 2008. 153 с. ISBN 978-5-86781-600-1.
66. Логиновский О.В., Любицын В.Н., Нестеров М.И. Управление современным вузом на базе развитой информационной системы: моногр. / под ред. А.Л. Шестакова. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. 539 с.
67. Логиновский О.В., Голлай А.В., Дранко О.И. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / под ред. О.В. Логиновского. М.: ИНФРА-М, 2020. 456 с.
68. Шишалова Ю.С. Развитие института высшего образования в цифровой экономике: бизнес-модель университета завтрашнего дня // BENEFICIUM. 2021. № 1 (38). С. 34–48. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2021.1(38).34-48
69. Гаг А.В., Бутова О.В., Рябова Н.Н. Проблемы управления человеческим капиталом вуза в условиях цифровизации образовательной среды // Профессиональное образование в современном мире. 2021. Т. 11, № 4. С. 47–53. DOI: 10.20913/2618-7515-2021-4-6
70. Одинцова Т.Н., Тимонина В.А. Перспективы цифровой трансформации управления вузом в условиях современных цифровых технологий // Устойчивое развитие экономики: международные и национальные аспекты: сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. Новополюк, 2022. С. 235–238.

71. Соколова И.А., Соколов А.В., Калиновская Н.А. Компетентностный подход к управлению человеческими ресурсами вуза в условиях цифровизации образования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2022. № 4. С. 102–106. DOI: 10.37882/2223-2974.2022.04.29
72. Тимонина В.А., Тимохин Д.К., Лисицкая Н.М. Особенности стратегического управления образовательной организацией в контексте цифровой трансформации // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. 2022. № 4 (36). С. 117–124.
73. Резник С.Д., Чемезов И.С. Менеджеры университета: теория, практика и эффективность организации личной работы. М.: ИНФРА-М, 2021. 306 с.
74. Другова Е.А., Калачикова О.Н. Специфика принятия управленческих решений в университетах в условиях VUCA-мира // Университетское управление: практика и анализ. 2019. Т. 23, № 1-2. С. 81–92. DOI: 10.15826/umpra.2019.01-2.006
75. Смирнов В.А. Интеграция университета в региональные процессы: возможные стратегии и ключевые факторы риска // Университетское управление: практика и анализ. 2014. № 6 (94). С. 57–68.
76. Университет в регионе: как есть и как надо / Н.В. Пелихов, Г.Е. Каратаева, А.Р. Грошев и др. // Университетское управление: практика и анализ. 2017. Т. 21, № 4. С. 116–129. DOI: 10.15826/umpra.2017.04.055
77. Трудоустройство выпускников и его связь с качеством высшего образования / Д.Г. Сандлер, А.Д. Сущенко, П.Д. Кузнецов, Т.Е. Печенкина // Университетское управление: практика и анализ. 2018. Т. 22, № 3. С. 73–85. DOI: 10.15826/umpra.2018.03.028
78. Лешуков О.В. Модель федерально-региональных отношений в управлении высшим образованием в РФ // Экономика региона. 2020. Т. 16, № 1. С. 201–212. DOI: 10.17059/2020-1-15
79. Паникарова С.В., Власов М.В., Драшкович В. Система высшего образования как драйвер инновационного развития страны // Университетское управление: практика и анализ. 2020. Т. 24, № 1. С. 96–105. DOI: 10.15826/umpra.2020.01.007
80. Барьеры, препятствующие эффективному взаимодействию российских университетов и бизнес-компаний / М.Р. Усманов, М.А. Шушкин, М.Г. Назаров, П.А. Крылов // Университетское управление: практика и анализ. 2021. Т. 25, № 1. С. 83–93. DOI: 10.15826/umpra.2021.01.006
81. Блинова Т.Н., Федотов А.В., Коваленко А.А. Соответствие структуры подготовки кадров с высшим образованием потребностям экономики: проблемы и решения // Университетское управление: практика и анализ. 2021. Т. 25, № 2. С. 13–33. DOI: 10.15826/umpra.2021.02.012
82. Фирсова А.А., Преображенский Ю.В. Конгруэнтность направлений подготовки студентов университетов потребностям регионального рынка труда: секторальный анализ // Университетское управление: практика и анализ. 2021. Т. 25, № 2. С. 34–48. DOI: 10.15826/umpra.2021.02.013
83. Косарева М. Уход от Болонской системы: какой будет новая высшая школа [Электронный ресурс]. URL: [https://rapsinews.ru/incident\\_publication/20230614/308997727.html](https://rapsinews.ru/incident_publication/20230614/308997727.html) (дата обращения: 20.08.2024).
84. Томских А.А. Территориальное управление региональным университетом: факторы управления роста // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 2. С. 101–111. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-101-111
85. Развитие экосистемы проектной деятельности университета в интересах ключевых стейкхолдеров региона / А.С. Березин, О.А. Минаева, А.С. Медведицкова, О.В. Юрова // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13, № 1. С. 453–470. DOI: 10.18334/vines.13.1.117040
86. Дрондин А.Л. Актуальные тенденции управления качеством высшего образования. Юрист ВУЗа. 2023. № 5. С. 11–17.
87. Александр Вагнер: ЮУрГУ на рубеже десятилетий переходит в новую эпоху своего развития // Ректор ВУЗа. 2023. № 7. С. 10–11.
88. Кадры технологического суверенитета России – прежние проблемы и назревшие решения / Т.Н. Блинова, А.А. Коваленко, Е.А. Семионова и др. // Университетское управление: практика и анализ. 2022. Т. 26, № 4. С. 37–55. DOI: 10.15826/umpra.2022.04.029
89. Панычев А.Ю., Покровская О.Д. Роль современного вуза в формировании технологического суверенитета страны // Alma mater. Вестник высшей школы. 2023. № 4. С. 11–19. DOI: 10.20339/AM.04-23.011

*Information about the author*

**Oleg V. Loginovskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

*Информация об авторе*

**Логиновский Олег Витальевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

The author declares no conflict of interests.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*The article was submitted 21.08.2024*

*Статья поступила в редакцию 21.08.2024*

## Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение

УДК 65.011

DOI: 10.14529/ctcr250108

### АНАЛИЗ ПОДХОДОВ, МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, ВЫПУСКАЮЩИХ И ИСПОЛЬЗУЮЩИХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЛИСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Л.Ю. Костылева, kostylevali@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2451-3042>*

*О.В. Логиновский, loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>*

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

**Аннотация.** Вопросы повышения эффективности работы промышленных предприятий и организаций в последние годы приобретают все более важное значение. Необходимость решения подобной задачи становится актуальной как для промышленных предприятий и организаций в целом, так и для предприятий, связанных с выпуском продукции и эксплуатацией технологического оборудования из биметаллических листовых материалов. **Цель исследования.** Учитывая большое количество исследований и разработок, направленных на повышение эффективности функционирования промышленных предприятий, авторы данной статьи стремятся представить наиболее значимые и успешные исследования, посвященные решению этих задач. **Материалы и методы.** Анализ управленческих подходов, средств, технологий и механизмов улучшения работы промышленных предприятий, осуществляющих производство изделий и эксплуатацию конструкций из биметаллических листовых материалов, базируется на значительном объеме научных материалов, представленных в научно-технической литературе. **Результаты.** Представлен набор наиболее существенных мер по совершенствованию работы промышленных предприятий и организаций и сделан акцент на тех предложениях, которые позволят добиться наиболее существенных результатов для предприятий, производящих и использующих биметаллические листовые материалы. **Заключение.** В статье показано, что повышение эффективности функционирования промышленных предприятий, деятельность которых в той или иной степени связана с производством или использованием изделий и конструкций из многослойных биметаллических материалов, должно осуществляться на основе актуальных подходов, средств и механизмов, включая создание методов и алгоритмов подготовки и принятия решений руководителями предприятий по основному направлению их деятельности, разработку современных информационных систем управления, а также развитие новых, перспективных технологий оценки качества продукции.

