



# ИНФОРМАТИКА. ЭКОНОМИКА. УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS. ECONOMICS. MANAGEMENT

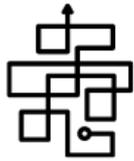
№ 1 (1) 2022

ИНФОРМАТИКА

ЭКОНОМИКА

УПРАВЛЕНИЕ

[WWW.OAJIEM.COM](http://WWW.OAJIEM.COM)



## Главный редактор

И.В. Ковалев, д-р техн. наук, профессор

## Редакционная коллегия

О.А. Антамошкин, профессор, д-р техн. наук, член IEEE  
 А.С. Аброров, PhD, Доцент  
 Е.Н. Головенкин, д-р техн. наук, профессор  
 Ю.В. Гуляев, академик РАН  
 А.С. Дулесов, д-р техн. наук, доцент  
 С.П. Друкаренко, канд. техн. наук, профессор  
 Ю.В. Ерыгин, профессор, д-р экономических наук  
 И.Н. Карцан, д-р техн. наук, доцент  
 О.Я. Кравец, д-р техн. наук, профессор  
 А.С. Кузнецов, канд. техн. наук, доцент  
 А.И. Легалов, д-р техн. наук, профессор  
 А.Г. Липшин, Кандидат сельскохозяйственных наук  
 Д.М. Мухаммадиев, профессор, д-р техн. наук  
 В.И. Пантелеев, д-р техн. наук, профессор  
 Н.И. Пыжикова, д-р экономических наук, профессор  
 М.В. Сарамуд, канд. техн. наук, доцент  
 А.А. Ступина, профессор, д-р техн. наук  
 Н.А. Тестоедов, член-корр. РАН  
 В.С. Тынченко, канд. техн. наук, доцент  
 В.В. Шайдуров, член-корр. РАН  
 Э.Е. Шапорова, канд. эконом. наук, доцент  
 Ю.А. Шурыгин, д-р техн. наук, профессор  
 С.В. Ченцов, д-р техн. наук, профессор  
 А.А. Ворошилова, канд. филос. наук, доцент

## О журнале

Журнал «Informatics, Economics, Management» / «Информатика. Экономика. Управление» – научное ориентированное на генерацию новых знаний в области современных информационных технологий, экономики и управления. Журнал основан Сибирским научным центром ДНИТ в 2022 году, выпускается 4 раза в год. Издается на русском и английском языках. Тематика и разделы журнала:

- Информатика, вычислительная техника.
- Системный анализ, управление и обработка информации.
- Экономика и финансы.
- Экономика и управление АПК.
- Образование.

В журнале осуществляется двойное слепое рецензирование, каждая рукопись оценивается не менее чем двумя экспертами. Журнал придерживается международных стандартов издательской этики в соответствии с рекомендациями Комитета по этике научных публикаций (COPE).



eLIBRARY.RU – одна из крупнейших российских электронных библиотек научных публикаций, которая обладает огромными возможностями поиска и получения информации.



CrossRef – это международный реестр научно-информационных материалов на основе технологии DOI. CrossRef использует технологию открытых стандартов системы DOI и является также официальным регистрационным агентством DOI для образовательных и профессиональных научных публикаций.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы публикаций. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

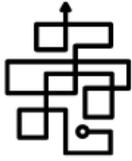
Необходимую информацию о журнале и полный список опубликованных статей, а также аннотации к ним Вы найдете на нашем сайте [www.oajmist.com](http://www.oajmist.com)

### Издательство и редакция:

ООО "Сибирский научный центр ДНИТ" (ООО "СНЦ ДНИТ")  
 660049, Красноярск, ул. Урицкого, 61, офис 101  
 Телефон: 8 (391) 227-85-00  
 E-mail: [oajiem@domnit.ru](mailto:oajiem@domnit.ru)  
[www.oajiem.com](http://www.oajiem.com)

Дизайн обложки Е.А. Борисова  
 Электронная версия: ISSN 2782-5280.  
 Журнал выходит четыре раза в год.  
 Подписано в печать 23.08.2022 г.  
 Цена свободная.

# 16+



## About journal

The Journal «Informatics, Economics, Management» is a scientific peer-reviewed journal open to international cooperation and publishing original scientific articles and reviews focused on generating new knowledge in the field of modern information technologies, economics and management.

The journal was founded by the Siberian Scientific Center DNIT in 2022 and is published 4 times a year in Russian and English.

Topics and sections of the journal:

- Informatics, computer technology.
- System analysis, management and information processing.
- Economics and finance.
- Economics and management of the agro-industrial complex.
- Education.

The journal carries out double-blind peer review, each manuscript is evaluated by at least two experts.

The journal adheres to international standards of publishing ethics in accordance with the recommendations of the Committee on the Ethics of Scientific Publishing (COPE).



eLIBRARY.RU – is one of the largest Russian electronic libraries of scientific publications, which has enormous search and information retrieval capabilities.



CrossRef – is an international register of scientific and informational materials based on DOI technology. CrossRef uses the open standards technology of the DOI system and is also the official DOI registration agency for educational and professional scientific publications.

Articles submitted to the Editorial board are reviewed. The authors of the publications are responsible for the accuracy of the information in the articles. The opinion of the editorial board may not coincide with the opinion of the authors. When reprinting, a link to the journal is required. Materials are published in the author's edition.

The necessary information about the journal and a complete list of published articles, as well as abstracts to them, can be found on our website [www.oajmist.com](http://www.oajmist.com)

### Publisher and Editorial office:

"Siberian Scientific Center DNIT" (Ltd. "SSC DNIT")  
61, Uritskogo Street, Krasnoyarsk, 660049, Russia  
Tel: 8 (391) 227-85-00  
E-mail: [oajiem@domnit.ru](mailto:oajiem@domnit.ru)  
[www.oajiem.com](http://www.oajiem.com)

Cover design by E.A. Borisova  
ISSN 2782-5280 (Online)



**SSC DNIT**  
Siberian Scientific Centre

## Chief Editor

I **Kovalev**, Doctor of Technical Sciences, Professor

## Editorial Board

O **Antamoshkin**, Doctor of Technical Sciences, Ass. Prof.  
A. **Abrorov**, PhD, Ass. Prof.  
E **Golovenkin**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Yu **Gulyaev**, Academician of the Russian Academy of Sciences  
A **Dulesov**, Doctor of Technical Sciences, Ass. Prof.  
S **Drukarenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Yu. **Erygin**, Doctor of Economics, Prof.  
I **Kartsan**, Doctor of Technical Sciences, Ass. Prof.  
A **Kuznecov**, PhD, Associate Professor  
A **Legalov**, Doctor of Technical Sciences, Prof.  
A. **Lipshin**, PhD  
D. **Muhammadiev**, Doctor of Technical Sciences, Prof.  
V **Panteleev**, Doctor of Technical Sciences, Prof.  
N. **Pyzhikova**, Doctor of Economics, Prof.  
M **Saramud**, PhD, Associate Prof.  
A **Stupina**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
N **Testoyedov**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences  
V **Tynchenko**, PhD, Associate Professor  
V **Shaidurov**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences  
Z. **Shaporova**, PhD, Associate Professor  
Yu **Shurygin**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
S **Chentsov**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
A **Voroshilova**, PhD, Associate Professor

# 16+

# Содержание

---

- 0101** **М. В. Покушко, А. А. Ступина, Е. С. Дресвянский, А. О. Ступин, С.М. Антипина**  
Использование метода анализа охвата данных для оценки эффективности предприятий
- 0110** **Д. И. Ковалев, В. А. Подоплелова, Т. П. Мансурова**  
GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов
- 0201** **А. В. Дроздов**  
Инструментальная поддержка интерпретации и динамической компиляции языков программирования систем промышленной автоматизации
- 0217** **П.А. Кузнецов, Я.А. Тынченко, В.В. Колесник**  
К вопросу учета опасностей при анализе надежности АСУ ТП опасных производств
- 0229** **А.А. Яблокова**  
Обзор инструментов кластеризации в SEO-проектировании

# Content

---

- 0101** **M. V. Pokushko, A.A. Stupina, E. S. Dresvianskii, A. O. Stupin, S.M. Antipina**  
Using Data Envelopment Analysis to evaluate the effectiveness of enterprises
- 0110** **D. I. Kovalev, V. A. Podoplelova, T. P. Mansurova**  
GERT-analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles
- 0201** **A. V. Drozdov**  
Instrumental support for interpretation and dynamic compilation of programming languages for industrial automation systems
- 0217** **P.A. Kuznetsov, Ya.A. Tynchenko, V.V. Kolesnik**  
On the issue of taking into account hazards in the analysis of the reliability of automated process control systems for hazardous industries
- 0229** **A.A. Yablokova**  
Tools for keyword clustering in SEO
- 

УДК: 004.9

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0101-0109>

## Использование метода анализа охвата данных для оценки эффективности предприятий

М. В. Покушко<sup>1,2,3,4</sup>, А. А. Ступина<sup>1,2,3</sup>, Е. С. Дресвянский<sup>1,2,3,4</sup>, А. О. Ступин<sup>2,3,4</sup>,  
С. М. Антипина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика  
М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

<sup>4</sup>Университет Кадиса, Пуэрто-Реаль (Кадис), Испания

**Аннотация.** В статье описан параметрический метод анализа охвата данных, применяемый для оценки эффективности объектов. Также рассмотрена модель ССР для оценки эффективности сложных систем. Кроме этого рассмотрены ее теоретические особенности, а также практическое применение в мировой литературе. В статье проведена апробация метода охвата данных и модели ССР для предприятий топливно-энергетического комплекса. Также проведены эксперименты расчета эффективности функционирования предприятий системы центрального коммунального теплоснабжения на примере теплоэлектроцентралей. Кроме этого, на основе данных входов и выходов работы предприятий, рассчитаны показатели эффективности для исследуемой выборки. Выявлены неэффективные предприятия. В статье рассчитаны показатели входов и выходов исследуемых предприятий для повышения их эффективности. А также даны рекомендации по настройке эффективности теплоэлектроцентралей за счет корректировки показателей входов и выходов. Полученные в статье экспериментальные данные могут быть использованы для повышения эффективности предприятий топливно-энергетического комплекса. Полученные данные могут быть использованы в академической сфере, а также имеют практическое применение для теплоэлектроцентралей. Кроме этого, на основе полученных в статье данных в дальнейшем будет построен алгоритм для системы поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** эффективность, DEA метод, модель ССР, топливно-энергетический комплекс, система коммунального теплоснабжения, теплоэлектроцентраль.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90013.

**Для цитирования:** Покушко, М. В., Ступина, А. А., Дресвянский, Е. С., Ступин, А. О. & Антипина, С. (2022) «Использование метода анализа охвата данных для оценки эффективности предприятий», Информатика. Экономика. Управление - Informatics.

Economics. Management, 1(1), 0101–0109. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0101-0109>

## Using Data Envelopment Analysis to evaluate the effectiveness of enterprises

M. V. Podushko<sup>1,2,3,4</sup>, A. A. Stupina<sup>1,2,3</sup>, E. S. Dresvianskii<sup>1,2,3,4</sup>, A. O. Stupin<sup>2,3,4</sup>,  
S. M. Antipina<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>4</sup> University of Cadiz, Puerto Real (Cadiz), Spain

**Abstract.** The article describes a parametric method Data Envelopment Analysis used to evaluate the effectiveness of objects. The CCR model for evaluating the effectiveness of complex systems is also considered. In addition, its theoretical features are considered, as well as its practical application in world literature. The article tests the method of data coverage and the CCR model for enterprises of the fuel and energy complex. Experiments have also been carried out to calculate the efficiency of the functioning of enterprises of the municipal district heating system on the example of combined heat and power plants. In addition, based on the data of inputs and outputs of enterprises, performance indicators for the sample under study are calculated. Inefficient enterprises have been identified. The article calculates the indicators of inputs and outputs of the studied enterprises to increase their efficiency. Recommendations are also given on setting up the efficiency of combined heat and power plants by adjusting the indicators of inputs and outputs. The experimental data obtained in the article can be used to improve the efficiency of enterprises of the fuel and energy complex. The data obtained can be used in the academic field, and also have practical application for combined heat and power plants. In addition, based on the data obtained in the article, an algorithm for a decision support system will be built in the future.

**Keywords:** efficiency, DEA method, CCR model, fuel and energy complex, municipal district heating system, combined heat and power plant.

**Acknowledgements.** The reported study was funded by RFBR, project number 20-37-90013.

**For citation:** Podushko M. V., Stupina A. A., Dresvianskii E. S., Stupin A. O., & Antipina S. M. (2022) Using Data Envelopment Analysis to evaluate the effectiveness of enterprises. Informatics. Economics. Management, 1(1), 0101–0109. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0101-0109>

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка эффективности предприятий является одной из основных задач успешного менеджмента в современных условиях. Метод анализа охвата данных является одним из современных инструментов оценки эффективности предприятий. Данному методу посвящено достаточно большое количество публикаций [1-5]. Но

вместе с тем, его использование ограничивается определенными сферами деятельности и не получило повсеместного использования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод охвата данных – это непараметрический метод оценки эффективности сложных систем [6]. Его суть заключается в построении границы эффективности [7]. Это огибающая гиперповерхность, которая строится по показателям деятельности системы. На этой границе лежат оптимальные объекты, в сравнении с остальными они дают наилучший результат [8]. В связи с конечным числом объектов в выборке граница эффективности имеет элементы, параллельные осям координат.

Объект, который обеспечивает требуемую эффективность, иначе может быть назван системой, лежащей на границе эффективности по Парето [9].

Считается, что объекты используют определенные ресурсы на входе и производят их преобразование в продукцию конкретного вида на выходе. Относительно какого-либо объекта, Парето-эффективность означает, что невозможно увеличить один из выходов (уменьшить один из входов), чтобы в результате не уменьшить (увеличить) другой. Неэффективные объекты расположены внутри множества производственных возможностей или за границей эффективности [9]. Данная граница формируется в многомерном пространстве входов и выходов путем многократного решения оптимизационной задачи линейного программирования.

Представим формулу метода охвата данных [11]:

$$Ef = \frac{\sum_{i=1}^r V_i X_{i_0}}{\sum_{j=1}^s U_j Y_{j_0}} \rightarrow \min!$$

При соблюдении следующих условий:

$$Ef = \frac{\sum_{i=1}^m V_i X_{i_m}}{\sum_{r=1}^s U_r Y_{r_m}} \leq 1$$

при  $m = 1, 2, \dots, n$ ,

$$U_r \geq 0,$$

$$j = 1, 2, \dots, s, V_i \geq 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, r.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной статье проведена оценка эффективности предприятий топливно-энергетического комплекса. А именно, теплоцентралей и котельных системы коммунального теплоснабжения. С помощью программного обеспечения DEAP [12], разработанного профессором Coelli, рассчитана эффективность 19 объектов теплоцентралей и котельных [13]. Для упрощения представления результатов исследования, в статье представим результаты только по 10 объектам. Для оценки эффективности по методу охвата данных возьмём два входных показателя и один выходной показатель.

Входные показатели:

- 1) располагаемая тепловая мощность оборудования (Гкал/час);
- 2) расход условного топлива на отпущенную ТЭ (тыс. т.у.т/год).

Выходной показатель:

- 1) отпуск тепловой энергии в сеть (тыс. Гкал).

Расчёты проведем, используя модель CCR с ориентацией на выход.