**Ключевые слова:** управление промышленными предприятиями, повышение эффективности, механизмы управления, умное управление, технологическое развитие, биметаллы, неразрушающий контроль

**Для цитирования:** Костылева Л.Ю., Логиновский О.В. Анализ подходов, методов и технологий повышения эффективности функционирования промышленных предприятий, выпускающих и использующих биметаллические листовые материалы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 99–107. DOI: 10.14529/ctcr250108

## ANALYZING APPROACHES, METHODS, AND TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES PRODUCING AND USING BIMETAL SHEET MATERIALS

**L.Yu. Kostyleva**, [kostylevali@susu.ru](mailto:kostylevali@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0008-2451-3042>  
**O.V. Loginovskiy**, [loginovskiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiov@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The problems of increasing the efficiency of work of industrial enterprises and organisations have become more and more important in recent years. The necessity of solving such a problem becomes real both for industrial enterprises and organisations as a whole, and for enterprises connected with production and operation of technological equipment made of bimetallic sheet materials. **Aim.** Taking into account a large number of researches and developments aimed at increasing the efficiency of functioning of industrial enterprises, the authors of this article aim to present the most significant and successful studies devoted to solving these problems. **Materials and methods.** The analysis of management approaches, means, technologies and mechanisms for improving the efficiency of industrial enterprises engaged in the production of products and operation of structures from bimetallic sheet materials is based on a significant amount of scientific materials presented in scientific and technical literature. **Results.** A set of the most significant measures for improving the work of industrial enterprises and organisations is presented, and emphasis is placed on those proposals that will achieve the most significant results for enterprises producing and using bimetallic sheet materials. **Conclusion.** The article shows that the increase of efficiency of industrial enterprises functioning, which activity is connected with the production or use of products and constructions from multilayer bimetallic materials, should be carried out on the basis of actual approaches, means and mechanisms, including the creation of methods and algorithms of preparation and decision-making by managers of enterprises in the main direction of their activities, the development of modern information management systems, as well as the development of new, promising solutions for the development of new technologies and technologies in the field of bimetallic materials.

**Keywords:** industrial enterprise management, efficiency improvement, control mechanisms, smart management, technology development, bimetal, non-destructive testing

**For citation:** Kostyleva L.Yu., Loginovskiy O.V. Analyzing approaches, methods, and technologies for improving the efficiency of industrial enterprises producing and using bimetal sheet materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2025;25(1):99–107. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250108

### Введение

Поиск идей, средств и методов повышения эффективности функционирования промышленных предприятий и организаций осуществляется уже в течение многих десятилетий. Руководители предприятий и организаций, а также ученые и специалисты, разрабатывающие подобные исследования, на сегодняшний день имеют в своем активе множество научных работ и методических разработок на эту тему.

Разумеется, что в рамках отдельной статьи невозможно упомянуть даже значительной части авторов этих исследований. Однако наиболее значимыми работами в этой области, безусловно, являются труды знаменитого Анри Файоля [1] и его современников, Норберта Винера [2], Стаффорда Бира [3], а также более поздних, но тоже весьма известных авторов – Р. Акоффа [4], Г. Минцберга [5], Д. Аакера [6], Дж. Шелдрейка [7], Р. Коха [8], В.Н. Буркова [9–11], Д.А. Новикова [9–12]. Авторами данной статьи также подготовлен ряд публикаций, связанных с этой проблематикой [13–17].

### Анализ актуальных методов, подходов и моделей совершенствования управления промышленными предприятиями

Рассматривая конгломерат научных трудов, посвященных вопросам совершенствования концептуальных подходов, методов, моделей и технологий управления промышленными предприя-

тиями, можно констатировать, что на сегодняшний день наиболее используемыми и эффективными средствами из них остаются следующие [17]:

- стратегические методы формирования приоритетов в определенные периоды времени;
- методы всестороннего анализа динамики показателей работы промышленных предприятий в сравнении с предприятиями-конкурентами по соответствующим сферам материального производства;
- методы и модели повышения адаптации промышленного предприятия к постоянно меняющимся условиям хозяйствования;
- методы совершенствования производственной логистики с ориентацией последней на возрастающую динамику рынков готовой продукции;
- методы и технологии оценки внешних, по отношению к предприятию факторов, оказывающих на компанию, возможно, даже большее воздействие, чем изменение факторов внутри предприятия;
- методы формирования современной структуры компании с ее ориентацией на повышение гибкости управления персоналом, обеспечение различного рода ресурсами, эффективного маркетинга исследований и др.;
- методы и технологии создания информационно-вычислительной структуры компании, ориентированные предпочтительно на собственные информационно-вычислительные системы управления, системы стратегического управления, а также оперативного управления и контроля в составе специального программного обеспечения по подготовке и принятию управленческих решений собственниками и руководителями промышленных предприятий;
- методы и модели управления проектами с позиций различных стейкхолдеров [18];
- методы и механизмы сбалансированного технологического развития промышленного предприятия [19].

К перечисленным подходам необходимо добавить также методы и механизмы умного управления [10,17], которые способны кардинально изменить отношение работников к своей деятельности. В первую очередь, благодаря внедрению принципов умного управления сотрудники начинают бережно расходовать ресурсы, что означает не только экономию материалов, но и более осознанное использование времени и усилий, и в конечном итоге приводит к повышению общей продуктивности.

Кроме того, механизмы умного управления способствуют эффективному использованию оборудования. С помощью современных технологий можно проводить мониторинг состояния оборудования в реальном времени. Это позволяет не только избежать простоев, но и своевременно проводить профилактическое обслуживание, что значительно увеличивает срок службы машин и механизмов.

Также стоит отметить, что внедрение методов умного управления формирует у работников стремление применять более эффективные средства производства. В условиях постоянного технологического прогресса, компании, использующие такие подходы, получают доступ к передовым технологиям и инновациям, что, в свою очередь, способствует повышению конкурентоспособности на рынке.

Помимо этого, важным аспектом является внедрение методов и технологий анализа и обработки информации с применением современной информационно-компьютерной техники. Такие технологии позволяют быстро и точно обрабатывать большие объемы данных, что способствует более обоснованному принятию управленческих решений. Это ведет к улучшению планирования и прогнозирования, а также к повышению общей эффективности бизнеса.

Механизмы умного управления можно условно разделить на несколько ключевых групп, каждая из которых имеет свои особенности и предназначение.

К первой группе отнесем неманипулируемые механизмы, или «механизмы честной игры», обеспечивающие отсутствие искажений информации, правдивое отражение работниками результатов своей деятельности. Работники должны иметь выгодные условия для того, чтобы сообщать честные данные о своих потребностях в ресурсах, а также о реальных задачах и достижениях. Ключевое требование к таким механизмам заключается в том, что решения, принимаемые на основе честной информации, не должны негативно сказываться на самих работниках, её сообщаящих.

Во вторую группу объединим советующие механизмы, обеспечивающие выработку рекомендаций для лиц, принимающих решения (ЛПР). Для советующих механизмов существует несколько способов реализации, в том числе через группы экспертов либо автоматизированные экспертные системы. Советующие механизмы пассивного типа предоставляют релевантную информацию, необходимую ЛПР для принятия решения, но при этом не несут ответственности за эффективность своих рекомендаций. Активные советчики, в свою очередь, сравнивают эффективность своих советов с фактическими решениями ЛПР, что позволяет создать систему стимулирования, основанную на результатах.

Следующая группа включает согласованные механизмы, способствующие воспитанию ответственности у исполнителей. При их использовании работникам становится выгодно выполнять принятые обязательства и честно отражать результаты своего труда. Невыполнение плана или искажение информации в данном случае приносит исполнителям меньшую прибыль.

Наконец, развивающие механизмы играют важную роль в стимулировании роста и развития предприятий за счет снижения издержек и внедрения инноваций. Они позволяют организациям адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и повышать свою конкурентоспособность. Для успешной реализации развивающих механизмов необходимо учитывать как внутренние факторы, так и внешнюю среду, что требует комплексного подхода к управлению.

Таким образом, каждая из описанных групп механизмов умного управления имеет свои уникальные особенности и функции. Они обеспечивают эффективное управление ресурсами, способствуют честности и ответственности на всех уровнях, а также стимулируют развитие организаций, что является важным для достижения высоких результатов в условиях современного бизнеса.

#### **Анализ средств и методов совершенствования управления предприятиями, выпускающими продукцию и использующими технологическое оборудование из биметаллических листовых материалов**

Глубокий и всесторонний анализ существующих проблем и «узких» мест, которые негативно сказываются на эффективности деятельности компании, является первоочередной задачей руководителей промышленного предприятия. Этот процесс включает в себя не только выявление недостатков, но и понимание их причин, что требует тщательной работы – необходимо проанализировать состав и особенности управления основными факторами производства, которые являются основой функционирования предприятия.

Кроме того, следует обратить внимание на структуру управления, методы и технологии, применяемые в организации, – изучить и оценить организационную структуру, системы контроля, а также подходы к управлению, которые могут варьироваться от традиционных до современных. Полученные в результате такого комплексного анализа результаты дают руководителю возможность увидеть не только отдельные проблемы, но и их взаимосвязь для понимания общей картины функционирования компании.

В результате проведенных работ руководство получает возможность сделать обоснованные выводы о целесообразности различных изменений (структурных, технологических, экономических, организационно-управленческих и др.). На основе полученных данных формируется четкое видение будущего предприятия для разработки концепции стратегического развития, которая должна учитывать как внутренние, так и внешние факторы – изменения в экономике, технологическое развитие и тенденции в управлении. Таким образом, качественный анализ существующих проблем становится неотъемлемой частью процесса стратегического планирования и развития предприятия в целом [19].

Однако для предприятий, связанных с производством и использованием листовых биметаллических материалов, помимо перечисленных средств и методов повышения эффективности крайне важно рассмотреть вопросы совершенствования технологий оценки качества продукции и работоспособности технологического оборудования [20, 21].

Биметаллические материалы требуют строгого контроля на каждом этапе производственного процесса, поскольку качество соединения и обработки металлов существенно влияет на их механические и физико-химические свойства [22–24].

Совершенствование технологий оценки качества включает в себя разработку и внедрение комплексных систем контроля, которые учитывают не только физико-механические свойства

биметаллических листов, но и их эксплуатационные характеристики. Основой подобных систем является применение неразрушающих методов контроля, позволяющих выявлять скрытые дефекты на ранних стадиях производства [25, 26], а также использование актуальных цифровых технологий при проведении вычислительных экспериментов для исследования поведения цифровых двойников объектов контроля с применением современных программных продуктов, в том числе с открытым исходным кодом [27–29].

Кроме того, необходимо уделить внимание систематическому анализу работоспособности технологического оборудования. Регулярные проверки и техническое обслуживание станков и машин обеспечивают стабильность производственного процесса, а также позволяют отслеживать состояние оборудования в реальном времени, что существенно снижает риск поломок и аварий [30, 31].

Обоснование целесообразности внедрения системы контроля качества, базирующейся на современных технологиях, должно быть основано на применении комплексных методов многокритериального выбора среди альтернативных вариантов, которые описываются большим числом количественных и качественных характеристик различной степени значимости [20, 32].

Не менее важным аспектом является создание обратной связи между производственными процессами и отделом качества на основе интеграции системы выявления дефектов продукции с комплексной информационной системой предприятия. Это позволит оперативно реагировать на выявленные проблемы и вносить изменения в технологические процессы, что, в свою очередь, способствует улучшению качества конечной продукции. Оптимизация процессов и внедрение новых технологий помогут значительно снизить производственные затраты, а также увеличить конкурентоспособность компании на рынке [33, 34].

Дальнейшее совершенствование информационных систем для поддержки процессов оценки качества биметаллических листовых материалов с использованием тепловых методов неразрушающего контроля возможно за счет использования методов искусственного интеллекта для классификации дефектов по изображениям термограмм в реальном времени. Автоматизация процессов контроля качества путем внедрения систем машинного зрения и анализа данных на основе искусственного интеллекта может значительно ускорить процесс обнаружения дефектов и снизить влияние человеческого фактора [35, 36]. Такие системы могут обучаться на больших объемах данных, что позволяет им с высокой точностью прогнозировать возможные проблемы и предлагать пути их решения.

### Заключение

Обоснованное внедрение инновационных методов контроля, основанных на использовании современных цифровых технологий, играет значительную роль в повышении эффективности и качества промышленных процессов. Для повышения эффективности функционирования предприятий, работающих с биметаллическими материалами, необходимо применять актуальные подходы, средства и механизмы, включая создание методов и алгоритмов подготовки и принятия решений руководителями предприятий по основному направлению их деятельности, разработку современных информационных систем управления, а также развитие новых, перспективных технологий оценки качества продукции. При этом важно не только внедрять современные методы контроля и диагностики, но и постоянно совершенствовать технологии выявления возможных дефектов, обеспечивая тем самым высокое качество продукции и надежность эксплуатируемого оборудования.

### Список литературы

1. Файоль А. Общее и промышленное управление: пер. с фр. М.: Центральный институт труда, 1923. 122 с.
2. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине: пер. с англ. М.: Наука, 1983. 344 с.
3. Бир С. Кибернетика и управление производством: пер. с англ. М.: Физматгиз, 1963. 210 с.
4. Акофф Р.Л. Планирование будущего корпорации: пер. с англ. М.: Сирин, 2002. 256 с.
5. Минцберг Г., Альстрэнд Б., Лэмпел Дж. Школы стратегий. Стратегическое сафари: экскурсия по дебрям стратегий менеджмента: пер. с англ. СПб.: Питер, 2002. 336 с.