**Таблица 1.** Результаты расчётов эффективности по методу охвата данных по модели CCR с ориентацией на выход.

**Table 1.** Efficiency calculation results for the data coverage method of the CCR model with an output focus.

№	Эффективность	Входной показатель 1	Входной показатель 2	Выходной показатель
Объект 1	0,812	712,000	356,000	2645,567
Объект 2	0,955	1287,343	424,000	2899,217
Объект 3	0,874	1505,000	568,000	3720,926
Объект 4	0,564	722,000	320,000	2125,474
Объект 5	0,960	1354,000	412,000	3110,249
Объект 6	0,958	1351,085	432,000	3292,715
Объект 7	0,462	562,000	253,000	1643,200
Объект 8	1,000	1454,000	561,000	3302,000
Объект 9	1,000	1405,000	460,000	3248,000
Объект 10	0,764	572,000	292,000	1716,155

## ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 во второй колонке представлены показатели эффективности работы предприятий по исследуемой выборке, рассчитанных по методу охвата данных. Из данных показателей видно, что только объект под номером 8 и объект под номером 9 работают эффективно. Все остальные объекты имеют показатели эффективности меньше 1. Соответственно, они не работают со 100% эффективностью и эффективность их работы может быть улучшена. Самым неэффективным предприятием является объект под номером 7. Коэффициент его эффективности равен 0,462. В данном исследовании были осуществлены расчёты показателей входов и выходов по методу анализа охвата данных по объектам исследуемой выборки для достижения данными предприятиями максимальной эффективности – коэффициентов эффективности, равных 1. И в колонках по показателям входов и выходов представлены значения показателей входов и выходов исследуемых объектов для достижения показателей эффективности, равных 1. В статье была использована модель, ориентированная на выход. Соответственно, данная модель позволяет увеличить показатели выхода без изменения показателей входов. То есть, увеличиваем отпуск тепловой энергии в сеть с сохранением тепловой мощности оборудования и расхода топлива на прежнем уровне. Например, для объекта номер 7 с показателем эффективности, равным 0,462, при расчетах по методу анализа охвата данных, для достижения коэффициента эффективности, равного 1, необходимо произвести увеличение показателя выхода с 762,000 до 1643,200.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, объекты под номером 8 и 9, являются эффективными и имеют показатель эффективности, равный 1. Все остальные объекты исследуемой выборки являются неэффективными и имеют показатель эффективности, ниже 1. В данном исследовании была использована модель CCR, ориентированная на выход. Модель CCR позволяет увеличить показатели выхода без изменения показателей входов. Следовательно, может быть увеличен отпуск тепловой энергии в сеть с сохранением тепловой мощности оборудования и расхода топлива на прежнем уровне.

Результаты данного исследования будут в дальнейшем использованы для создания системы поддержки принятия решений на основе метода анализа охвата данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Григорьева Г.А., Мешалкина Н.Ю. Первичный склерозирующий холангит и воспалительные заболевания кишечника: современное состояние проблемы и собственные наблюдения. Фарматека. 2006; 12: 17-22.
- [2] Farrell M.J. The measurement of Productive Efficiency. Journal of Royal Statistical Society Part III. 1957; 253-290.
- [3] Charnes A., Cooper, W.W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. European Journal of Operational Research. 1978; 429–444.
- [4] Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. Management Science. 1984; 9: 1078-1092.
- [5] Wang, C., Nguyen, X., & Wang, Y. Automobile Industry Strategic Alliance Partner Selection: The Application of a Hybrid DEA and Grey Theory Model. Sustainability. 2016; 8 (2): 1-18.
- [6] Кривоножко В.Е., Лычев А.В. Анализ деятельности сложных социально-экономических систем. Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова. МАКС Пресс; 2010. 7-53.
- [7] Федотов Ю.В. Хрестоматия: измерение эффективности организаций. Метод DEA. Измерение эффективности деятельности организации: особенности метода DEA (анализа свертки данных) Том 10, №2 изд. Санкт-Петербург: Российский журнал менеджмента. 2012; 51-62.
- [8] Поронов А.Н. Оценка сравнительной эффективности государственного менеджмента экологической безопасности в регионе методом DEA-анализа. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2016; 104-111.
- [9] Моргунов, Е.П. Система поддержки принятия решений при исследовании эффективности сложных систем: принципы разработки, требования и архитектура. Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. 2007; 3 (16): 59-63
- [10] Шугалей А.П., Чевтаева В.В., Долганова А.А. Применение метода Data Envelopment Analysis для оценки эффективности функционирования отделений медицинского учреждения. Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (12–16 ноября 2018, г. Красноярск). 2018; 372-373.
- [11] Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data Envelopment Analysis. A Comprehensive

Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software. Second Edition. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2000; 2-99.

[12] Лохмаков, П.М., Царев Р.Ю., Волков В.А. Программно-информационные технологии повышения надежности систем управления. Инновационные недр Кузбасса. IT-технологии : тр. VI Всерос. науч.-практ. конф. Кемерово; 2007. 219-220.

[13] Coelli T.J. A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program. Centre for Efficiency and Productivity Analysis Department of Econometrics University of New England, p. 50. (Дата обращения: 20.05.2022).

[14] Администрация города Красноярска. Проект «Схема теплоснабжения города краснойска до 2033 года»: [Электронный ресурс]. 2015. URL: <http://www.admkrsk.ru/citytoday/municipal/energy/teplosn/Documents/Проект%20схемы%20теплоснабжения.pdf> (Дата обращения: 15.05.2022).

## REFERENCES

[1] Grigor'eva G.A., Meshalkina N.YU. Pervichnyj skleroziruyushchij holangit i vospalitel'nye zabolevaniya kishechnika: sovremennoe sostoyanie problemy i sobstvennye nablyudeniya. Farmateka. 2006; 12: 17-22.

[2] Farrell M.J. The measurement of Productive Efficiency. Journal of Royal Statisti-cal Society Part III. 1957; 253-290.

[3] Charnes A., Cooper, W. W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. European Journal of Operational Research. 1978; 429-444.

[4] Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. Management Science. 1984; 9: 1078-1092.

[5] Wang, C., Nguyen, X., & Wang, Y. Automobile Industry Strategic Alliance Partner Selection: The Application of a Hybrid DEA and Grey Theory Model. Sustainability. 2016; 8 (2): 1-18.

[6] Krivonozhko V.E., Lychev A.V. Analiz deyatel'nosti slozhnyh social'no-ekonomicheskikh sistem. Izdatel'skij otdel fakul'teta VMiK MGU im. M. V. Lomonosova; MAKS Press; 2010. 7-53. (in Russian)

[7] Fedotov Yu.V. Hrestomatiya: izmerenie effektivnosti organizacij. Metod DEA. Izmerenie effektivnosti deyatel'nosti organizacii: osobennosti metoda DEA (analiza svertki dannyh) Tom 10, №2 izd. Sankt-Peterburg: Rossijskij zhurnal menedzhmenta; 2012. 51-62.

(in Russian)

- [8] Porunov A.N. Ocenka sravnitel'noj effektivnosti gosudarstvennogo me-nedzhmenta ekologicheskoy bezopasnosti v regione metodom DEA-analiza. Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskij menedzhment». 2016; 104-111. (in Russian)
- [9] Morgunov, E.P. Sistema podderzhki prinyatiya reshenij pri issledovanii effektivnosti slozhnyh sistem: principy razrabotki, trebovaniya i arhitektura. Vestnik Sib. gos. aerokosmich. un-ta. 2007; 3 (16): 59-63. (in Russian)
- [10] Shugalej A.P., Chevtaeva V.V., Dolganova A. A. Primenenie metoda Data Envelopment Analysis dlya ocenki effektivnosti funkcionirovaniya otdelenij medicinskogo uchrezhdeniya. Materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva (12–16 noyabrya 2018, g. Krasnoyarsk). 2018; 372-373. (in Russian)
- [11] Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software. Second Edition. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2000; 2-99.
- [12] Lohmakov, P.M., Carev R.Yu., Volkov V.A. Programmno-informacionnye tekhnologii povysheniya nadezhnosti sistem upravleniya. Innovacionnye nedra Kuzbassa. IT-tekhnologii : tr. VI Vseros. nauch.-prakt. konf. Kemerovo; 2007. 219-220. (in Russian)
- [13] Coelli T.J. A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program. Centre for Efficiency and Productivity Analysis Department of Econometrics University of New England, p. 50. (Дата обращения: 20.05.2022).
- [14] Administraciya goroda Krasnoyarska. Proekt «Skhema teplosnabzheniya goroda Krasnoyarska do 2033 goda»: [Elektronnyj resurs]. 2015. URL: <http://www.admkrsk.ru/citytoday/municipal/energy/teplosn/Documents/Proekt%20skhemy%20teplosnabzheniya.pdf> (Data obrashcheniya: 15.05.2022). (in Russian)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Мария Валериевна Покушко**, Сибирский федеральный университет, научный сотрудник Красноярск, Россия  
e-mail: [mvp1984@mail.ru](mailto:mvp1984@mail.ru)  
ORCID: 0000-0001-8101-0195

**Mariia Valerievna Pokushko**, Siberian Federal University, Researcher Krasnoyarsk, Russia  
e-mail: [mvp1984@mail.ru](mailto:mvp1984@mail.ru)  
ORCID: 0000-0001-8101-0195

**Алена Александровна Ступина**, Сибирский федеральный университет, д-р техн. наук, профессор, Красноярск, Россия

**Alena Alexandrovna Stupina**, Siberian Federal University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Krasnoyarsk,

e-mail: h677hm@gmail.com

Russia

**Егор Сергеевич Дресвянский**, Сибирский  
федеральный университет, аспирант  
Красноярск, Россия  
e-mail: dresvegor@mail.ru

**Egor Sergeevich Dresvianskii**,  
Siberian Federal University, Post-graduate  
student Krasnoyarsk, Russia

**Артем Олегович Ступин**,  
Сибирский государственный университет  
науки и технологий имени академика М. Ф.  
Решетнева, магистрант, Красноярск, Россия  
e-mail: arstupin@gmail.com

**Artem Olegovich Stupin**,  
Siberian State University of Science and  
Technology named after Academician M. F.  
Reshetnev, Master's student, Krasnoyarsk,  
Russia

**Светлана Михайловна Антипина**,  
Сибирский федеральный университет,  
аспирантка, Красноярск, Россия  
e-mail: xoroshewaswetlana@yandex.ru

**Svetlana Mikhailovna Antipina**, Siberian  
Federal University, Postgraduate student,  
Krasnoyarsk, Russia  
e-mail: xoroshewaswetlana@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 19.06.2022; одобрена после рецензирования 18.08.2022; принята  
к публикации 19.08.2022.*

*The article was submitted 19.06.2022; approved after reviewing 18.08.2022; accepted for publication  
19.08.2022.*

УДК: 629.734/.735

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>

## GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов

Д. И. Ковалев<sup>1,2</sup>, В. А. Подоплелова<sup>1,3</sup>, Т. П. Мансурова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНИО, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сочинский государственный университет, Сочи, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается стохастический анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов на современном этапе развития агросферы, связанный с применением технологий точного земледелия. Развитие технологии точного земледелия требует более высокого уровня технического обеспечения, основанного на применении беспилотных авиационных систем. Транспортный технологический цикл БПЛА по дифференцированному внесению пестицидов и удобрений соответствует заданной программе обработки поля и описывается стохастической GERT-моделью. В работе предлагается рассматривать в качестве критерия при рисковом анализе транспортных технологических циклов БПЛА потерю производительности БПЛА по времени. Выполнен GERT-анализ количественной характеристики рисков транспортных единиц БПЛА, как локального критерия прогнозируемой величины простоев и убытков. Предложена новая методика расчета количественных значений риска простоев БПЛА, как основного звена системы точного земледелия в одном транспортном технологическом цикле на основе процедур стохастических графов. Данный подход обладает универсальностью и подходит для БПЛА любых типов и любой грузоподъемности.

**Ключевые слова:** анализ транспортных циклов, беспилотный летательный аппарат, GERT-анализ, методика расчета, анализ риска, технология точного земледелия.

**Для цитирования:** Ковалев, Д. И., Подоплелова, В. А., & Мансурова, Т. П. (2022). GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов. Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management, 1(1), 0110–0120. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>

---

## GERT-analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles

D. I. Kovalev<sup>1,2</sup>, V. A. Podoplelova<sup>3</sup>, T. P. Mansurova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>3</sup>*Sochi State University, Sochi, Russia*

**Abstract.** The article discusses a stochastic analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles at the present stage of development of the agrosphere, associated with the use of precision farming technologies. The development of precision farming technology requires a higher level of technical support based on the use of unmanned aerial systems. The transport technological cycle of the UAV for the differentiated application of pesticides and fertilizers corresponds to a given field treatment program and is described by a stochastic GERT model. The paper proposes to consider the loss of UAV performance over time as a criterion in the risk analysis of UAV transport technological cycles. GERT-analysis of the quantitative characteristics of the risks of UAV transport units was performed as a local criterion for the predicted amount of downtime and losses. A new method for calculating the quantitative values of the risk of UAV downtime, as the main link in the precision farming system in one transport technological cycle, is proposed based on the procedures of stochastic graphs. This approach is universal and suitable for UAVs of any type and any payload.

**Keywords:** transport cycle analysis, unmanned aerial vehicle, GERT-analysis, calculation method, risk analysis, precision farming technology.

**For citation:** Kovalev D. I., Podoplelova V. A., & Mansurova T. P. (2022). GERT-analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles. Informatics. Economics. Management, 1(1), 0110–0120. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>

---

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность управления транспортными технологическими циклами беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в значительной степени зависит от меры полноты анализа производственных ситуаций в системах точного земледелия [1-10]. Вследствие вероятностного характера большинства параметров транспортного технологического процесса, качественная и количественная оценка эффективности функционирования БПЛА без привлечения формальных методов затруднена [11-13].

Процесс погрузки-разгрузки БПЛА и выполнения полетных заданий может быть описан с помощью стохастических сетей. В работах [14, 15] предложены формальные методы анализа для оптимизации функционирования транспортных средств. Однако практическая необходимость качественного улучшения функционирования транспортной технологической сети БПЛА требует разработки новых эффективных математических методов для выполнения анализа реализации циклических транспортных технологических процессов.

Рисковый анализ является одним из методов нахождения «узких» мест в цикле технологических операций, внутри которых следует искать оптимальный вариант управляющих воздействий [7].

В качестве критерия при рисковом анализе транспортных технологических циклов БПЛА выступает потеря производительности БПЛА по времени. В данной работе предлагается метод определения количественной характеристики рисков транспортных единиц БПЛА, как локального критерия прогнозируемой величины простоев и убытков.

В работе предложена методика расчета количественных значений риска простоев БПЛА, как основного звена системы точного земледелия в одном транспортном технологическом цикле на основе процедур стохастических графов [16, 17].

Количественный анализ риска простоев в транспортном технологическом цикле БПЛА является необходимым условием внедрения беспилотных летательных аппаратов в сельское хозяйство, так как позволяет сократить нецелевой расход химической жидкости путём точечного внесения пестицидов и удобрений, что в свою очередь приведет к увеличению урожая, тем самым решая проблему издержек сельскохозяйственного производства.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В классическом определении риск  $R$  понимается как скалярное произведение двух векторов: вектора величин стоимостных оценок потерь  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , и вектора вероятностей их реализации  $p_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  при реализации принятого решения

$$R = \sum_{i=1}^n A_i p_i. \quad (1)$$

Однако для рискового анализа транспортных технологических циклов БПЛА, представленных сетевыми структурами, данный подход не применим. Адекватной альтернативой является трактовка риска как произведения математического ожидания случайной величины неблагоприятного события на величину стоимостной оценки события

$$R = A_i E [x_i], \quad (2)$$

где  $E [x_i]$  – это математическое ожидание величины  $x_i$ . Такое определение риска подходит для применения в сетевых математических моделях со стохастической структурой и позволит оценивать численно величину риска.