6. Аакер Д. Стратегическое рыночное управление: пер. с англ. СПб.: Питер, 2002. 544 с.
7. Шелдрейк Дж. Теория менеджмента: от тейлоризма до японизации: пер. с англ. СПб.: Питер, 2001. 352 с.
8. Кох Р. Стратегия: Как создавать и использовать эффективную стратегию: пер. с англ. СПб.: Питер, 2003. 320 с.
9. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами: учеб. М.: Кн. дом «Либроком», 2009. 264 с.
10. Механизмы управления. Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко и др. М.: Ленанд, 2013. 216 с.
11. Теория управления (дополнительные главы) / под ред. Д.А. Новикова. М.: Ленанд, 2019. 552 с.
12. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Ленанд, 2022. 500 с.
13. Логиновский О.В. Управление и стратегии. Оренбург: Изд-во Оренбург. гос. ун-та; Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. 704 с.
14. Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление промышленным предприятием: науч. изд. М.: Машиностроение, 2006. Т. 1. 603 с.
15. Логиновский О.В., Максимов А.А. Корпоративное управление: науч. изд. М.: Машиностроение, 2007. Т. 2. 624 с.
16. Методы и модели исследования теплового состояния многослойных материалов: учеб. пособие / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, Л.Ю. Костылева, И.М. Ячиков. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2023. 166 с.
17. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
18. Гельруд Я.Д., Логиновский О.В. Управление проектами: методы, модели, системы: моногр. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2015. 330 с.
19. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. DOI: 10.12737/1087996
20. Костылева Л.Ю. Применение комплексного подхода к обоснованию выбора системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового контроля // Системы управления и информационные технологии. 2024. № 3 (97). С. 38–43.
21. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля [Электронный ресурс] / Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин, А.А. Самодуров и др. М.: Техносфера, 2019. 214 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/99112.html> (дата обращения: 01.10.2024).
22. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев и др. М.: Интернет Инжиниринг, 2002. 496 с.
23. Быков А.А. Развитие производства биметаллов // Металлург. 2009. № 9. С. 61–64.
24. Тепловой метод диагностики расслоений в биметаллах / А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышов, А.В. Колмаков, Ю.В. Плужников // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2003. Т. 9, № 2. С. 177–185.
25. Неразрушающий контроль и диагностика: справ. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
26. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учеб. М.: Машиностроение, 2019. 576 с.
27. Ковтун В.А., Короткевич С.Г. Обзор современных прикладных программных комплексов для проведения исследований композитных изделий // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 1 (65). С. 258–266.
28. Есьман Р.И., Шевцов В.Ф. Компьютерное моделирование тепловых процессов в многослойных композиционных структурах // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2006. № 5. С. 62–67.
29. Аралов М.Н., Барабанов В.Ф. Математические и программные средства моделирования теплового поля твердого тела слоистой структуры // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 2 (60). С. 4–8.
30. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 544 с.

31. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34–57.
32. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: Макс-Пресс, 2008. 196 с.
33. Thermal tomography characterization and pulse-phase thermography of impact damage in CFRP, or why end users are still reluctant about practical use of transient IR thermography / V.P. Vavilov, S. Marinetti, E.G. Grinzato, P.G. Bison // *Thermosense XX*. SPIE, 1998. Vol. 3361. P. 275–281. DOI: 10.1117/12.304737
34. Vavilov V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8
35. Automated defect classification in infrared thermography based on a neural network / Yu. Duan, Sh. Liu, C. Hu, et al. // *NDT & E International*. 2019. Vol. 107. P. 102147. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102147
36. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography / A.O. Chulkov, V.P. Vavilov, B.I. Shagdyrov et al. // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 20. DOI: 10.1007/s10921-023-00929-x

### References

1. Fayol H. *Obshchee i promyshlennoe upravlenie* [General and industrial management]. Transl. from French. Moscow: Central Labour Institute Publ.; 1923. 122 p. (In Russ.)
2. Wiener N. *Kibernetika, ili Upravlenie i svyaz' v zhitovnom i mashine* [Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine]. Transl. from Engl. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 344 p. (In Russ.)
3. Beer S. *Kibernetika i upravlenie proizvodstvom* [Cybernetics and Management]. Transl. from Engl. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1963. 210 p. (In Russ.)
4. Ackoff R.L. *Planirovanie budushchego korporatsii* [Creating the Corporate Future]. Transl. from Engl. Moscow: Sirin Publ.; 2002. 256 p. (In Russ.)
5. Mintzberg H., Ahlstrand B., Lampel J. *Shkoly strategiy. Strategicheskoe safari: ekskursiya po debryam strategiy menedzhmenta* [Strategy Safari: A Guided Tour Through The Wilds of Strategic Management]. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter Publ.; 2002. 336 p. (In Russ.)
6. Aaker D. *Strategicheskoe rynochnoe upravlenie* [Strategic Market Management]. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter Publ.; 2002. 544 p. (In Russ.)
7. Sheldrake J. *Teoriya menedzhmenta: ot teylorizma do yaponizatsii* [Management Theory: From Taylorism to Japanization]. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter Publ.; 2001. 352 p. (In Russ.)
8. Koch R. *Strategiya: Kak sozdavat' i ispol'zovat' effektivnyuyu strategiyu* [Strategy: How to Create, Pursue and Deliver a Winning Strategy]. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter Publ.; 2003. 320 p. (In Russ.)
9. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A. *Vvedenie v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami: ucheb.* [Introduction to the organisational systems management theory. Textbook]. Moscow: Librokom Book house; 2009. 264 p. (In Russ.)
10. Burkov V.N., Burkova I.V., Gubko M.V. et al. *Mekhanizmy upravleniya. Upravlenie organizatsiy: planirovanie, organizatsiya, stimulirovanie, kontrol'* [Control Mechanisms. Organisation Management: Planning, Organisation, Stimulation, Control]. Moscow: Lenand Publ.; 2013. 216 p. (In Russ.)
11. Novikov D.A. (Ed.). *Teoriya upravleniya (dopolnitel'nye glavy)* [Control theory (additional chapters)]. Moscow: Lenand Publ.; 2019. 552 p. (In Russ.)
12. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Organisational systems management theory]. Moscow: Lenand Publ.; 2022. 500 p. (In Russ.)
13. Loginovskiy O.V. *Upravleniye i strategii* [Management and Strategies]. Orenburg: Orenburg St. Univ. Publ., Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2001. 704 p. (In Russ.)
14. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie promyshlennym predpriyatiem: nauch. izd.* [Management at an Industrial Enterprise. Sci. Publ.]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2006. Vol. 1. 603 p. (In Russ.)
15. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Korporativnoye upravleniye: nauch. izd.* [Corporate Management: Sci. Publ.]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2007. Vol. 2. 624 p. (In Russ.)

16. Loginovskiy O.V., Holloy A.V., Kostyleva L.Yu., Yachikov I.M. *Metody i modeli issledovaniya teplovogo sostoyaniya mnogosloynnykh materialov: ucheb. posobie* [Methods and models for research of multilayer materials thermal state. Study guide]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2023. 166 p. (In Russ.)
17. Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monogr.* [Industrial Enterprise Management: Strategies, Mechanisms, Systems. Monograph]. Moscow: Infra-M Publ.; 2018. 410 p. (In Russ.)
18. Gel'rud Ya.D., Loginovskiy O.V. *Upravlenie proektami: metody, modeli, sistemy: monogr.* [Project Management: Methods, Models, Systems. Monograph]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2015. 330 p. (In Russ.)
19. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph.* Moscow: Infra-M Publ.; 2020. 456 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
20. Kostyleva L.Yu. [Application of an integrated approach to justify the choice of a system for detecting defects in multilayer bimetallic materials by means of thermal testing methods]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii.* 2024;3(97):38–43. (In Russ.)
21. Golovin D.Yu., Tyurin A.I., Samodurov A.A. et al. *Dinamicheskie termograficheskie metody nerazrushayushhego ekspress-kontrolya* [Dynamic thermographic methods of nondestructive express testing]. Moscow: Technosfera Publ.; 2019. 214 p. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/99112.html> (accessed 01.10.2024). (In Russ.)
22. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshev V.N. et al. *Proizvodstvo metallicheskih sloistyh kompozicionnykh materialov* [Production of metal laminated composite materials]. Moscow: Internet Inzhiniring Publ., 2002. 496 p. (In Russ.)
23. Bykov A.A. [Development of bimetals production]. *Metallurg.* 2009;(9):61–64. (In Russ.)
24. Pudovkin A.P., Chernyshov V.N., Kolmakov A.V., Pluzhnikov Yu.V. Heat Method of Bimetal Separation Diagnostics. *Transactions of the Tambov state technical university,* 2003;9(2):177–185. (In Russ.)
25. Klyuev V.V. (Ed.). *Nerazrushayushhij kontrol' i diagnostika: spravochnik* [Nondestructive Testing and Diagnostics. Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2005. 656 p. (In Russ.)
26. Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarynykh soedineniy: ucheb.* [Physical methods of nondestructive testing of welded joints. Textbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2019. 576 p. (In Russ.)
27. Kovtyn V.A., Korotkevich S.G. Review of current application programs for research composite products. *Technosphere safety technologies.* 2016;1(65):258–266. (In Russ.)
28. Yesman R.I., Shevtsov V.F. Computer Simulation of Heating Processes in Multi-Layer Composite Structures. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations.* 2006;(5):62–67. (In Russ.)
29. Aralov M.N., Barabanov V.F. [Mathematical and software tools for modelling the thermal field of a solid body of a layered structure]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii.* 2015;2(60):4–8. (In Russ.)
30. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* [Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing]. Moscow: Spektr Publ.; 2009. 544 p. (In Russ.)
31. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2017;53(10):707–730. DOI: 10.1134/S1061830917100072
32. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Mnogokriterial'nye zadachi prinjatija reshenij* [Multicriteria decision-making problems]. Moscow: Max-Press; 2008. 196 p. (In Russ.)
33. Vavilov V.P., Marinetti S., Grinzato E.G., Bison P.G. Thermal tomography characterization and pulse-phase thermography of impact damage in CFRP, or why end users are still reluctant about practical use of transient IR thermography. *Thermosense XX. SPIE,* 1998. Vol. 3361. P. 275–281. DOI: 10.1117/12.304737
34. Vavilov V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing.* Springer Nature Switzerland AG; 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8
35. Duan Yu., Liu Sh., Hu C., et al. Automated defect classification in infrared thermography based on a neural network. *NDT & E International.* 2019;107:102147. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102147

36. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Shagdyrov B.I. et al. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2023;42(1):20. DOI: 10.1007/s10921-023-00929-x

***Информация об авторах***

**Костылева Лилия Юрьевна**, старший преподаватель кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kostylevali@susu.ru.

**Логиновский Олег Витальевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiov@susu.ru.

***Information about the authors***

**Liliya Yu. Kostyleva**, Senior Lecturer of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kostylevali@susu.ru.

**Oleg V. Loginovskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiov@susu.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

***Статья поступила в редакцию 04.11.2024***

***The article was submitted 04.11.2024***

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

Я.Д. Гельруд<sup>1</sup>, [gelrud@mail.ru](mailto:gelrud@mail.ru)

Ц. Цуй<sup>2</sup>, [172982663@qq.com](mailto:172982663@qq.com)

В.В. Захаров<sup>1</sup>, [metkol@yandex.ru](mailto:metkol@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

В.Г. Разумов<sup>1</sup>, [wisewolf7778@gmail.com](mailto:wisewolf7778@gmail.com)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Центр привлечения проектов и инвестиций Китайской (Хэйлунцзянской) экспериментальной зоны свободной торговли, Хэйхэ, Китай

**Аннотация. Цель исследования.** Целью статьи является анализ роли инновационных инвестиций в качественное развитие регионов. При этом должны быть раскрыты проблемы комплексного влияния экологических, социальных, экономических и научно-технических факторов на региональные инновационные проекты, исследованы связанные с этими факторами прямые и косвенные затраты на проектное управление. Предметом являются управленческие отношения, которые возникают при инновационном проектировании в системе управления регионом. **Материалы и методы.** Методологической основой работы является использование системного анализа, методов статистического анализа, математического моделирования. В статье раскрывается содержание эффекта регионального инновационного проекта. Рассмотрена традиционная модель оценки регионального инновационного проекта, выделены минусы модели. Также в работе раскрыт стандарт UNIDO. При этом отмечено, что для осуществления оценки эффективности регионального инновационного проекта необходимо проанализировать роль и состояние субъекта, экономическое состояние региона и непосредственно социальные и экологические последствия, которые предполагаются при внедрении проекта. Также рассмотрена оценка капиталобразующих инвестиционных проектов. **Результаты.** Результатом работы является экономико-математическая модель оценки и выбора регионального инновационного проекта с учетом экономических, социальных и экологических факторов. Для решения данной многокритериальной задачи с противоречивыми критериями рассмотрены различные методы и алгоритмы многокритериальной оптимизации, включая метод свертки критериев, получение одной, иногда довольно сложной формулы, методы получения решения, оптимального по Парето, метод иерархий Саати. Отмечены довольно существенные недостатки, присущие данным методам. Подробно рассмотрен наиболее действенный для данной модели метод последовательных уступок. Область применения результатов – проведение комплексной оценки инновационного проекта с целью выбора наиболее эффективного варианта, в полной мере учитывающего основные аспекты жизнедеятельности региона (экономические, социальные и экологические). **Заключение.** Использование приведенной в статье комплексной многокритериальной экономико-математической модели выбора регионального инновационного проекта с учетом экономических, социальных и экологических факторов повысит уровень адекватности принимаемых органами региональной власти решений в части выбора эффективных проектов.

**Ключевые слова:** региональные инновационно-инвестиционные проекты, эффективность, экономико-математическая модель, бизнес-планирование, социальные и экологические факторы

**Для цитирования:** Анализ эффективности региональных инновационных проектов / Я.Д. Гельруд, Ц. Цуй, В.В. Захаров, В.Г. Разумов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 108–115. DOI: 10.14529/ctcr250109

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr250109

## ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF REGIONAL INNOVATION PROJECTS

Ya.D. Gelrud<sup>1</sup>, [gelrud@mail.ru](mailto:gelrud@mail.ru)

J. Cui<sup>2</sup>, [172982663@qq.com](mailto:172982663@qq.com)

V.V. Zakharov<sup>1</sup>, [metkol@yandex.ru](mailto:metkol@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

V.G. Razumov<sup>1</sup>, [wisewolf7778@gmail.com](mailto:wisewolf7778@gmail.com)

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Project and Investment Promotion Center, China (Heilongjiang) Pilot Free Trade Zone, Heihe, China

**Abstract. The purpose of the study.** The purpose of the article is to analyze the role of innovative investments in the qualitative development of regions. At the same time, the problems of the complex influence of environmental, social, economic and scientific-technical factors on regional innovative projects should be disclosed, and direct and indirect costs of project management associated with these factors should be studied. The subject is management relations that arise during innovative design in the regional management system. **Materials and methods.** The methodological basis of the work is the use of system analysis, statistical analysis methods, mathematical modeling. The article reveals the content of the effect of a regional innovative project. The traditional model for assessing a regional innovative project is considered, and the disadvantages of the model are highlighted. The work also discloses the UNIDO standard. It is noted that in order to assess the effectiveness of a regional innovative project, it is necessary to analyze the role and state of the entity, the economic state of the region and directly the social and environmental consequences that are expected when implementing the project. The assessment of capital-forming investment projects is also considered. **Results.** The result of the work is an economic and mathematical model for assessing and selecting a regional innovative project, taking into account economic, social and environmental factors. To solve this multi-criteria problem with contradictory criteria, various methods and algorithms of multi-criteria optimization are considered, including the method of convolution of criteria, obtaining one, sometimes quite complex formula, methods for obtaining a Pareto-optimal solution, the Saaty hierarchy method. Quite significant shortcomings inherent in these methods are noted. The most effective method for this model is the method of successive concessions. The scope of application of the results is a comprehensive assessment of the innovation project in order to select the most effective option that fully takes into account the main aspects of the region's life (economic, social and environmental). **Conclusion.** The use of the complex multi-criteria economic and mathematical model for choosing a regional innovation project given in the article, taking into account economic, social and environmental factors, will increase the level of adequacy of decisions made by regional authorities in terms of choosing effective projects.