В нашем случае авиатранспортным элементом системы точного земледелия является БПЛА, транспортирующий удобрения от наземных пунктов загрузки (бункеров заправки) до обрабатываемых полей. В обратном направлении БПЛА движется «порожняком», а в направлении обрабатываемых полей – загруженным. Выбор места загрузки БПЛА определяется диспетчерской службой или жестким закреплением БПЛА за одним из наземных (мобильных) пунктов. В рамках рассматриваемой системы точного земледелия используются, кроме того, наземные мобильные станции D-RTK 2, которые обеспечивают позиционирование летательного аппарата с точностью до сантиметра. Используются сигналы от спутников GPS, ГЛОНАСС и Galileo. Информация передается на дрон по защищенному беспроводному каналу.

Время продолжительности единичного транспортного цикла БПЛА  $T$  представляет собой сумму

$$T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (3)$$

где  $t_1$  - время загрузки БПЛА;  $t_2$  - время движения БПЛА к пункту обработки поля;  $t_3$  - время обработки поля.

Слагаемые равенства (3) определяются аналитически и зависят от характеристик БПЛА, который используется для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений по заданной программе обработки поля, а также от наземной инфраструктуры. В этом случае мы можем получить аналитическое выражение времени продолжительности единичного транспортного технологического цикла БПЛА. Полученное выражение является детерминированным выражением и не учитывает непроизводительных простоев БПЛА при выполнении технологических процессов. Простой объекта возникают в местах погрузки, в пунктах обработки полей и по ходу движения (в случае изменения траектории полета, неисправностей бортового и наземного оборудования и пр.). Таким образом в выражение (3), вместо введения некоторых коэффициентов неравномерности, можно добавить слагаемое простоев  $t_d$ , значение которого для каждого этапа транспортных технологических циклов БПЛА может быть вычислено достаточно точно.

Технологическая операция каждого цикла БПЛА может быть представлена графически в виде направленного графа. При этом множество дуг графа представляют собой процессы, а множество узлов – состояния элемента. Исходя из того, что транспортный технологический процесс имеет четкую последовательность операций, то

и последовательность простоев в транспортном технологическом цикле БПЛА следует в соответствии логикой процесса. Так как риск по дугам графа обладает свойством аддитивности, то, следовательно, к построенному графу можно применить процедуры GERT-моделирования для выявления рисков, связанных с выполнением всей сети. Таким образом, GERT-сети описывают графы со стохастической структурой эволюции и стохастической длительностью операций. Временной GERT-анализ включает в себя выявление самого раннего и самого позднего времени возникновения отдельных событий транспортного технологического цикла БПЛА, помимо вычисления (распределения) продолжительности всего цикла. Для GERT-сетей так же вводятся понятия ранней и поздней активации узлов. Их значения, однако, отличаются от значений для CPM и PERT (так как события цикла могут возникать несколько раз) и их вычисление намного более сложно [18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для формализации GERT-сети введем следующие обозначения. Определим существующие процессы и операции транспортного технологического цикла отдельного БПЛА. Обозначим  $S_i; i \in N$  - состояния БПЛА, а через функцию  $W_{ij}; i, j \in N$  - процессы простоя БПЛА на этапах загрузки и транспортирования груза. При этом,  $S_i$  - будут соответствовать узлам сетевой модели и не иметь временной протяженности,  $W_{ij}$  - соответствуют дугам сетевой модели и имеют временную протяженность.  $W$ -функция случайной величины определяется как [17]:

$$W_{ij} = p_{ij} M_{ij}, \quad (4)$$

где  $p_{ij}$  - вероятность возникновения операции простоя БПЛА,  $M_{ij}$  - производящая функция моментов длительности операции простоя БПЛА. Декартово произведение элементов состояний (узлов GERT-модели) представляет собой множество пар, мощностью 4 (таблица 1).

Таблица 1. Элементы состояний БПЛА (узлы GERT-модели).

Возможные состояния БПЛА	Операция загрузки БПЛА	Положение БПЛА
$S_1$	Нет	Наземный пункт загрузки

$S_2$	Да	Наземный пункт загрузки
$S_3$	Да	Обрабатываемое поле
$S_4$	Нет	Обрабатываемое поле

Логический анализ транспортного технологического процесса БПЛА позволяет определить возможные простои каждой транспортной единицы в процессе функционирования. Сетевая стохастическая модель единичного транспортного цикла при любом способе закрепления БПЛА за наземными пунктами загрузки представляет собой топологию сети, для которой необходимо выполнить вероятностное описание простоев БПЛА в одном цикле.

Простои БПЛА по элементам единичного транспортного цикла, как случайные величины, подчинены определенному закону распределения. Хронометрический анализ простоев в цикле сельскохозяйственного БПЛА DJI Agras T30 позволил установить следующие распределения простоев и вероятности  $p_i$  их возникновения на основе критерия согласия Колмогорова, представленные в таблице 2.

Используя топологическое уравнение Мейсона [16], определим численное значение рисков на транспортном технологическом цикле. Для этого необходимо вычисление математического ожидания простоя. Для определения  $W_E$  – функции, эквивалентной GERT-сети, вводится дополнительная дуга для получения замкнутого графа.

Таблица 2. Дуги (операции простоя БПЛА) GERT-сетевой модели.

Обозначение операции простоя	Описание операции простоя	Вероятность возникновения операции простоя, $p_{ij}$	Параметры распределения операции	Вид распределения операции простоя [18]
$W_{1,1}$	Ожидание загрузки на наземном пункте	0.35	$\mu_{1,1} = 8$ $\sigma_{1,1} = 1.25$	Нормальное
$W_{1,2}$	Простои в процессе загрузки БПЛА	0.15	$\alpha_{1,2} = 3$	Экспоненциальное
$W_{2,3}$	Простои при движении загруженного БПЛА к обрабатываемому полю	0.15	$\alpha_{2,3} = 2.85$ $b_{2,3} = 0.09$	Гамма

$W_{3,3}$	Ожидание начала процесса обработки поля	0.45	$\mu_{1,1} = 7$ $\sigma_{1,1} = 2$	Нормальное
$W_{3,4}$	Простой БПЛА в процессе обработки поля	0.03	$\alpha_{1,2} = 2$	Экспоненциально е
$W_{4,1}$	Движение БПЛА от обрабатываемого поля к наземному пункту загрузки	0.09	$\alpha_{2,3} = 2.35$ $b_{2,3} = 0.05$	Гамма

Таким образом, для сельскохозяйственного БПЛА DJI Agras T30 получена GERT-модель с описанием состояний узлов и дуг (таблицы 1 и 2), позволяющая по методике [17] рассчитать величину убытка простоя БПЛА за минуту рабочего цикла. Далее с использованием стоимостной величины транспортного технологического цикла БПЛА, рассчитывается ожидаемый риск. Отметим, что расчеты выполняются для БПЛА DJI Agras T30 с баком объёмом 30 л, который имеет массу полезной нагрузки до 30 кг и производительность при обработке посевов ядохимикатами и жидкими удобрениями до 16,1 га/ч. Лучи данного БПЛА трансформируются для полива фруктовых деревьев. Он оснащён приёмником RTK, радаром кругового обзора и улучшенной системой визуального обнаружения. Возможна установка оборудования для разбрасывания семян и гранулированных удобрений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый подход к определению риска, позволяющий применить методы стохастического GERT-сетевого моделирования к анализу транспортных технологических циклов БПЛА при использовании в точном земледелии. В рамках GERT-модели строится универсальная рискованная сетевая структура по параметру простоя единичного транспортного цикла БПЛА, позволяющая достаточно точно определять численные характеристик величин простоев и убытков. Полученные данные могут быть использованы при планировании состава БПЛА, работающих на одном или нескольких участках обрабатываемых полей, а также с целью оптимизации использования наземного (мобильного) оборудования и снижения стоимости транспортировки пестицидов и удобрений при дифференцированном их внесении в почву или растительный покров. Предложенный подход обладает универсальностью и подходит для БПЛА любых типов

и любой грузоподъемности. Модельный расчет выполнен для сельскохозяйственного БПЛА DJI Agras T30.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kovalev I.V., Karaseva M.V. On the problem of increasing the efficiency of UAVs technologies in agrarian business. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020; 421: 072020.
- [2] Сулейменов Б.У., Танирбергенов С.И. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии: обзор. Почвоведение и агрохимия. 2018; 2: 85-100.
- [3] Зубарев Ю. Н., Фомин Д. С., Чащин А. Н., Заболотнова М. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве, Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2019; 2: 47-51. doi:10.7242/2658-705X/2019.2.5
- [4] Коротаев А.А., Новопашин Л.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга сельскохозяйственных угодий и посевных площадей в аграрном секторе. Аграрный вестник Урала. 2015; 12 (142): 38-42.
- [5] Zelenkov P.V, Brezitskaya V.V, Kovalev I.V, Karaseva M.V., Voroshilova A.A. Use of innovative space technology in progressive crop production. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2019; 315: 072019. doi:10.1088/1755-1315/315/7/072019
- [6] Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017; 3: 10-16. DOI 10.22314.2073-7599-2017.3.10-16
- [7] Хорт Д.О., Личман Г.И., Филиппов Р.А., Беленков А.И. Применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) в точном земледелии, Фермер. Поволжье. 2016; 7: 34-37.
- [8] Stafford J.V. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. Journal of Agricultural Engineering Research. 2000; 76 (3): 267-275.
- [9] Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017; 3: 10-16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-10-16>
- [10] Xinyu Xue, Yubin Lan, Zhu Sun, Chun Chang, W. Clint Hoffmann. Develop an

unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 128: 58-66.

[11] Kovalev I.V., Testoyedov N.A. Modern unmanned aerial technologies for the development of agribusiness and precision farming. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 548: 052080. doi:10.1088/1755-1315/548/5/052080

[12] Abie H, Borking J. *Risk Analysis Methods and Practices*. Norwegian: Norsk Regnesentral. 2012.

[13] Tuev E.V., Kozlova V., Olshevskaya O. Modern Innovations, Systems and Technologies. 2021; 1 (2): 34-45. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-2-34-45>

[14] Бидак Э.В., Мевша А.Р., Пода Д.В. Преимущества использования БПЛА в сельском хозяйстве. В сборнике: Новая наука: история становления, современное состояние, перспективы развития сборник статей Международной научно-практической конференции. 2017; 197-200.

[15] Глаголева Г.И. Преимущества применения БПЛА и их использование для нужд сельского хозяйства. В сборнике: Наука и молодёжь Сборник научных трудов. Новочеркасск. 2018; 104-106.

[16] Pregina K., Ramesh M. Stochastic Project Network Scheduling Technique for Construction Projects Using GERT. *Advances in Construction Management*. 2022; 191: 381-392. DOI:10.1007/978-981-16-5839-6\_33.

[17] Phillips D., Garcia-Diaz A. *Fundamental of network analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1981.

[18] Neumann K. *Stochastic Project Network: Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization*. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (LNE)*. 1990; 344.

## REFERENCES

[1] Kovalev I.V., Karaseva M.V. On the problem of increasing the efficiency of UAVs technologies in agrarian business. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 421: 072020.

[2] Sulejmenov B.U., Tanirbergenov S.I. Perspektivy primeneniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov v tochnom zemledelii: obzor. *Pochvovedenie i agrohimiya*. 2018; 2: 85-100.

[3] Zubarev YU. N., Fomin D. S., CHashchin A. N., Zabolotnova M. V. Ispol'zovanie bespilotnyh letatel'nyh apparatov v sel'skom hozyaistve, *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra*. 2019; 2: 47-51. doi:10.7242/2658-705X/2019.2.5

- [4] Korotaev A.A., Novopashin L.A. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya monitorirovaniya sel'skohozyajstvennykh ugodij i posevnykh ploshchadej v agrarnom sektore. *Agrarnyj vestnik Urala*. 2015; 12 (142): 38-42.
- [5] Zelenkov P.V, Brezitskaya V.V, Kovalev I.V, Karaseva M.V., Voroshilova A.A. Use of innovative space technology in progressive crop production. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2019; 315: 072019. doi:10.1088/1755-1315/315/7/072019
- [6] Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.YU. Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pesticidov i udobrenij v sisteme tochnogo zemledeliya. *Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 3: 10-16. DOI 10.22314.2073-7599-2017.3.10-16
- [7] Hort D.O., Lichman G.I., Filippov R.A., Belenkov A.I. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov (dronov) v tochnom zemledelii, *Fermer. Povolzh'e*. 2016; 7: 34-37.
- [8] Stafford J.V. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2000; 76 (3): 267-275.
- [9] Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.YU. Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pesticidov i udobrenij v sisteme tochnogo zemledeliya. *Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 3: 10-16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-10-16>
- [10] Xinyu Xue, Yubin Lan, Zhu Sun, Chun Chang, W. Clint Hoffmann. Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 128: 58-66.
- [11] Kovalev I.V., Testoyedov N.A. Modern unmanned aerial technologies for the development of agribusiness and precision farming. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2020; 548: 052080. doi:10.1088/1755-1315/548/5/052080
- [12] Abie H, Borking J. *Risk Analysis Methods and Practices*. Norwegian: Norsk Regnesentral. 2012.
- [13] Tuev E.V., Kozlova V., Olshevskaya O. Modern Innovations, Systems and Technologies. 2021; 1 (2): 34-45. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-2-34-45>
- [14] Bidak E.V., Mevsha A.R., Poda D.V. Preimushchestva ispol'zovaniya BPLA v sel'skom hozyaistve. V sbornike: *Novaya nauka: istoriya stanovleniya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya sbornik statej Mezhdunarodnoï nauchno-prakticheskoi konferencii*. 2017; 197-200.
- [15] Glagoleva G.I. Preimushchestva primeneniya BPLA i ih ispol'zovanie dlya nuzhd

sel'skogo hozyaystva. V sbornike: Nauka i molodëzh' Sbornik nauchnyh trudov. Novocherkass. 2018; 104-106.

[16] Pregina K., Ramesh M. Stochastic Project Network Scheduling Technique for Construction Projects Using GERT. *Advances in Construction Management*. 2022; 191: 381-392. DOI:10.1007/978-981-16-5839-6\_33.

[17] Phillips D., Garcia-Diaz A. *Fundamental of network analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1981.

[18] Neumann K. *Stochastic Project Network: Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization*. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (LNE)*. 1990; 344.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ковалев Д. И.**, аспирант, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия; Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНАО, Красноярск, Россия  
e-mail: grimm7jow@gmail.com

**Подоплелова В. А.**, аспирант, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия; Сочинский государственный университет, Сочи, Россия  
e-mail: podoplelovava@mail.ru

**Мансурова Т. П.**, научный сотрудник, Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНАО, Красноярск, Россия  
e-mail: mansurovatp@mail.ru

**Kovalev D. I.**, graduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia; Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, Krasnoyarsk, Russia

**Podoplelova V. A.**, graduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia; Sochi State University, Sochi, Russia  
e-mail: podoplelovava@mail.ru

**Mansurova T. P.**, researcher, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, Krasnoyarsk, Russia

*Статья поступила в редакцию 11.07.2022; одобрена после рецензирования 18.08.2022; принята к публикации 22.08.2022.*

*The article was submitted 11.07.2022; approved after reviewing 18.08.2022; accepted for publication 22.08.2022.*

УДК: 004.4

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0201-0216>

## Инструментальная поддержка интерпретации и динамической компиляции языков программирования систем промышленной автоматизации

А. В. Дроздов

*Сибирский Федеральный Университет, кафедра информатики Института космических и информационных технологий, Красноярск, Российская Федерация*

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию различных реализаций сред исполнения для языков промышленной автоматизации стандарта МЭК 61131-3 и проектированию среды исполнения, отличающейся от аналогов подходом к трансляции и выбором целевой платформы. Рассмотрена модель реализации, включающая в себя синтаксический разбор программного кода на языке ST стандарта МЭК 61131-3 посредством алгоритма LALR, последующая его интерпретация на виртуальной машине Java и динамическая компиляция в Java байткод. Рассмотрены и спроектированы части виртуальной машины, специфичные для языков промышленной автоматизации – планировщик задач и модуль управления конфигурацией подключаемых устройств. Разработана модель взаимодействия частей программы с применением архитектуры на основе плагинов.

**Ключевые слова:** виртуальная машина, среда исполнения, промышленная автоматизация, МЭК 61131-3, интерпретация, компиляция, динамическая компиляция, байткод, автоматизированное управление.

**Для цитирования:** Дроздов, А. В. (2022). Инструментальная поддержка интерпретации и динамической компиляции языков программирования систем промышленной автоматизации. Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management, 1(1), 0201–0216. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0201-0216>

---

## Instrumental support for interpretation and dynamic compilation of programming languages for industrial automation systems

A. V. Drozdov

*Siberian Federal University, Department of Informatics, Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk, Russian Federation*

**Abstract.** The work is devoted to the study of various implementations of runtime environments for industrial automation languages of the IEC 61131-3 standard and the design of a runtime environment that differs from analogues in its approach to translation and the choice of the target platform. The implementation model is considered, which includes parsing the program code in the ST language of the IEC 61131-3 standard using the LALR algorithm, its subsequent interpretation on the Java virtual machine and dynamic compilation into Java bytecode. Parts of the virtual machine specific to industrial automation languages are considered and designed - the task scheduler and the module for managing the configuration of connected devices. A model for the interaction of parts of the program using a plugin-based architecture has been developed.

**Keywords:** virtual machine, runtime environment, industrial automation, IEC 61131-3, interpretation, compilation, dynamic compilation, bytecode, automated control.

**For citation:** Drozdov A. V. (2022). Instrumental support for interpretation and dynamic compilation of programming languages for industrial automation systems. Informatics. Economics. Management, 1(1), 0201–0216. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0201-0216>

## ВВЕДЕНИЕ

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) используются практически во всех сферах человеческой деятельности для автоматизации технологических процессов, в системах противоаварийной защиты и сигнализации, в станках с числовым программным управлением, для управления дорожным движением, в системах жизнеобеспечения зданий, для сбора и архивирования данных, в системах охраны, в медицинском оборудовании, в системах связи, при постановке физического эксперимента, для автоматизации испытаний продукции и т. д.

В настоящее время для разработки программ для ПЛК используются в основном языки стандарта МЭК 61131-3 (далее МЭК-языки) [1]. В состав стандарта МЭК 61131-3 входит 5 независимых языков:

- Instruction List (Список Инструкций) – Текстовый язык. Аппаратно-независимый низкоуровневый ассемблероподобный язык;
- Ladder Diagram (Релейно-Контактные Схемы) – Графический язык. Представляет собой программную реализацию электрических схем на базе электромагнитных реле;
- Function Block Diagram (Функциональные Блоковые Диаграммы) – Графический язык. Программа образуется из списка цепей, выполняемых последовательно сверху вниз;

- Sequential Function Chart (Последовательные Функциональные Диаграммы) – Графический язык. Создан на базе математического аппарата сетей Петри. Описывает последовательность состояний и условий переходов;

- Structured Text (Структурированный текст) – Текстовый язык. По структуре и синтаксису ближе всего к языку программирования Паскаль.

В большинстве комплексов программирования для трансляции МЭК-языков используется принцип статической компиляции. В некоторых случаях это неприемлемо, т.к. статический компилятор генерирует машинный код только для конкретной архитектуры. Такой машинный код является архитектурно-зависимым и поэтому его использование на других платформах невозможно. Это значит, что для каждой используемой архитектуры необходимо разрабатывать отдельный компилятор, что является достаточно дорогим решением, если необходимо поддерживать несколько архитектур.

ЛТ-компиляция построена на использовании принципов динамической компиляции и так называемого промежуточного представления (байт-кода). ЛТ-система транслирует исходный код программы в байт-код, который затем используется для генерации машинного кода во время исполнения исходной программы.

Байт-код является архитектурно-независимым, что обеспечивает его переносимость на платформы с различными архитектурами, где есть соответствующий ЛТ-компилятор. Разработка ЛТ-компилятора для байт-кода требует меньших затрат, по сравнению с реализацией статического компилятора для исходного программного кода, поскольку байт-код имеет низкоуровневую структуру.

Более того, использование байт-кода значительно упрощает процесс построения перенастраиваемого ЛТ-компилятора, т.е. такого компилятора, который позволяет генерировать код для нескольких целевых архитектур, а процесс генерации машинного кода из байт-кода гораздо быстрее, чем из исходного.

В данной статье мы рассмотрим существующие модели виртуальных машин для языков программирования стандарта МЭК 61131-3 и предложим архитектуру виртуальной машины, сочетающей принципы кроссплатформенной интерпретации и динамической компиляции программного кода в машинно-независимое промежуточное представление.

## ВИРТУАЛЬНЫЕ МАШИНЫ IEC 61131-3

На данный момент, стандарт IEC 6113-1 имеет несколько доступных кроссплатформенных реализаций. Рассмотрим некоторые из них:

1. CODESYS Control SoftPLC преобразует любое встроенное устройство или устройство на базе персональных компьютеров (далее ПК) в промышленный контроллер, совместимый с МЭК 61131-3 [2]. Эта система среды выполнения включает в себя важные дополнительные функции, чтобы контроллер мог взаимодействовать с другими компонентами в среде автоматизации. Поддерживает большинство современных архитектур процессоров, включая x64, x86 и ARM.

Реализации CODESYS Runtime для различных платформ являются платными. Лицензионные копии могут быть приобретены на сайте разработчика.

2. The PLCNext Runtime позволяет запускать программы, написанные на языках программирования стандарта МЭК 61131-3, на платформе Microsoft ECLR (Embedded Common Language Runtime) [3]. PLCNext Runtime доступен для скачивания на ПК с операционной системой Linux, Windows, а также на ПЛК PLCNext Control производства Pheonix Contact.

Разрабатываемый продукт представляет собой набор программного обеспечения для осуществления интерпретации и динамической компиляции программ, разработанных с использованием языка программирования ST стандарта МЭК 61131-3 для систем промышленной автоматизации.

В качестве целевой платформы для реализации будет использоваться виртуальная машина Java (далее JVM). Независимость виртуальной машины Java от конкретной аппаратной платформы может значительно увеличить количество новых устройств, способных исполнять написанные ранее сценарии на языках стандарта МЭК 61131-3.

Предлагаемое решение будет отличаться от аналогов использованием различной целевой платформы, альтернативным подходом к трансляции, а также ценовой политикой в отношении распространения программного продукта (таблица 1).

**Таблица 1.** Сравнительная характеристика аналогов и планируемого программного изделия.

**Table 1.** Comparative characteristics of analogues and the planned software product.

Показатели	CODESYS Runtime	PLCNext Runtime	Своя разработка
------------	-----------------	-----------------	-----------------

Совместимость с Windows	+	+	+
Совместимость с Java	-	-	+
Целевая платформа	Custom	ECLR	JVM
Метод трансляции	AOT to bytecode	AOT to MSIL	интерпретация + JIT to bytecode
Бесплатное использование	-	+	+
Поддерживаемые языки	ST/LD/FD/SFC/IL	ST/LD/FD/SFC/IL	ST

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МАШИНЫ

Разрабатываемая виртуальная машина состоит из нескольких архитектурных модулей:

- Модуль пользовательского интерфейса (UI);
- Лексико-синтаксический анализатор языка ST (Parser);
- Интерпретатор абстрактного синтаксического дерева программы (Interpreter);
- JIT-компилятор (JIT);
- Модуль взаимодействия с окружением.

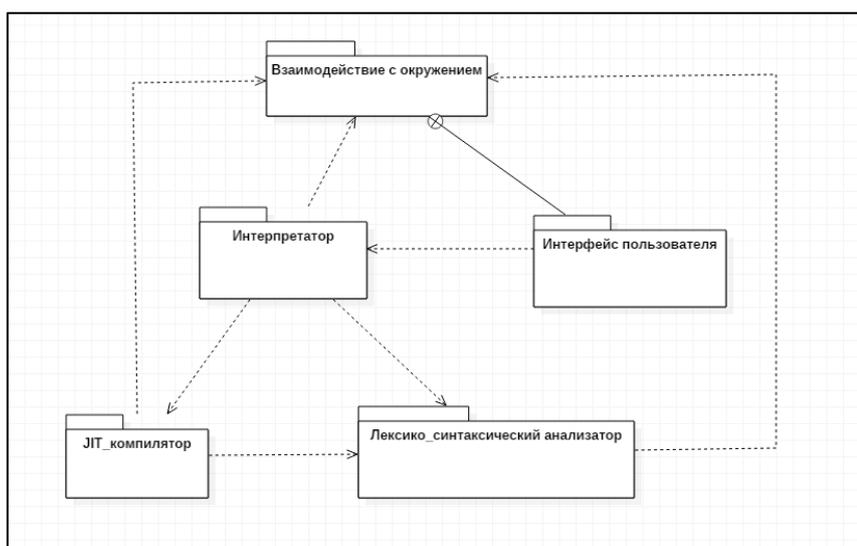


Рисунок 1. Диаграмма пакетов.

Figure 1. Packet diagram.

Зависимости между указанными выше модулями представлены на диаграмме пакетов на рисунке 1.

Основной сценарий работы приложения изображен на диаграмме последовательностей (рисунок 2).

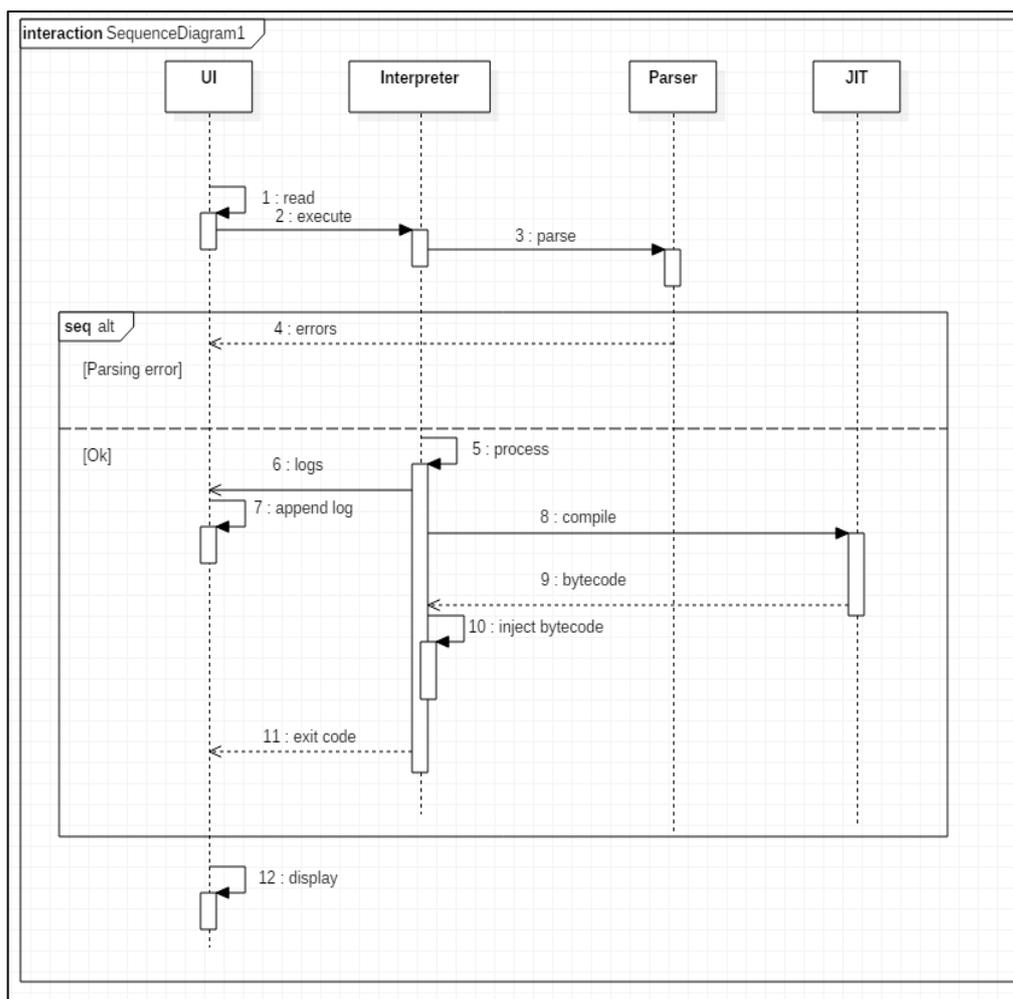


Рисунок 2. Диаграмма последовательностей.

Figure 2. Sequence diagram.

Далее каждый из модулей будет рассматриваться отдельно.

## ВЫБОР СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА

В полной версии стандарта МЭК 61131-3, опубликованной на сайте, приводится описание грамматики языков, вошедших в стандарт [4]. Грамматика выбранного для реализации языка ST является LALR-совместимой и содержит всего несколько сотен

правил [5]. Для перевода формальных грамматических правил в текст программы был выбран подход с использованием парсер-генераторов. Ниже приведен анализ используемых инструментов для языка программирования Java:

1. JavaCC;
2. ANTLR;
3. SableCC;
4. GNU Bison + flex;

JavaCC – по заявлению разработчиков, наиболее популярный инструмент для построения синтаксических анализаторов на Java. Грамматики выстраиваются по методу нисходящего синтаксического анализа. Прост в использовании с LL(k)-грамматиками. Не имеет встроенного механизма для работы с LALR-грамматиками, так же как и средств для распознавания “shift-reduce”, “reduce-reduce” конфликтов [6].

ANTLR – генератор нисходящих (LL(\*)) анализаторов для формальных языков. Имеет широкую сферу использования в продуктах Java-разработки и развитое сообщество. (Hibernate HQL, Cassandra, Groovy). Имеет собственную среду разработки, систему плагинов для популярных сред разработки (IntelliJ IDEA, Eclipse). Обладает вышеперечисленными недостатками генераторов LL-парсеров [7].

SableCC – объектно-ориентированный фреймворк для построения компиляторов. Работает с LALR-грамматиками, описанными в расширенной форме Бэкуса-Наура (РБНФ) [8]. Нотация грамматических правил дополнена метасимволами (\*, +, ?) для операторов, заимствованных из регулярных языков, с соответствующей им семантикой. Классы абстрактного синтаксического дерева (далее – AST), также как и примитивы реализации ООП-шаблона «Посетитель» могут генерироваться автоматически [9].

GNU Bison – генератор синтаксических анализаторов для LALR-грамматик. Используется в комплексе с лексическим анализатором flex. Поддерживает ряд языков программирования, включая C, C++ и Java [10].

При выборе наиболее подходящего инструмента учитывался собственный опыт работы с Yacc для LALR-грамматик с использованием языка OCaml, количество необходимого подготовительного кода, простота внесения изменений в процесс синтаксического анализа, качество документации и рекомендации специалистов.

По первому критерию, предпочтение отдавалось генераторам синтаксических анализаторов на основе РБНФ-текстов с функцией автоматического распознавания LALR-грамматик (SableCC и Bison). Оба продукта являются открытыми (Bison

распространяется по лицензии GPL, SableCC - LGPL), документация доступна публично. Количество подготовительного кода у SableCC меньше, а AST генерируется автоматически. На основании проведенного сравнительного анализа вышеперечисленных инструментов выбор пал в пользу SableCC.

## МОДУЛЬ ЛЕКСИКО-СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА

Модуль лексико-синтаксического анализа представлен классом Parser, реализующим метод parse. Метод parse выполняет синтаксический разбор текста и выполняет построение абстрактного синтаксического дерева программы.