**Keywords:** regional innovation and investment projects, efficiency, economic and mathematical model, business planning, social and environmental factors

**For citation:** Gelrud Ya.D., Cui J., Zakharov V.V., Razumov V.G. Analysis of the efficiency of regional innovation projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):108–115. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250109

### Введение

Для осуществления инновационного проекта традиционно составляется бизнес-план по стандарту UNIDO [1]. Данный стандарт включает в себя:

1) краткое описание проекта, содержащее суть проекта, его новизну, прибыль и необходимые затраты на его осуществление. Также в данном разделе указываются сроки возврата прибыли и гарантии;

2) характеристика предприятия. Данный раздел включает в себя информацию о предприятии и возможностях по осуществлению инновационного проекта, включая финансовые и технические параметры;

3) описание жизненного цикла инновационного проекта, положительные и отрицательные его особенности;

4) производственный план, включающий в себя описание производственного процесса по реализации инновационного проекта в соответствии с возможными рисками и угрозами;

5) организационный план включает в себя организационные моменты по внедрению инновационного проекта, в том числе работе команды по осуществлению проекта;

6) финансовый план включает в себя понесенные затраты и полученные доходы, распределение прибыли в случае успешного и неудачного внедрения проекта;

7) эффективность инновационного проекта. Данный раздел отражает экономическую эффективность внедрения проекта, а также содержит иной расчет различных эффектов инновационного проекта. Также рассматриваются различные методы финансирования;

8) риски. При составлении бизнес-плана производится анализ рисков инновационного проекта. Также предлагаются вероятные пути снижения возможных рисков [2].

Данный стандарт используют при оценке эффективности и региональных инновационных проектов, что, на наш взгляд, не отражает их специфику. Наличие большого числа рисков и неопределенности не только в экономических результатах таких проектов, но и их возможное влияние на экологическую обстановку и социальную сферу региона отличает региональный инновационный проект от инновационного проекта предприятия, что и будет учтено в данной статье при создании математической модели оценки и выбора эффективного регионального инновационного проекта.

В ряде публикаций уделено большое внимание региональным особенностям создания инновационных систем [3, 4]. К сожалению, в этих и в большинстве других публикаций или отсутствуют, или только слабо обозначены принципы учета экологических и социальных последствий при оценке регионального инновационного проекта.

В части экологических факторов недостаточно полно рассматриваются соответствующие прямые и косвенные затраты, скрытые издержки (снижение стоимости активов, увеличение невозобновимых ресурсов, в том числе площади приведенной в негодность земли, ухудшение условий жизни населения и др.) [5]. Инновационные проекты, которые вносят благоприятные последствия для окружающей среды, как, например, снижение выбросов в окружающую среду, оцениваются положительно. Отсутствие тщательного учета экологических факторов может привести к неприятным последствиям. Так, например, при строительстве Сиднейского оперного театра (Австралия) затраты составили 102 млн долларов при первоначальной смете в 7 млн долларов. При планируемом сроке 4 года строительство осуществлялось 14 лет. Главной причиной такого положения был недостаточный учет экологических факторов на стадиях планирования проекта [6].

Социальные факторы формулируются достаточно абстрактно и не конкретно: «улучшение социально-экономического положения населения региона», «создание благоприятного социально-адаптационного фона» [7] и т. п. Ниже при описании экономико-математической модели мы приведем конкретный перечень экологических и социальных факторов, которые следует учитывать при управлении региональными инновационными проектами.

Проблема управления региональными инновационными проектами не имеет, на наш взгляд, достаточно подробного описания в научной литературе. В рассмотренных публикациях не полностью раскрыты проблемы влияния экологических и социальных факторов на региональные инновационные проекты, не исследованы связанные с этими факторами прямые и косвенные затраты на проектное управление. Неразработанность и неоднозначность вышеуказанных положений и несомненная актуальность темы определили ее выбор, цели, предмет и методы исследования.

### **Теория и постановка задачи**

Эффективность регионального инновационного проекта следует определять, анализируя комплексно экономические, социальные, экологические и научно-технические факторы. Экономические факторы включают в себя прибыль от внедрения инновационного проекта, соответственно, увеличение отчислений в бюджет региона, повышение производительности труда, фондоотдачи и другие показатели, характеризующие экономическую эффективность проекта. Экологические факторы обеспечивают экологическую безопасность региона, в котором внедряется инновационный проект, и включают в себя сокращение вредных выбросов, улучшение экологических свойств продукции, производимой в результате реализации инновационного проекта, уменьшение промышленных отходов. Научно-технические факторы – это создание новых прогрессивных продуктов и технологий, подтвержденных патентами и авторскими свидетельствами, автоматизация производства и так далее. Социальные факторы отражают влияние проекта на повышение

качества жизни как сотрудников предприятия, так и населения региона. Под социальным эффектом понимается рост средней заработной платы в регионе, улучшение качества работы и безопасности работников, а также увеличение удовлетворенности сотрудников, рост рабочих мест и так далее. Коммерческий эффект при инновационном региональном проекте достигается абсолютно у всех заинтересованных сторон проекта, так как существует эффект у инициатора проекта, инвесторов, государства и кредитора. Проводимый в настоящей статье анализ учитывает интересы таких региональных стейкхолдеров, как налоговые и надзорные органы.

Также при составлении бизнес-плана необходимо указать маркетинговые мероприятия, направленные на внедрение проекта. Здесь необходимо рассмотреть потребность потребителей в инновационных предложениях, указать полезность проекта для региона, должна быть указана ценовая политика и так далее.

Еще одна особенность регионального инновационного проекта заключается в том, что он осуществляется и внедряется в определенном субъекте страны, но при этом результативность проекта должна оказывать положительное влияние как на региональном уровне, так и на государственном. Отбор проектов производится непосредственно территориальными органами власти и управления. Региональный инновационный проект может быть эффективным для одного региона и неэффективным для другого, так как особенности регионов различные. Руководство региона обязано правильно определить политику инновационного развития региона, поскольку именно правильность определения будет влиять на отбор и результат инновационных проектов [8].

#### Методы оценки эффективности региональных инновационных проектов

Оценка эффективности регионального инновационного проекта традиционно осуществляется экономическими моделями, которые включают в себя следующее [9]:

- 1) оценка периода окупаемости;
- 2) оценка точки окупаемости;
- 3) рентабельность инвестиций;
- 4) методы дисконтирования.

При этом следует отметить минусы использования экономической модели оценки эффективности, а именно:

- 1) нецелесообразность проведения такой модели на ранних сроках жизненного цикла проекта, поскольку отсутствуют достоверные финансовые данные, высока их неопределенность;
- 2) отдельное изучение проектов друг от друга.

Оценка эффективности инновационного регионального проекта должна осуществляться комплексно. Так, оценка должна касаться и региона в целом для выявления его особенностей и целесообразности внедрения инновационного проекта, а также должна реализовываться оценка капиталобразующих инвестиционных проектов [8]. При осуществлении оценки эффективности регионального инновационного проекта необходимо проанализировать роль и состояние субъекта, экономическое состояние региона и непосредственно социальные и экологические последствия, которые предполагаются при внедрении проекта. Все эти критерии важны для оценки проекта, так как именно они оказывают влияние на дальнейшую эффективность от проекта.