Описание абстрактного синтаксического дерева программы представлено в виде иерархии классов на основе абстрактного базового класса Node.

Минимальным примитивом синтаксического дерева является терминальный символ (токен, содержащий значение). Для каждого известного терминала был выделен отдельный класс, с общим предком Token, унаследованным от класса Node.

Последовательности символов (терминалов и нетерминалов) объединены в альтернативы (синтаксические конструкции), а альтернативы – в продукции (синтаксические блоки). Каждая продукция имеет свой абстрактный класс, описывающий структуру своего поддерева. Альтернативы, входящие в продукцию, описывают собственные классы, которые унаследованы от класса продукции. Упрощенный пример такой иерархии представлен на UML диаграмме классов (рисунок 3). Токены помечены префиксом (T-), альтернативы – (A-), продукции – (P-).

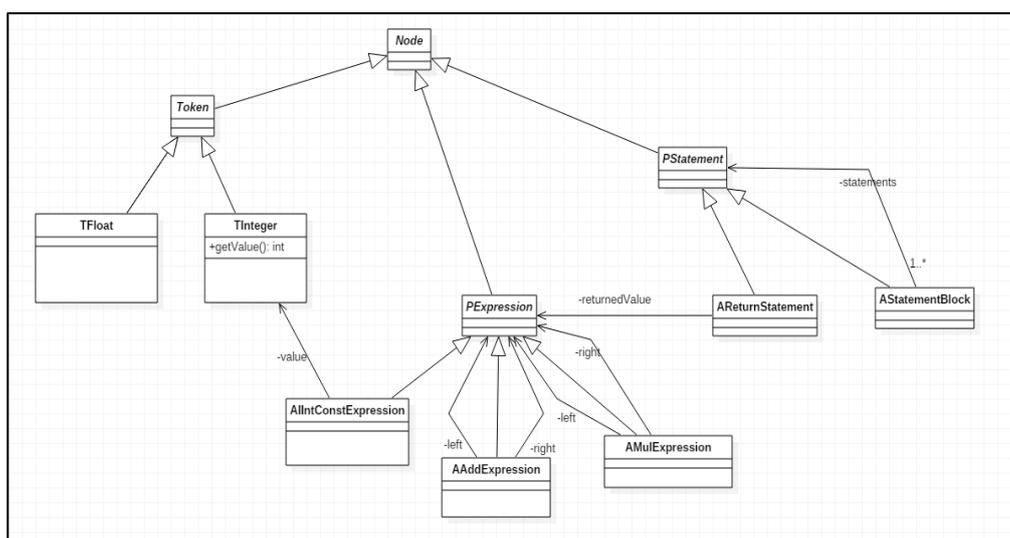


Рисунок 3. Вариант диаграммы классов синтаксического анализатора.

**Figure 3.** A variant of the parser class diagram.

Построение абстрактного синтаксического дерева начинается с определения правил распознавания терминальных и нетерминальных символов (токенов) и построения лексического анализатора в потоке буквенных символов текста. Здесь используется язык регулярных выражений и таблица переходов между состояниями.

Аналогичным образом определяется синтаксический анализатор. В качестве регулярного языка выступает нотация Бэкуса-Наура (РБНФ) для построения грамматики в терминах продукция и альтернатив. РБНФ оперирует потоком лексем, определенных в ходе лексического анализа [8].

### **МОДУЛЬ ИНТЕРПРЕТАЦИИ**

Модуль интерпретации отвечает за исполнение абстрактного синтаксического дерева программы и осуществляет контроль над временем жизни приложения. Цикл работы основных функций модуля, а также список составных частей представлен на рисунке 4:

- интерпретатор синтаксического дерева;
- планировщик задач;
- конфигуратор устройств;
- подключаемый модуль драйверов устройств.

Интерпретатор синтаксического дерева представлен классом `Interpreter` с методами `execute` и `process`. Метод `execute` выполняет чтение символов из текстового потока, делегирует синтаксическому анализатору задачу по трансляции текста в абстрактное синтаксическое дерево, управляет добавлением записей в журнал об ошибках, но главным образом – выполняет интерпретацию синтаксического дерева посредством вызова метода `process`.

Метод `process` выполняет анализ синтаксического дерева через полную его трассировку. Трассировка реализуется с применением шаблона проектирования «Посетитель» (рисунок 5) [11].

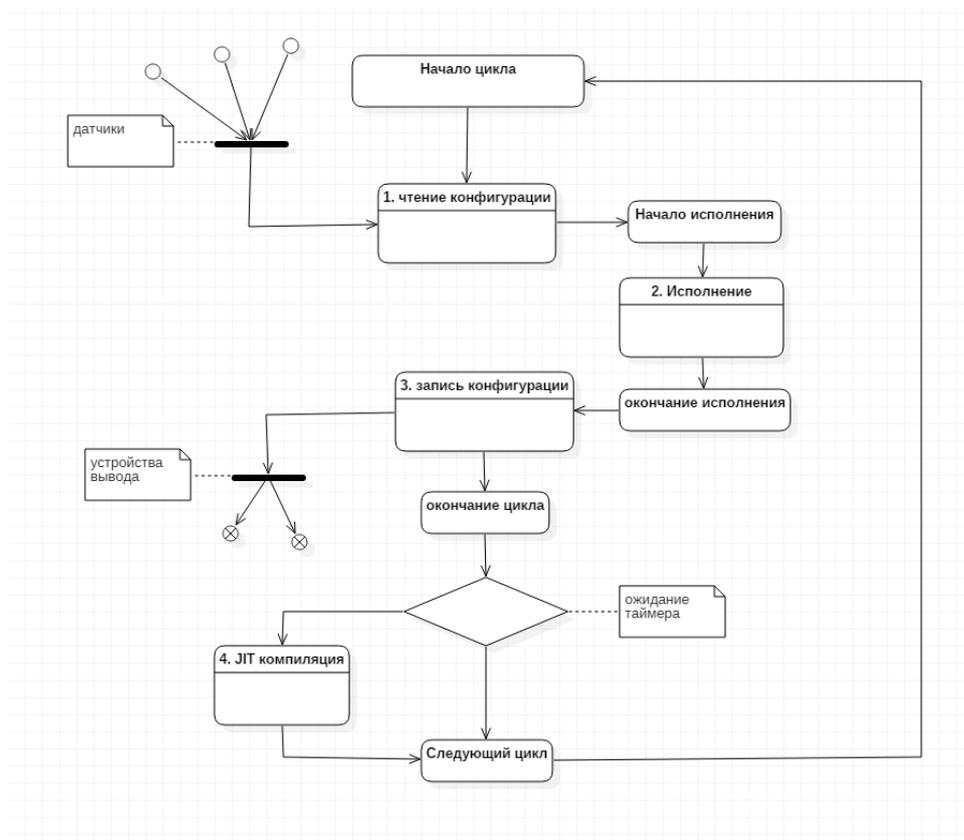


Рисунок 4. Диаграмма жизненного цикла исполняемой программы.

Figure 4. Diagram of the life cycle of an executable program.

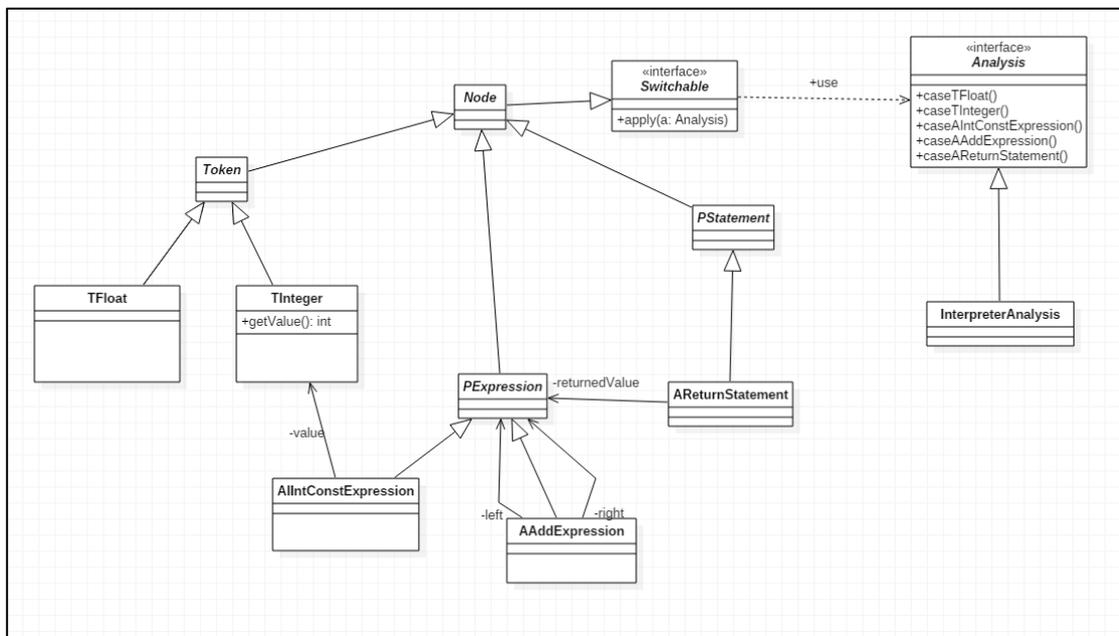


Рисунок 5. Диаграмма классов для модуля интерпретации.

Figure 5. Class diagram for the interpretation module.

Наименования элементов шаблона немного изменены без изменения сути. Каждый узел абстрактного синтаксического дерева реализует интерфейс `Switchable` с методом `apply` (в оригинальном изложении шаблона «Посетитель» интерфейс имеет другое название – «`Element`» с методом `accept` [11]). Реализация метода сводится к простому вызову соответствующего метода у объекта, переданного в качестве аргумента и реализующего интерфейс «`Analysis`» («`Visitor`»). Именно здесь и будет находиться логика интерпретации (исполнения) программного кода, ассоциированного с данным узлом абстрактного синтаксического дерева.

Важным аспектом интерпретации программного кода является контроль над областями видимости и временем жизни компонентов исполняемой программы – переменных и функций. Для обеспечения надежности исполнения, в классе «`InterpreterAnalysis`» будет использована хэш-таблица с именами и сигнатурами функций и переменных. Своевременное выполнение операций поиска, добавления и удаления привязок к объектам целевой программы позволит решить описанную выше проблему.

Управление памятью времени исполнения осуществляется за счет встроенного в JVM автоматического сборщика мусора [12].

## ПЛАНИРОВЩИК ЗАДАЧ

Стандарт МЭК 61131-3 поддерживает распределение вычислительных блоков программы (POU) между различными потоками исполнителя при помощи встроенного механизма задач. Задачи описываются инструкциями на языке ST в блоке конфигурации. Конфигурация задает цикл срабатывания каждой из задач, а также набор переменных окружения, описывающих взаимодействие программы на языке ST с оконечными устройствами автоматизации как в начале выполнения цикла (чтение конфигурации), так и в конце (запись конфигурации).

В описываемой реализации задачи выполняются параллельно в изолированных участках памяти, средствами встроенного в Java механизма `Executors` [13]. В случае использования глобальных переменных, захваченных при помощи модификатора `VAR_EXTERNAL`, на поток, обслуживающий задачу, во избежание состояния гонки ставится блокировка до окончания времени выполнения задачи.

Перед началом выполнения задачи происходит чтение данных из подключаемых устройств с занесением в локальные переменные при помощи модуля конфигурации устройств. По окончании цикла, измененные переменные записываются в выходной поток, и обрабатываются тем же модулем.

Допустим, что исполнение программного кода задачи занимает у интерпретатора, с учетом прерываний на конкурентное вычисление, некоторое время  $T$ . Чтение и запись занимают дополнительное время  $R$  и  $W$ .

В идеале, время  $T + R + W$  не должно превышать время, отведенное разработчиком на выполнение всего цикла программы, установленного в разделе конфигурации задачи. В противном случае, переход к следующему циклу будет выполнен позже установленного срока.

Если же время после выполнения цикла еще остается, то освободившиеся ресурсы интерпретатора могут быть потрачены на запущенный в фоне JIT-компилятор. Такое распределение ресурсов может быть достигнуто путем выбора настройки планировщика Java Executors.

## МОДУЛЬ КОНФИГУРАЦИИ УСТРОЙСТВ

Модуль конфигурации устройств представляет собой набор классов, организующих подключение к конечным устройствам из управляемого кода интерпретатора. Модуль отвечает за чтение и установку конфигурации в начале и конце исполнения цикла задач.

Каждое из устройств, подключенных к системе, должно самостоятельно определять как именно изменение того или иного параметра влияет на состояние его внешних интерфейсов. Описание логики взаимодействия каждого из таких устройств с внешней средой выходит за рамки возможностей языка программирования ST.

Описываемая виртуальная машина предлагает решение проблемы взаимодействия с внешней средой через систему драйверов, т.е. объектов класса, реализующих интерфейс Connector. Исходный код системы драйверов представлен в виде внешней, динамически подключаемой библиотеки (плагины), написанной на языке Java или любом другом совместимом с ней языке. Ответственность за реализацию драйверов, не включенных в поставку виртуальной машины, лежит на разработчике, занимающимся разработкой сценариев промышленной автоматизации. Реализация плагинов теоретически может быть ограничена только степенью поддержки используемых для нее сторонних библиотек со стороны компьютера или ПЛК, на которую установлена данная версия виртуальной машины Java. Например, не исключается возможность использования подсистемы JNI для вызова нативных интерфейсов [14].

Плагин должен содержать список классов устройств, реализующих интерфейс Connector (рисунок 6), а также класс Connectors, реализующий статический метод loadConnectors(). Метод loadConnectors() возвращает список устройств, зарегистрированных в системе.

Каждое устройство описывается следующим набором методов:

- getId() – возвращает уникальный идентификатор устройства;
- connect() – устанавливает подключение к устройству;
- close() – закрывает подключения к устройству;
- getConfig() – получает значения для набора переменных конфигурации;
- setConfig() – устанавливает значения конфигурации для устройств.

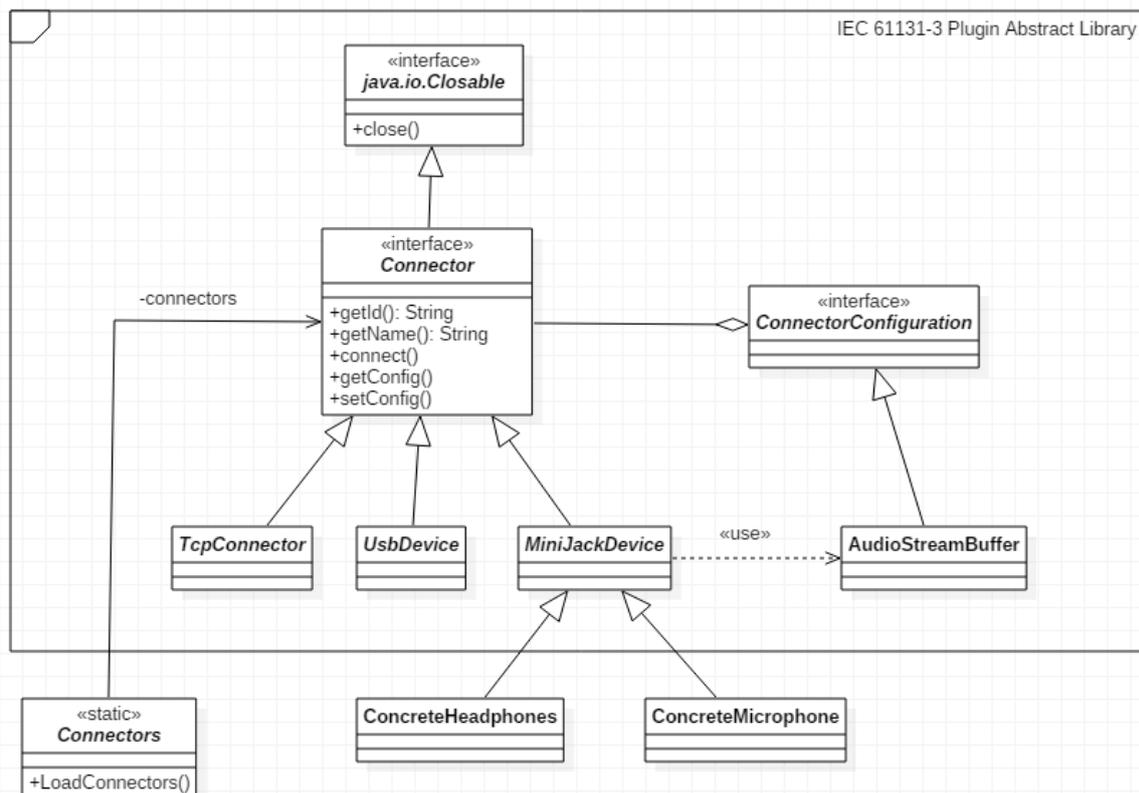


Рисунок 6. Архитектура плагина драйверов устройств.