#### Описание математической модели оценки и выбора регионального инновационного проекта

С учетом приведенных выше отрицательных моментов в традиционных методах оценки эффективности региональных инновационных проектов предлагается следующая математическая модель.

Обозначим  $S^t$  – прогнозируемые объемы финансирования инновационных проектов на интервале планирования  $[0, T]$ . Они могут быть инвестированы в один из предлагаемых к реализации инновационных проектов  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Необходимый объем инвестиций в период  $t$  по каждому проекту  $i$  составляет  $Q_i^t$ . Прогнозируемая прибыль от выполнения проекта  $i$  в период  $t$  составляет  $PQ_i^t$ . Ставка налогообложения зависит от типа проекта и составляет  $sn_i$ . Экспертная оценка степени социальной значимости  $i$ -го проекта –  $\bar{A}_i^t$ , а экспертный прогноз уровня экологического риска  $i$ -го проекта составляет  $\bar{B}_i^t$ . Требуется выбрать инновационный проект, обеспечи-

вающий близкий к максимальному прогнозируемый объем налогов при близком к минимальному значению уровня экологического риска и близкой к максимальной степени социальной значимости.

Математическая модель выбора такого проекта формулируется в виде многокритериальной задачи следующим образом. Требуется найти:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если выбирается } i\text{-й проект,} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

при ограничениях  $\forall t \in [0, T]$ :

$$\sum_{i=1}^n Q_i^t \cdot x_i \leq S^t. \quad (2)$$

Критерии оптимизации:

– максимизация прогнозируемого объема налогов

$$F_1 = \sum_{t=0}^T (\sum_{i=1}^n x_i \cdot sn_i \cdot PQ_i^t) (1 + dis)^{-t} \rightarrow \max; \quad (3)$$

– минимизация уровня экологического риска

$$F_2 = \sum_{t=0}^T (\sum_{i=1}^n x_i \cdot \bar{B}_i^t) (1 + dis)^{-t} \rightarrow \min; \quad (4)$$

– максимизация степени социальной значимости

$$F_3 = \sum_{t=0}^T (\sum_{i=1}^n x_i \cdot \bar{A}_i^t) (1 + dis)^{-t} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Оценка уровня экологического риска  $\bar{B}_i^t$   $i$ -го проекта, реализуемого в  $t$ -й период, осуществляется экспертными методами, подробно описанными в [10]. Учитывая большую неопределенность исходных данных, присущую инновационным проектам, рекомендуем также использовать методы оценки рисков, представленные в [11]. Исходными данными для оценки экологических рисков являются:

- описание технологических процессов, лежащих в основе рассматриваемых инноваций, используемое при этом оборудование, химические свойства сырья и материалов;
- результаты лабораторных испытаний и исследований, производимых службами производственного экологического и санитарного контроля;
- результаты санитарно-эпидемиологической оценки, осуществляемой соответствующими органами государственного надзора;
- результаты контроля соблюдения требований технологической безопасности, охраны окружающей среды, проводимого соответствующими государственными органами (показатели воздействия на атмосферный воздух, на водные объекты, на земли, на лесные ресурсы, на биологические ресурсы);
- результаты расследований аварийных и несчастных случаев на производстве, профессиональных заболеваний.

Оценку степени социальной значимости проектов  $\bar{A}_i^t$  осуществляем также экспертными методами, описанными в [10, 11]. Социальные аспекты отражают степень влияния проекта на повышение качества жизни населения региона. При оценке качества жизни (социальной среды) используются следующие факторы:

- средний доход на душу населения (заработная плата, социальные и другие выплаты);
- обеспеченность населения потребительскими товарами и услугами;
- соответствие цен и тарифов на потребительские товары и услуги доходам населения;
- обеспеченность жильем, хозяйственно-бытовыми объектами и соответствующими коммунальными услугами;
- число вновь образующихся рабочих мест в результате реализации инноваций; возможность подготовки и переподготовки кадров;
- обеспеченность населения образовательными и культурными объектами, спортивными сооружениями, объектами здравоохранения, транспортного обслуживания;
- обеспечение социальной безопасности (уменьшение правонарушений и преступности);
- обеспечение здорового образа жизни, увеличение средней продолжительности; повышение уровня здравоохранения и сферы обслуживания.

Коэффициент дисконтирования  $dis$  соответствует минимально желаемой степени прибыльности государственных инвестиций. Мы применили его для второго и для третьего критерия оптимизации для обеспечения эквивалентности оценок степени экологического риска и социальной значимости проектов, реализуемых в разное время.

Сформированные выше критерии (3)–(5) являются противоречивыми, улучшение значения одного ведет к ухудшению другого. Для решения данной многокритериальной задачи с противоречивыми критериями используются методы и алгоритмы многокритериальной оптимизации, подробно описанные в [12–16]. Самым простым способом является метод свертки критериев, получение одной, иногда довольно сложной формулы. Данный метод обладает довольно существенными недостатками, подробно, с примерами описанными в вышеуказанной литературе. Используются также методы получения решения, оптимального по Парето, метод иерархий Саати.

Нам представляется наиболее действенный для данной модели метод последовательных уступок, суть которого в следующем: на первом шаге решается задача (1)–(3) без целевых функций (4)–(5). Получаем решение  $\{x_k(1)\}$ , которому соответствует максимум целевой функции  $F_1^1$  и некоторое значение 2-го критерия  $F_2^1$ , скорее всего не минимальное. Делаем уступку по первому критерию (уменьшаем, например, на 5 %,  $F_1^2 = 0,95F_1^1$ ) и вводим дополнительное ограничение:

$$\sum_{t=0}^T (\sum_{i=1}^n x_i \cdot sn_i \cdot PQ_i^t) (1 + dis)^{-t} \geq F_1^2. \quad (6)$$

На втором шаге решается задача (1)–(2) с добавленным ограничением (6) и целевой функцией (4). Получаем решение  $\{x_k(2)\}$ , у которого первый критерий  $F_1^2 \leq F_1^1$ , а второй –  $F_2^2 \geq F_2^1$ . Далее проделываем подобную процедуру со вторым и третьим критериями – делаем уступку по второму критерию, переводим его в ограничение и максимизируем третий критерий. Последовательно продолжаем данный процесс  $K$  раз, в результате получаем последовательность  $\{x_k(1)\}$ ,  $\{x_k(2)\}$ , ...,  $\{x_k(K)\}$  с соответствующими значениями критериев. В данной упорядоченной последовательности решений наглядно продемонстрировано, за счет каких уступок по одним критериям получено улучшение значений других. Данная постановка задачи и предлагаемый метод ее решения обеспечивают компромиссный выбор регионального инновационного проекта, в максимальной степени устраивающий все заинтересованные стороны.

### Результаты и выводы

В статье раскрывается содержание эффекта регионального инновационного проекта. Рассмотрены традиционные модели оценки эффективности регионального инновационного проекта, отмечены их недостатки в части слабого учета социальных и экологических факторов. Использование приведенной в статье комплексной многокритериальной экономико-математической модели выбора регионального инновационного проекта с учетом экономических, социальных и экологических факторов повысит уровень адекватности принимаемых органами региональной власти решений в части выбора эффективных проектов.