Figure 6. Device driver plugin architecture.

## МОДУЛЬ JIT-КОМПИЛЯЦИИ

Архитектура данного модуля может быть реализована поверх того же шаблона проектирования, что и модуль интерпретатора. В проекте данного модуля потребуется описать еще одну реализацию шаблона «Посетитель» (рисунок 5), которая выполняла бы генерацию кода на низкоуровневом языке программирования Java-байткод и запускалась непосредственно из тела «InterpreterAnalysis» (рисунок 2) [11]. На более низком уровне, архитектура решения определяется возможностями сторонней библиотеки ASM, используемой для выполнения данной задачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы было проведено исследование предметной области в сфере инструментов промышленной автоматизации, исследованы различные среды выполнения для языка программирования Structured Text стандарта МЭК 61131-3 и произведен их сравнительный анализ. Была предложена и спроектирована модель трансляции языка программирования ST в режиме интерпретации на виртуальной машине Java с возможностью динамической компиляции в промежуточное представление – Java байткод.

Целью дальнейших исследований может являться анализ эффективности продукта с выбранным способом трансляции в сравнении с существующими аналогами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Karl-Heinz John, Michael Tiegelkamp, IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems. Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, Aids to Decision-making Tools. 2001; 376.
- [2] CODESYS Control SoftPLC [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.codesys.com/products/codesys-runtime.html>
- [3] IEC 61131-3 on ECLR (The PLCnext Runtime) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://plcnext-runtime.com/ch05-03-iec-programs.html>
- [4] International Standard IEC 61131-3 [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://d1.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_31/ourdev\\_569653.pdf](https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_31/ourdev_569653.pdf)
- [5] Dick Grune, Cerial J.H. Jacobs. Parsing Techniques A Practical Guide. 2003; 302.
- [6] JavaCC [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://github.com/javacc/javacc>

- [7] ANTLR [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.antlr.org/>
- [8] Расширенная форма Бэкуса-Наура [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/s026153\\_ISO\\_IEC\\_14977\\_1996\(E\).zip](https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/s026153_ISO_IEC_14977_1996(E).zip)
- [9] SableCC [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sablecc.org/>
- [10] GNU Bison [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://www.gnu.org/software/bison/manual/html\\_node/Java-Bison-Interface.html](https://www.gnu.org/software/bison/manual/html_node/Java-Bison-Interface.html)
- [11] J. W. Cooper. Java Design Patterns. A Tutorial. 2000; 257.
- [12] Richard Jones, Rafael Lins., Garbage Collection. Algorithms for Automatic Dynamic Memory Management. 1996; 257.
- [13] Шэнг Лиенг. Интерфейс JNI. Руководство по программированию и спецификация. 2022; 1.

## REFERENCES

- [1] Karl-Heinz John, Michael Tiegelkamp, IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems. Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, Aids to Decision-making Tools. 2001; 376.
- [2] CODESYS Control SoftPLC [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <https://www.codesys.com/products/codesys-runtime.html>
- [3] IEC 61131-3 on ECLR (The PLCnext Runtime) [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://plcnext-runtime.com/ch05-03-iec-programs.html>
- [4] International Standard IEC 61131-3 [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: [https://d1.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_31/ourdev\\_569653.pdf](https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_31/ourdev_569653.pdf)
- [5] Dick Grune, Cerial J.H. Jacobs. Parsing Techniques, A Practical Guide. 2003; 302.
- [6] JavaCC [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <https://github.com/javacc/javacc>
- [7] ANTLR [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <https://www.antlr.org/>
- [8] Rasshirennaya forma Bekusa-Naura [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: [https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/s026153\\_ISO\\_IEC\\_14977\\_1996\(E\).zip](https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/s026153_ISO_IEC_14977_1996(E).zip)
- [9] SableCC [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://sablecc.org/>
- [10] GNU Bison [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: [https://www.gnu.org/software/bison/manual/html\\_node/Java-Bison-Interface.html](https://www.gnu.org/software/bison/manual/html_node/Java-Bison-Interface.html)
- [11] J. W. Cooper. Java Design Patterns. A Tutorial. 2000; 257.

- [12] Richard Jones, Rafael Lins., Garbage Collection. Algorithms for Automatic Dynamic Memory Management. 1996; 257.
- [13] Sh. Lieng. Interfejs JNI. Rukovodstvo po programirovaniyu i specifikaciya. 2022; 1.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Дроздов Александр Витальевич,**  
Сибирский Федеральный Университет,  
кафедра информатики института  
космических и информационных  
технологий, Красноярск, Российская  
Федерация  
e-mail: drozdov.alexander.98@gmail.com

**Alexander Vitalievich Drozdov,**  
Siberian Federal University, Department of  
Informatics, Institute of Space and  
Information Technologies, Krasnoyarsk,  
Russian Federation  
e-mail: drozdov.alexander.98@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 28.06.2022; одобрена после рецензирования 18.08.2022; принята к публикации 19.08.2022.*

*The article was submitted 28.06.2022; approved after reviewing 18.08.2022; accepted for publication 19.08.2022.*

УДК: 007.51

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228>

## К вопросу учета опасностей при анализе надежности АСУ ТП опасных производств

П. А. Кузнецов<sup>1</sup>, Я. А. Тынченко<sup>1</sup>, В. В. Колесник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СибГУ имени М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Красноярская ГРЭС-2, Зеленогорск, Россия

**Аннотация.** В статье обоснована необходимость комплексного подхода к анализу надежности АСУ ТП с учетом стандартов МЭК 61508/МЭК 61511. Предлагается учитывать как опасность, так и уровень важности того или иного отказа компонентов АСУ ТП. Методика учёта показателей надежности АСУ ТП отличается от рассмотренных ранее иной функцией приоритета с учетом возможных дестабилизирующих факторов, воздействующих на систему резервирования. Важно, что для достижения требуемого уровня безопасности системы следует обеспечивать достижение ею показателей, заданных уровнем Safety Integrity Level. Такими показателями является SFF и вероятность опасных отказов, в частности, таким отказом будет считаться отказ модуля, оперирующего опасными энергиями или химическими веществами. В статье рассматривается типичный пример химически опасного производства (участок процесса получения поликарбоната). Приведенные в статье результаты иллюстрируют эффективность разработанного метода и его применимость к анализу и повышению показателей надежности АСУ ТП. Рассмотрен пример химического производства, однако следует отметить, что предложенный метод может быть применен для широкого круга технологических процессов опасных производств.

**Ключевые слова:** опасность, анализ надежности, автоматизация, система, производство, технологический процесс.

**Для цитирования:** Кузнецов, П., Тынченко, Я., & Колесник, В. (2022). К вопросу учета опасностей при анализе надежности АСУ ТП опасных производств. Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management, 1(1), 0217–0228. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228>

---

## On the issue of taking into account hazards in the analysis of the reliability of automated process control systems for hazardous industries

P. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, Ya. A. Tynchenko<sup>1</sup>, V. V. Kolesnik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Reshetnev Siberian State University, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Krasnoyarskaya GRES-2, Zelenogorsk, Russia*

**Abstract.** The article substantiates the need for an integrated approach to the analysis of the reliability of automated process control systems, taking into account IEC 61508 / IEC 61511 standards. It is proposed to take into account both the hazard and the level of importance of a particular failure of the components of an automated process control system. The methodology for taking into account the reliability indicators of APCS differs from those considered earlier by a different priority function, taking into account possible destabilizing factors affecting the redundancy system. It is important that in order to achieve the required level of system safety, it should be ensured that it achieves the indicators set by the Safety Integrity Level. Such indicators are SFF and the probability of dangerous failures, in particular, such a failure will be considered a failure of a module operating hazardous energies or chemicals. The article considers a typical example of a chemically hazardous production (a section of the polycarbonate production process). The results presented in the article illustrate the effectiveness of the developed method and its applicability to the analysis and improvement of the APCS reliability indicators. An example of chemical production is considered; however, it should be noted that the proposed method can be applied to a wide range of technological processes in hazardous industry.

**Keywords:** hazard, reliability analysis, automation, system, production, technological process.

**For citation:** Kuznetsov P., Tynchenko Ya., & Kolesnik V. (2022). On the issue of taking into account hazards in the analysis of the reliability of automated process control systems for hazardous industries. Informatics. Economics. Management, 1(1), 0217–0228. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228>

## ВВЕДЕНИЕ

Многие годы по всему миру непрерывно функционируют технически сложные и опасные производства [1-6], совершенствуются технологии, однако, всегда остается риск возникновения техногенных аварий, последствием которых являются серьезный ущерб для экологии. При этом ужесточаются и сами экологические стандарты. Безопасность и безотказность автоматизированных систем регламентируются современными стандартами МЭК 61508/МЭК 61511 [7-10]. В рамках этих стандартов безопасность систем оценивается как Safety Integrity Level (SIL) [11,12].

Таким образом, возникает необходимость повышения надёжности автоматизированных систем управления, с целью повышения надёжности функционирования технологических процессов.

Примером, технологических процессов, к которым предъявляются повышенные требования надёжности, являются процессы химических производств. В таких

технологических процессах зачастую используются опасные химические вещества, которые вследствие отказа оборудования могут оказать вредное воздействие на персонал и инфраструктуру [13-15].

При расчёте надежности следует учитывать исправность средств, регулирующих и контролирующих параметры эксплуатации. Средства автоматизации функционально связаны с оборудованием, осуществляющим технологический процесс.

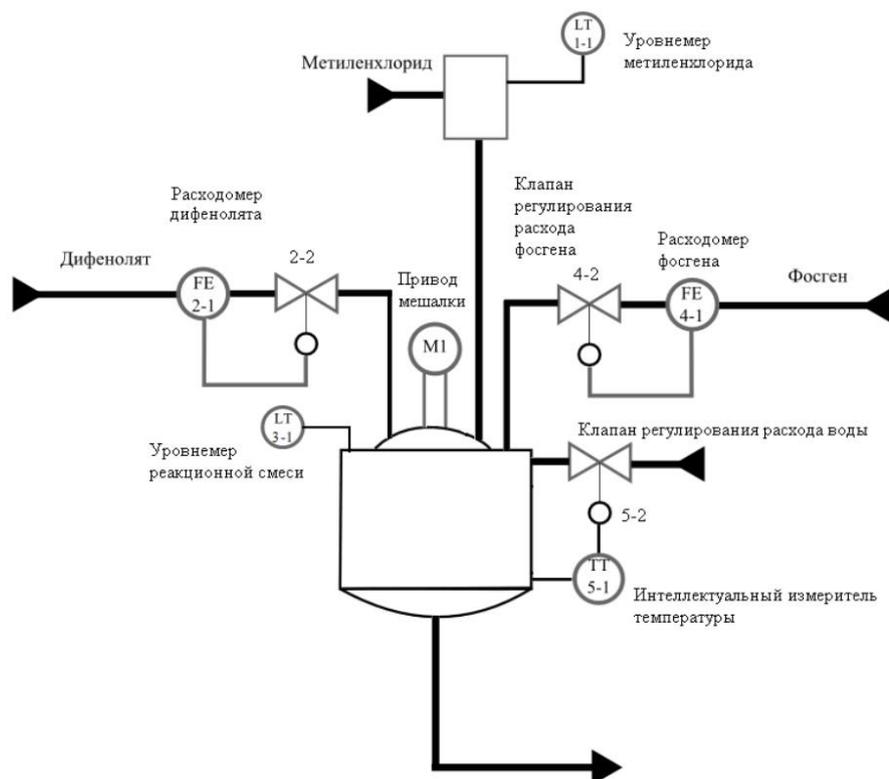
Контроль надежности технического состояния опасных производственных систем является неотъемлемой частью процесса их проектирования и разработки, причем анализ характеристик надежности выполняется на различных этапах разработки. Существующие на текущий момент решения [16, 17] не имеют возможности сделать это комплексно с учетом стандартов МЭК 61508/МЭК 61511.

Авторами предлагается осуществлять анализ надежности АСУ ТП комплексно, учитывая как опасность, так и уровень важности того или иного отказа. Рост значения надежности формируемой структуры системы характеризуется целевыми критериями, которые устанавливает разработчик, исходя из различных принципов обеспечения безопасности и безотказности.

В данной работе рассматриваемой системой управления будет АСУ участка процесса получения поликарбоната, описание которой представлено в [18].

На рисунке 1 представлена схема технологического процесса. Технологически участок описывается следующим образом.

Таким образом, рассматриваемый пример является типичным примером химически опасного производства, так как включает все минимально необходимые компоненты, характерные для данного технологического процесса, а именно, водный раствор дифенолята натрия, метиленхлорид и фосген.



**Рисунок 1.** Структурная схема участка АСУ ТП опасного производства.

**Figure 1.** Structural diagram of the APCS section of hazardous production.

## МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения задачи повышения надежности существуют различные структурные методы. Основываются они на введении резервных элементов. Такими методами могут быть метод полного дублирования, метод оптимизированного резервирования и предлагаемый метод учёта показателей надежности [16,19].

Метод полного дублирования предполагает включение резервного элемента в каждый функциональный модуль. Он является наименее трудоёмким с точки зрения затрат на проектирование, но одновременно малоэффективным с точки зрения показателей надежности, так как он не учитывает показатели модулей.

Метод оптимизированного резервирования предполагает решение задачи оптимизации показателей надежности проектируемой АСУ ТП с учётом общей надежности системы. Задача оптимизации резервирования решается, например, при помощи метода наискорейшего спуска [11]. При этом на построение резервированной системы отводится определенный набор ресурсов. Следует учесть, что с ростом сложности контролируемых систем, усложняется и анализ надежности компонентов,

составляющих резервированную систему. Известно, что при последовательном соединении элементов системы наибольшее приращение суммарной безотказности обеспечивает резервирование самого ненадежного модуля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как приращение суммарной безотказности обеспечивает резервирование самого ненадежного модуля, то при итерационном процессе, включающем добавление резервного элемента в модуль с наименьшей вероятностью безотказной работы, процедуру на данной итерации будет называться функцией выбора направления или функцией приоритета.

Предлагаемый метод учёта показателей надежности в первую очередь будет отличаться от рассмотренных ранее иной функцией приоритета.

Во-первых, рассматриваемую АСУ ТП следует разделить на подсистемы, выполняющие различные функции и выделить среди них главные функции, чтобы в дальнейшем обеспечить больший приоритет резервирования модулям, выполняющим их.

Для обеспечения безопасности системы следует обеспечивать достижение ею показателей, обеспечивающих заданный SIL. Такими показателями является Safe Failure Fraction (SFF) и вероятность опасных отказов. Таким отказом будет считаться отказ модуля, оперирующего опасными энергиями или химическими веществами.

Исходя из требований целевой вероятности безотказной работы главной функции АСУ ТП, предлагается для каждого функционального модуля, определив его тип, назначить блокирующий отказы модуль соответствующего типа.

Модуль, блокирующий отказ, имеет определенный набор характеристик надежности, включая расход ресурсов на реализацию. В работе [5] аналитически определена зависимость, согласно которой снижается вероятность отказа при использовании блокирующих модулей. Там же представлен анализ возможных дестабилизирующих факторов, действующих на систему резервирования.

С учетом вероятности отказа блокирующего модуля определим безотказность модуля АСУ ТП в следующем виде

$$P = (1 - (1 - P_2) \times (1 - P_b)) \times P_c,$$

где  $P$  — вероятность безотказной работы модуля после блокирования;  $P_2$  — вероятность безотказной работы без блокирования;  $P_b$  — вероятность блокирования;  $P_c$  — вероятность безотказной работы блокирующего модуля.

Функция приоритета для оценки надежности системы с учётом показателей надежности блокируемых модулей при возможных дестабилизирующих факторах будет иметь вид

$$PR_{ti} = (C_{pr} \cdot C_i) / (P_{mi}),$$

где  $i$  — индекс модуля, для которого определяется приоритет;  $C_i$  — коэффициент приоритета, зависящий от важности и опасности отказа модуля;  $P_{mi}$  — вероятность отказа модуля;  $C_{pr}$  — коэффициент приоритета, зависящий от опасности отказа элемента модуля.

Таким образом, предложенная методика учёта показателей надежности при резервировании позволяет итерационно формировать структуру АСУ ТП с высокой безотказностью. Методика позволяет учитывать требования стандартов МЭК 61508/МЭК 61511 к безопасности и на основе влияния механизмов блокирования снижать опасности и вероятности отказа.

Реализации предложенной методики осуществлена в рамках анализа надежности технологического процесса, представленного выше. Причем применение авторского метода учёта показателей надежности даёт лучшие результаты по сравнению с классическим подходом. В рамках пошаговой схемы реализации методики для рассмотренной АСУ ТП использовалась целевая вероятность  $P = 0,99$  и срок службы  $t = 5$  лет. Исходя из срока службы получены вероятности безотказной работы каждого модуля, которые в дальнейшем являются исходными данными для расчёта методики.

Далее выберем SIL для системы, равный 3. SFF для данного уровня будет равен 0,9, а вероятность опасного отказа 0,989. В этом случае для модулей с опасными отказами имеем: клапан регулирования расхода дифенолята - вероятность безотказной работы 0,99; клапан регулирования расхода фосгена – 0,999.

Итеративно вычисляя функцию приоритета и добавляя в структуру системы резервные элементы, строится структура надежности АСУ ТП, представляемая традиционно в виде дерева отказов. Расшифровка узлов дерева отказов представлена в [20]. События  $F1-F4$  описывают отказы основного и резервного расходомера и основного и резервного клапана дифенолята;  $F5-F8$  - отказы контроллера и шины сбора данных (основных и резервных);  $F9-F11$  - отказы расходомера и клапана фосгена

(основного и резервного);  $F12-F15$  - отказы термопреобразователя и клапана теплоносителя;  $F16-F19$  – отказы привода (основного и резервного) и уровнемера метилхлорида (основного и резервного);  $F20$  - отказ уровнемера реакционной смеси, соответственно (см. рисунок 1).

В виде логического выражения структура АСУ ТП будет выражаться следующим образом:

$$T1 = (F1 \wedge F2) \vee (F3 \wedge F4) \vee (F5 \wedge F6) \vee (F7 \wedge F8) \vee F9 \vee (F10 \wedge F11) \vee (F12 \wedge F13) \vee (F14 \wedge F15) \vee (F16 \wedge F17) \vee (F18 \wedge F19) \vee F20$$

$$T2 = (F1 \wedge F2) \vee (F3 \wedge F4) \vee (F5 \wedge F6) \vee (F7 \wedge F8) \vee F9 \vee (F10 \wedge F11) \vee (F12 \wedge F13) \vee (F14 \wedge F15) \vee (F16 \wedge F17)$$

Здесь  $T1$  - отказ всей АСУ ТП;  $T2$  - отказ функции регулирования АСУ ТП.

Модули с опасными отказами — клапаны, регулирующие расход фосгена и дифенолята, будут иметь вероятность безотказной работы, достаточную для достижения требуемого уровня SIL. Также общая их вероятность безотказной работы будет обеспечивать требуемый Safe Failure Fraction.

Сравнение работы метода полного дублирования, оптимизированного резервирования с применением наискорейшего спуска и метода учёта показателей надёжности даёт следующие результаты, представленные в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнение результатов работы методов.

**Table 1.** Comparison of the results of the methods.

Вероятность исправности	Метод полного дублирования	Метод оптимизированного резервирования	Метод учета показателей надежности
АСУ ТП опасного производства	0,87	0,91	0,94
Функции регулирования АСУ ТП	0,89	0,916	0,96

Представленные результаты подтверждают, что предложенный метод учёта показателей надёжности позволяет повысить безотказность и безопасность АСУ ТП за счёт снижения вероятности опасных отказов и достичь системе требуемого SIL.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый в статье метод базируется на учете показателей надежности, специфических для АСУ ТП. Он позволяет обеспечить не только высокую безотказность, но и требуемый стандартом МЭК уровень безотказности, что является особенно критичным для опасных производств.

Приведенные в статье результаты иллюстрируют эффективность разработанного метода и его применимость к анализу и повышению показателей надежности АСУ ТП. В статье рассмотрен пример химического производства, однако, предложенный метод применим для широкого круга технологических процессов опасных производств.

Преимуществом метода является то, что он включает в себя не только применение принципов резервирования, но и других структурных принципов. Метод позволяет использовать не только математические расчёты, но и экспертные знания, накапливая и обрабатывая их в перспективе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хисаева Л.И. Промышленная безопасность (опасные производственные объекты). Евразийский Союз Ученых. 2016; 29-2: 42-44.
- [2] Боркин В.С. Особенности системного анализа и моделирования потенциально опасных операций технологических процессов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014; 1: 370-374.
- [3] Майструк А.В. Управление безопасностью эксплуатации сложных технических систем: математические методы и практика их применения. М.: ВА РВСН им. Петра Великого; 2007. 256 с.
- [4] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S. The efficiency analysis of automated lines of companies based on DEA method. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. 2014; 675: 107-115.
- [5] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S., Bahmareva K., Denisova E. The efficiency analysis of the automated plants. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012007.
- [6] Kovalev I.V., Zelenkov P.V., Tsarev M.Y. The control of developing a structure of a catastrophe-resistant system of information processing and control. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012008.
- [7] Bell R. IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmed electronic

- safety-related systems: Overview. *Computing and Control Engineering*. 1999; 11(1): 5/1-5/5.
- [8] Gall H. "Functional safety IEC 61508 /IEC 61511 the impact to certification and the user. "Proceedings of the 2008 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, ser. AICCSA '08. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. 2008; 1027-1031. doi:10.1109/AICCSA.2008.4493673
- [9] Белозеров В.В., Белозеров В.В. Автоматизация создания АСУТП опасных производственных объектов. *Электроника и электротехника*. 2017; 2: 27-42.
- [10] Шакуров С.А., Мендыбаев С.А. Надежность - как важнейшее качество при проектировании АСУТП. *Наука и техника Казахстана*. 2015; 1-2: 130-134.
- [11] Lee Y., Kim J., Il. M. A verification of fault tree for safety integrity level evaluation. *ICCAS-SICE 2009 - ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Proceedings*. 2009.
- [12] Rástočný K., Ždánky J. Influence of redundancy on safety integrity of SRCS with safety PLC. 2014. doi:10.1109/ELEKTRO.2014.6848947:508-512
- [13] Слепова А.Ш. Факторы надежности и эффективности автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами. *Наука и современность*. 2013; 21: 145-150.
- [14] Bozek A., Anhalt J., Chin J. The use of infrared emission detection and fugitive emission quantification technologies as a basis for hazardous area classification design. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015; 51: 142-147. doi:10.1109/TIA.2014.2348075
- [15] Ilonen J., Kamarainen J.-K., Kalviainen H., Anttalainen O. Automatic detection and recognition of hazardous chemical agents. *Digital Signal Processing*. 2002 14th International Conference. 2002; 2: 1345-1348.
- [16] Kohlik M., Borecky J., Kubatova H. Miscellaneous Types of Partial Duplication Modifications for Availability Improvements. *Proceedings - 15th Euromicro Conference on Digital System Design*. 2012; 79-83. doi:10.1109/DSD.2012.86
- [17] Пищик Б.Н. Безопасность АСУ ТП. *Вычислительные технологии*. 2013; 18: 170-175.
- [18] Лазарева Л.Г., Богословская Н.М. Анализ стадии синтеза производственного процесса получения поликарбоната. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2015; 1: 169-171.
- [19] Будникова И.К., Приймак Е.В. Моделирование показателей качества технологического процесса с применением программы Statistica. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012; 15(15): 247-249.

[20] Кузнецов П.А. Опасные отказы в АСУ ТП. Научные исследования и разработки молодых ученых. 2015; 4: 97-100.

## REFERENCES

- [1] Hisaeva L.I. Promyshlennaya bezopasnost' (opasnye proizvodstvennye ob"ekty). Evrazijskij Soyuz Uchenyh. 2016; 29-2: 42-44.
- [2] Borkin V.S. Osobennosti sistemnogo analiza i modelirovaniya potencial'no opasnyh operacij tekhnologicheskikh processov. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2014; 1: 370-374.
- [3] Majstruk A.B. Upravlenie bezopasnost'yu ekspluatacii slozhnyh tekhnicheskikh sistem: matematicheskie metody i praktika ih primeneniya. M.: VA RVSN im. Petra Velikogo; 2007. 256 s.
- [4] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S. The efficiency analysis of automated lines of companies based on DEA method. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. 2014; 675: 107-115.
- [5] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S., Bahmareva K., Denisova E. The efficiency analysis of the automated plants. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012007.
- [6] Kovalev I.V., Zelenkov P.V., Tsarev M.Y. The control of developing a structure of a catastrophe-resistant system of information processing and control. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012008.
- [7] Bell R. IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmed electronic safety-related systems: Overview. Computing and Control Engineering. 1999; 11(1): 5/1-5/5.
- [8] Gall H. "Functional safety IEC 61508 /IEC 61511 the impact to certification and the user. "Proceedings of the 2008 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, ser. AICCSA '08. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. 2008; 1027-1031. doi:10.1109/AICCSA.2008.4493673
- [9] Belozarov V.V., Belozarov V.V. Avtomatizaciya sozdaniya ASUTP opasnyh proizvodstvennyh ob"ektov. Elektronika i elektrotehnika. 2017; 2: 27-42.
- [10] Shakurov S.A., Mendybaev S.A. Nadezhnost' - kak vazhnejshee kachestvo pri proektirovanii ASUTP. Nauka i tekhnika Kazahstana. 2015; 1-2: 130-134.
- [11] Lee Y., Kim J., Il. M. A verification of fault tree for safety integrity level evaluation. ICCAS-SICE 2009 - ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Proceedings. 2009.
- [12] Rástočný K., Ždánsky J. Influence of redundancy on safety integrity of SRCS with safety

PLC. 2014. doi:10.1109/ELEKTRO.2014.6848947:508-512

[13] Slepova A.Sh. Faktory nadezhnosti i effektivnosti avtomatizirovannyh sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami i proizvodstvami. Nauka i sovremennost'. 2013; 21: 145-150.

[14] Bozek A., Anhalt J., Chin J. The use of infrared emission detection and fugitive emission quantification technologies as a basis for hazardous area classification design. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015; 51: 142-147. doi:10.1109/TIA.2014.2348075

[15] Ilonen J., Kamarainen J.-K., Kalviainen H., Anttalainen O. Automatic detection and recognition of hazardous chemical agents. Digital Signal Processing. 2002 14th International Conference. 2002; 2: 1345-1348.

[16] Kohlik M., Borecky J., Kubatova H. Miscellaneous Types of Partial Duplication Modifications for Availability Improvements. Proceedings - 15th Euromicro Conference on Digital System Design. 2012; 79-83. doi:10.1109/DSD.2012.86

[17] Pishchik B.N. Bezopasnost' ASU TP. Vychislitel'nye tekhnologii. 2013; 18: 170-175.

[18] Lazareva L.G., Bogoslovskaya N.M. Analiz stadii sinteza proizvodstvennogo processa polucheniya polikarbonata. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova. 2015; 1: 169-171.

[19] Budnikova I.K., Prijmak E.V. Modelirovanie pokazatelej kachestva tekhnologicheskogo processa s primeneniem programmy Statistica. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2012; 15(15): 247-249.

[20] Kuznetsov P.A. Opasnye otkazy v ASU TP. Nauchnye issledovaniya i razrabotki molodyh uchenyh. 2015; 4: 97-100.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Кузнецов Петр Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов СибГУ имени М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия  
e-mail: forubox@yandex.ru

**Kuznetsov P.A.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Reshetnev Siberian State University, Krasnoyarsk, Russia  
e-mail: forubox@yandex.ru

**Тынченко Ядвига Александровна**, аспирант кафедры системного анализа и исследования операций СибГУ имени М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия  
e-mail: t080801@yandex.ru

**Tynchenko Ya.A.**, graduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia  
e-mail: t080801@yandex.ru

**Колесник Валерий Васильевич**,  
заместитель начальника цеха, Филиал АО  
«Енисейская ТГК (ТГК-13)» -  
«Красноярская ГРЭС-2», Зеленогорск,  
Россия  
e-mail: balans78@inbox.ru

**Kolesnik V.V.**, Deputy Head of Workshop,  
Branch of JSC "Yenisei TGC (TGC-13)" -  
"Krasnoyarskaya GRES-2", Zelenogorsk,  
Russia  
e-mail: balans78@inbox.ru

*Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 19.08.2022; принята к публикации 23.08.2022.*

*The article was submitted 15.07.2022; approved after reviewing 19.08.2022; accepted for publication 23.08.2022.*

УДК: 004.02

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0229-0237>

## Обзор инструментов кластеризации в SEO-проектировании

А.А. Яблокова

*Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений, г. Красноярск, Россия  
Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия*

**Аннотация.** В статье приведена краткая характеристика методов кластеризации, рассмотрен ряд инструментов кластеризации ключевых слов в SEO – проектировании в соответствии с методами кластеризации: логической группировки, семантической группировки и группировки по топам поисковой выдачи. Отмечается, что для каждого метода кластеризации предусмотрен ряд специальных инструментов, даны рекомендации для успешного разделения ключевых слов на кластеры. Рекомендуется первоначально разбить ключи с помощью утилит на основе семантической схожести и определить интент, а затем соотнести результаты с результатами группировки по топам поисковой выдачи той системы, под которую будет оптимизирован ресурс. Далее на основе корреляции результатов вносятся изменения в кластеры.

**Ключевые слова:** семантическое ядро, кластеризация, логическая группировка, группировка по топам SERP, группировка по семантической схожести, инструменты кластеризации

**Для цитирования:** Яблокова А. (2022). Обзор инструментов кластеризации в SEO-проектировании. Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management, 1(1), 0229–0237. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0229-0237>

---

## Tools for keyword clustering in SEO

A.A. Yablokova

*Krasnoyarsk Regional Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations, Krasnoyarsk, Russia  
Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia*

**Abstract.** The article provides a brief description of clustering methods, considers a number of keyword clustering tools in SEO - design in accordance with clustering methods: logical grouping, semantic grouping and grouping by search results tops. It is noted that for each clustering method a number of special tools are provided, recommendations are given for the successful division of keywords into

clusters. It is recommended to initially split the keys using utilities based on semantic similarity and determine the intent, and then correlate the results with the results of grouping by the tops of the search results of the system for which the resource will be optimized. Further, based on the correlation of the results, changes are made to the clusters.