### Список литературы

1. Business plan according to UNIDO standards. URL: <https://www.unido.org> (дата обращения: 20.06.2024).
2. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике. Изд. 2-е. М.: URSS: Либроком, 2013. 304 с.
3. Данилова И.В., Савельева И.П., Килина И.П. Развитие инновационного сектора региона как условие формирования информационной экономики в экономическом пространстве РФ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2018. Т. 12, № 2. С. 15–29. DOI: 10.14529/em180202
4. Прахалад К.К., Кришнан М.С. Пространство бизнес-инноваций: создание ценности совместно с потребителем : пер. с англ. М.: Альпина Паблишерз: Юрайт, 2011. 255 с.
5. Шигабутдинов А.Ф. Экологические риски инновационных проектов // Молодой ученый. 2010. № 4 (15). С. 183–186. URL: <https://moluch.ru/archive/15/1413/> (дата обращения: 20.06.2024).
6. Сиднейский оперный театр – архитектурный шедевр в гавани Беннелонг. URL: <https://architectureguru.ru/sydney-opera-house-australia/> (дата обращения: 20.06.2024).
7. Ахинов Г., Камилев Д. Государственное регулирование инновационной деятельности в социальной сфере // Проблемы теории и практики управления. 2013. № 9. С. 22–28.
8. Марабаева Л.В., Горин И.А., Сколов О.А. Методический подход к оценке эффективности проектов развития инфраструктуры инновационной деятельности региона // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-3. С. 600–604. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39589>.

9. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Вторая редакция, исправленная и дополненная. Утвержден Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. № ВК 477.
10. Гуцыкова С.В. Метод экспертных оценок. Теория и практика. М.: Когито-Центр, 2017. 991 с.
11. Калиновская С.Ю. Методика интегральной оценки риска инновационного проекта // Инновации. 2015. № 2 (196). С. 107–119.
12. Саати, Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: пер. с англ. М.: Изд-во ЛКИ, 2016. 360 с.
13. Карпенко А.П., Groшев С.В. Поддержка принятия многокритериальных решений на основе многоиндикаторной оценки качества Парето-аппроксимации // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 11. С. 64–74.
14. Гельруд Я.Д., Логиновский О.В. Управление проектами: методы, модели, системы: моногр. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2015. 330 с.
15. Царьков И.Н. Исследование эффективности методов оптимизации проекта с ограниченными ресурсами. Часть 1 // Научные исследования и разработки. Российский журнал управления проектами. 2013, Т. 2, № 3. С. 13–25. DOI: 10.12737/1240
16. Царьков И.Н. Исследование эффективности методов оптимизации проекта с ограниченными ресурсами. Часть 2 // Научные исследования и разработки. Российский журнал управления проектами. 2013. Т. 2, № 4. С. 3–13. DOI: 10.12737/1958

#### References

1. Business plan according to UNIDO standards. Available at: <https://www.unido.org>. (accessed 20.06.2024).
2. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Sistemnyy analiz i sintez strategicheskikh resheniy v innovatike* [System analysis and synthesis of strategic decisions in innovation]. 2nd ed. Moscow: URSS: Librocom; 2013. 304 p. (In Russ.)
3. Danilova I.V., Savelieva I.P., Kilina I.P. Development of the Region's Innovative Sector as the Condition for Formation of Information Economics in the Economic Space of the Russian Federation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Economics and Management*. 2018;12(2):15–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/em180202
4. Prahalad C.K., Krishnan M.S. *The New Age of Innovation: Driving Cocreated Value Through Global Networks*. McGraw-Hill Education; 2008.
5. Shigabutdinov A.F. [Environmental risks of innovative projects]. *Young scientist*. 2010;4(15):183–186. (In Russ.) Available at: <https://moluch.ru/archive/15/1413/> (accessed 20.06.2024).
6. *Sidneyskiy opernyy teatr – arkhitekturnyy shedevr v gavani Bennelong* [Sydney Opera House – an architectural masterpiece in Bennelong Harbour]. (In Russ.) Available at: <https://architectureguru.ru/sydney-opera-house-australia/> (accessed 20.06.2024).
7. Akhinov G., Kamilov D. State regulation of innovation in the social sphere. *Problems of theory and practice of management*. 2013;(9):22–28. (In Russ.)
8. Marabaeva L.V., Gorin I.A., Sokolov O.A. Methodical approach to evaluating the effectiveness of projects for infrastructure development of innovative activity in the region. *The Fundamental researches*. 2015;12-3:600–604. (In Russ.) Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39589>.
9. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov. Vtoraya redaktsiya, ispravlennaya i dopolnennaya. Utv. Minekonomiki RF, Minfinom RF i Gosstroem RF ot 21 iyunya 1999 g. No. VK 477* [Methodological recommendations for evaluating the effectiveness of investment projects. The second edition, corrected and supplemented. Approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation and Gosstroy of the Russian Federation dated June 21, 1999. No. VK 477]. (In Russ.)
10. Gutsykova S.V. *Metod ekspertnykh otsenok. Teoriya i praktika* [Method of expert assessments. Theory and practice]. Moscow: Kogito-Tsentr, 2017. 991 p. (In Russ.)
11. Kalinovskaya S.U. Method of interated account of innovation project's risks. *Innovations*. 2015;2(196):107–119. (In Russ.)

12. Saaty T.L. *Decision making with dependence and feedback: The Analytic Network Process*. Transl. from Engl. Moscow: LKI Publishing House; 2016. 360 p. (In Russ.)

13. Karpenko A.P., Groshev S.V. Multiple-criteria Decision-making Support Based on the Multi-Indicator Evaluation of the Pareto Approximation Quality. *Mechanical Engineering and Computer Science*. 2017;(11):64–74. (In Russ.)

14. Gel'rud Ya.D., Loginovskiy O.V. *Upravlenie proektami: metody, modeli, sistemy: monogr.* [Project Management: Methods, Models, Systems. Monograph]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2015. 330 p. (In Russ.)

15. Tsarkov I.N. Evaluation of Methods for Optimizing a Resource-Constrained Project. Part 1. *Scientific Research and Development. Russian Journal of Project Management*. 2013;2(3):13–25. (In Russ.) DOI: 10.12737/1240

16. Tsarkov I.N. Evaluation of Methods for Optimizing a Resource-Constrained Project. Part 2. *Scientific Research and Development. Russian Journal of Project Management*. 2013;2(4):3–13. (In Russ.) DOI: 10.12737/1958

### **Информация об авторах**

**Гельруд Яков Давидович**, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры международных отношений, политологии и регионоведения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск; gelrud@mail.ru.

**Цуй Цзянань**, заместитель директора, Центр привлечения проектов и инвестиций Китайской (Хэйлунцзянской) экспериментальной зоны свободной торговли, Хэйхэ, Китай; 172982663@qq.com.

**Захаров Вадим Владимирович**, ведущий инженер кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; metkol@yandex.ru.

**Разумов Владимир Геннадьевич**, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; wisewolf7778@gmail.com.

### **Information about the authors**

**Yakov D. Gelrud**, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of International Relations, Political Science and Regional Studies, South Ural State University, Chelyabinsk; gelrud@mail.ru.

**Jianan Cui**, Deputy Director, Project and Investment Promotion Center, China (Heilongjiang) Pilot Free Trade Zone, Heihe, China; 172982663@qq.com.

**Vadim V. Zakharov**, Leading engineer of the Department of Information and Analytical Support for Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; metkol@yandex.ru.

**Vladimir G. Razumov**, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; wisewolf7778@gmail.com.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 26.06.2024**

**The article was submitted 26.06.2024**

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

### 2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
  - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
  - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
  - электронный адрес автора (e-mail);
  - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подраз рубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);
- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

## СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки); 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК  
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия  
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»  
2025. Том 25, № 1

16+

Редактор *С.И. Уварова*  
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 30.01.2025. Дата выхода в свет 06.02.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 13,95. Тираж 500 экз. Заказ 10/30. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.