**Keywords:** semantic core, clustering, logic-based keyword clustering, SERP-based keyword clustering, semantic-based keyword clustering, tools for keyword clustering

**For citation:** Yablokova A. (2022). Tools for keyword clustering in SEO. Informatics. Economics. Management, 1(1), 0229–0237. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0229-0237>

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросам семантического поиска, классификации, структуризации и интеграции информации в контексте SEO – проектирования уделяется достаточно много внимания исследователями в области информационных технологий [1-3]. Одним из первых этапов разработки сайта является именно этап SEO – проектирования, в рамках которого закладывают основу для последующей индексации и продвижения ресурса через SERP. На этапе SEO – проектирования составляют семантическое ядро из ключевых слов, характеризующих тематику ресурса и распределяемых на кластеры в соответствии с общим свойством группируемых слов.

Выделяют три метода кластеризации: логическая группировка, семантическая группировка, группировка по топам поисковой выдачи. Метод кластеризации ключевых слов выбирают исходя из объема семантического ядра, тематики и типа сайта и полноты соответствия общему свойству, заданному в качестве тематического маркера [4].

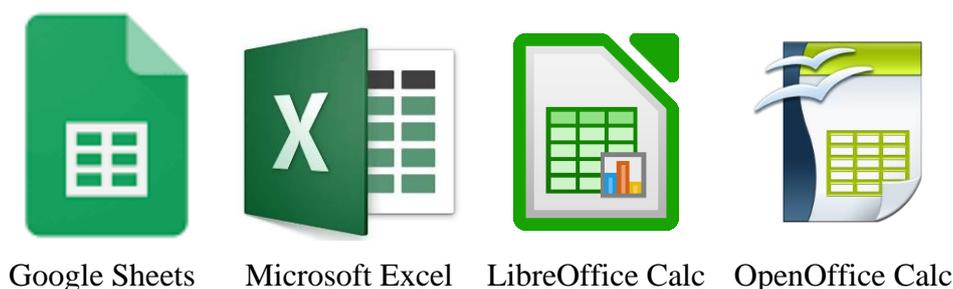
Рассмотрим инструменты группировки ключевых слов на кластеры в соответствии с разбивкой по методам кластеризации.

## ЛОГИЧЕСКАЯ ГРУППИРОВКА

Метод логической группировки используют для простых коммерческих сайтов, (сайт-визитка, лендинг, веб-портфолио, промо-сайт, сайт-витрина), семантические ядра которых содержат до нескольких сотен ключевых слов.

Группировка проводится вручную в одну или несколько итераций: выбирается тематический маркер, который, как правило, является одним из высокочастотных ключей из семантического ядра. При условии наличия смысловой близости с тематическим маркером ключевое слово добавляется в кластер [5]

Для группировки ключевых слов в ручном режиме используют облачные и локальные табличные процессоры [табличные процессоры – это комплекс прикладных программ, предназначенных для обработки информации, проведения расчетов и визуального представления результатов расчетов в виде графиков и диаграмм], наиболее популярными среди которых являются: Google Sheets, Microsoft Excel, LibreOffice Calc и OpenOffice Calc [6, 7].



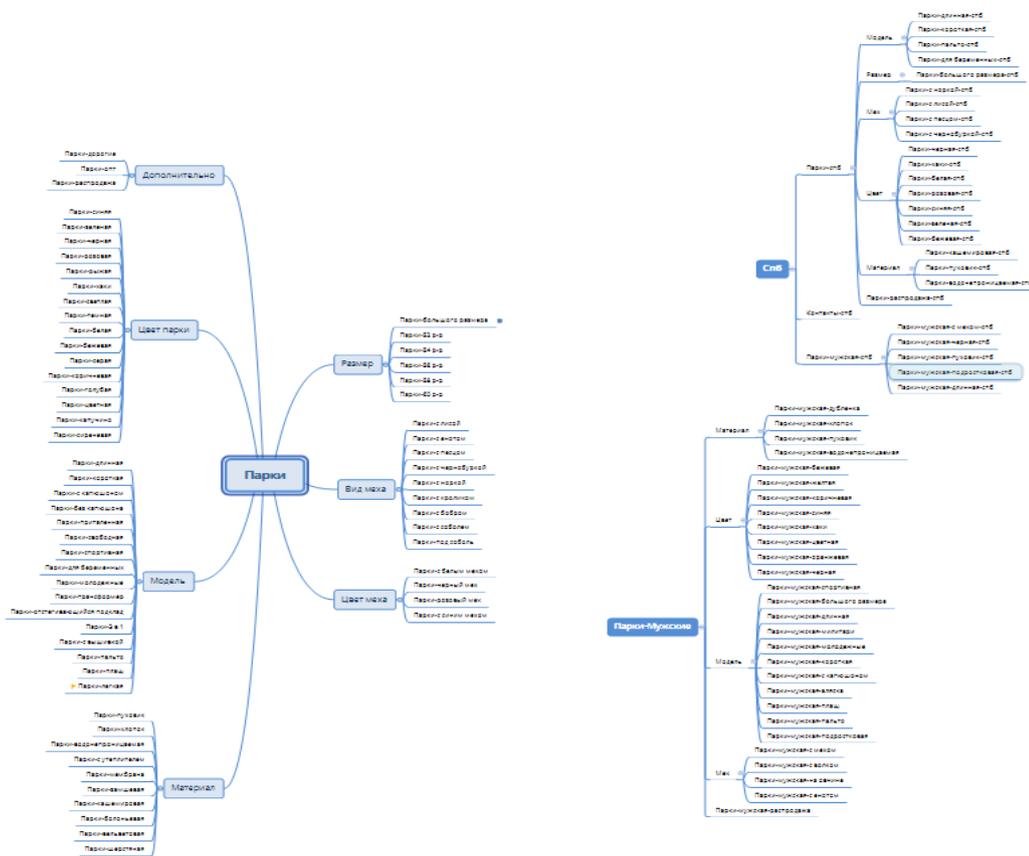
**Рисунок 1.** Облачные и локальные табличные процессоры.  
**Figure 1.** Cloud and local spreadsheets.

В табличный процессор загружают список ключевых слов и сортируют по частотности, которую определяют с помощью разных сервисов, к примеру, Яндекс. Вордстата. Слова, которые обладают самой высокой частотностью, используют в качестве общих свойств, т.е. тематических маркеров, вокруг которых выстраивают средне – и низкочастотные ключевые слова с разделением по коммерческому и информационному интену ключевых слов.

Существуют отдельные плагины и надстройки для табличных процессоров. К примеру, для Microsoft Excel был разработан плагин, который позволял обрабатывать разные по размеру семантические ядра. Кластеризация сводилась к следующему: в табличный процессор загружается семантическое ядро с указанием частотности ключевых слов, вычисляются доли весов, формируется справочная таблица с весами слов, выделяются леммы для слов, вычисляют вес лемм, формируют справочную таблицу с леммами, проводят первичную кластеризацию, укрупняют полученные группы.

На основе плагина создана надстройка Power Query, автоматизирующая механические действия плагина и сокращающая время обработки данных [8].

Иногда для логической кластеризации используют ментальные карты, к примеру, XMind или MindMeister.



**Рисунок 2.** Пример кластеризации в виде ментальной карты.

**Figure 2.** An example of clustering in the form of a mental map.

Логическая группировка дает достаточно точный результат, но не рекомендуется использовать этот метод для кластеризации семантических ядер, которые содержат более несколько сотен слов, т.к. легко сбиться с принципа группировки, пропустить ключ или некорректно определить поисковой интент.

### ГРУППИРОВКА ПО СЕМАНТИЧЕСКОЙ СХОЖЕСТИ

Метод группировки по семантической схожести применяют преимущественно для крупных коммерческих сайтов (агрегаторов, интернет-магазинов, сайтов услуг, маркетплейсов), семантические ядра которых включают в себя тысячи ключевых слов, т.к. метод основан на применении нейросетевых алгоритмов, что требует долгосрочной и дорогостоящей разработки формул и обучения нейросети для обработки и сегментации ключевых слов в автоматическом режиме.

Суть кластеризации заключается в разделении ключевых слов с учетом весовых коэффициентов на кластеры по смысловому совпадению. Выбирается тематический маркер с тяжелым весом, как и в случае с логической группировкой, маркер является одним из высокочастотных ключей из семантического ядра. При условии пересечения с маркером с тяжелым весом в кластер попадут семантические близкие ключи. В некоторых алгоритмах помимо требования семантической схожести может быть установлено дополнительное свойство для вхождения в кластер по морфологическому признаку.

Несмотря на то, что метод семантической схожести сложен в разработке, существует ряд упрощенных приложений, основанных на семантической кластеризации, к которым относятся Cluster Army, SpyFu, Simple SEO tool [9].

Следует учитывать, что автоматическая группировка дает достаточно точный результат, но кластеризация по семантической схожести не учитывает поисковый интент, поэтому определять интент ключей на коммерческую необходимость вручную или посредством сервиса определения процента коммерциализации.

## **ГРУППИРОВКА ПО ТОПАМ ПОИСКОВОЙ ВЫДАЧИ**

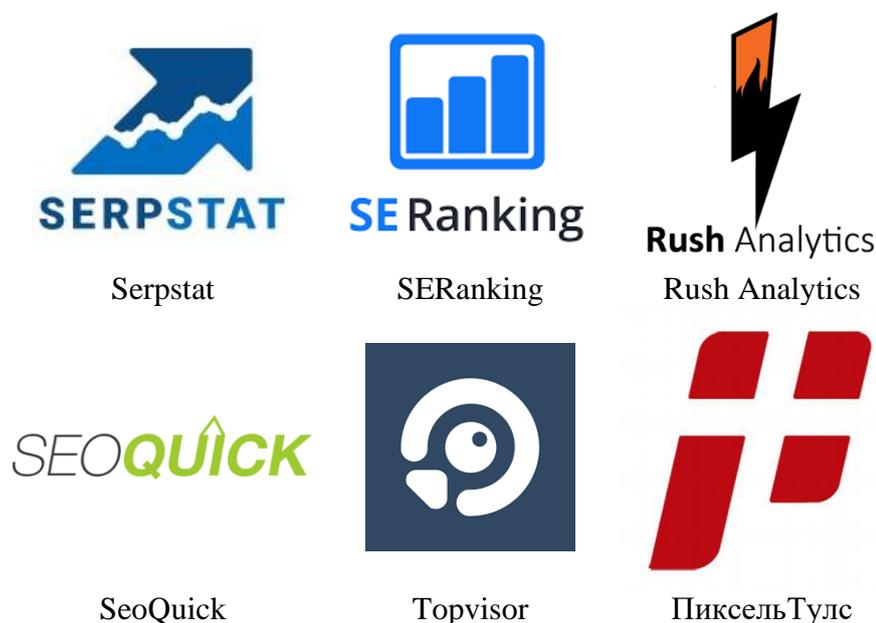
Группировка по топам SERP поисковых систем может проводиться тремя способами: soft (мягкая), middle / moderate (умеренная) и hard (строгая). Мягкая кластеризация применяется в двух случаях: тематика сайта неконкурентная или для ресурса важно количество визитов, но не качество трафика. Строгая кластеризация используется для продвижения крупных коммерческих ресурсов и высококонкурентных тематик. Умеренную кластеризацию рекомендуют применять для продвижения коммерческих ресурсов в определенном регионе.

Суть кластеризации заключается в поиске пересечений ключевых слов на страницах сайтов, находящихся в топе поисковой выдачи. Поисковые системы формируют SERP на основании факторов ранжирования. Параметры, по которым оценивается сайт и определяется его позиция в органической выдаче, для каждой поисковой системы индивидуальны. Поэтому ключевые слова из семантического ядра поочередно проверяются и по каждому ключу составляется топ SERP в рамках конкретной поисковой системы. Результаты поиска по каждому из ключевых слов сравнивают с тематическим маркером на предмет одинаковых адресов страниц и в

зависимости от установленного порога пересечений ключевые слова объединяют в кластер.

При мягкой кластеризации ключевое слово попадет в кластер, если при сравнении с тематическим маркером количество общих адресов в топе SERP будет соответствовать установленному порогу пересечений. В кластере все ключевые слова связаны с маркером, но между собой по количеству общих адресов могут не пересекаться. При строгой кластеризации, как и при мягкой, ключевые слова сравниваются с маркером, но и дополнительно между собой. Для включения в группу ключи должны пересекаться не только с маркером по установленному порогу пересечений, но и между собой. При умеренной кластеризации ключевые слова связаны с маркером по установленному порогу пересечений, между собой обязательно связаны, но в разных парах количество общих адресов – разное [10].

К ряду основных инструментов кластеризации по топам SERP относятся онлайн – сервисы, среди которых наиболее популярными являются Serpstat, SERanking, Rush Analytics, SeoQuick, Topvisor и ПиксельТулс. Общий принцип работы данных сервисов заключается в загрузке в систему списка ключевых слов, выбора способа кластеризации, установке порога пересечений и выбора поисковой системы.



**Рисунок 3.** Инструменты кластеризации для SERP.

**Figure 3.** Clustering tools for SERP.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим, что для каждого метода кластеризации предусмотрены определенные инструменты. Но для успешного разделения ключевых слов на кластеры рекомендуется использовать следующую комбинацию: первоначально разбить ключи с помощью утилит на основе семантической схожести и определить интент, а затем соотнести результаты с результатами группировки по топам поисковой выдачи той системы, под которую будет оптимизирован ресурс. На основе корреляции результатов внести изменения в кластеры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Прокимнов Н.Н. Технологии использования информационных ресурсов Интернета, Прикладная информатика, 5, 2008, 51-80.
- [2] Кравченко Ю.А. Задачи семантического поиска, классификации, структуризации и интеграции информации в контексте проблем управления знаниями, Известия Южного федерального университета. Технические науки, 7 (180), 2016, 5-18.
- [3] Чамина О.Г., Бексаева Е.А. SEO-аналитика веб-ресурсов электронной коммерции, Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, 3 (15), 2015, 180-188.
- [4] Бохонок А., Синявский А. Кластеризация семантического ядра: что это, для чего нужно. URL: <https://elit-web.com/blog/klasterizaciya-semanticheskogo-yadra> (дата обращения: 01.08.2022).
- [5] Давиденко А. Полный гайд по кластеризации семантического ядра. URL: <https://kokoc.com/blog/klasterizaciya-zaprosov/> (дата обращения: 01.08.2022).
- [6] Миронов В. Инструменты для кластеризации запросов (семантического ядра). URL: <https://topodin.com/seo/post/instrumenty-dlya-klasterizatsii-zaprosov-semanticheskogo-yadra> (дата обращения: 01.08.2022).
- [7] Игошин Р. Excel-кластеризатор ключевых слов по весу. URL: <https://www.it-agency.ru/academy/excel-clusterer> (дата обращения: 01.08.2022).
- [8] Игошин Р. Кластеризатор ключевых слов на Power Query. URL: <https://www.it-agency.ru/academy/power-query-keywords-clusterizer/> (дата обращения: 01.08.2022).
- [9] Кластеризация семантического ядра: алгоритмы и подходы популярных SEO-инструментов. URL: <https://serpstat.com/ru/blog/kak-provesti-klasterizatciyu-zaprosov-s-promoshyu-serpstat/> (дата обращения: 01.08.2022).

[10] Ашманов И. С. Оптимизация и продвижение в поисковых системах. Санкт-Петербург: Питер, 2019. 512.

[11] Усачёв А.В., Яблокова А.А. Методы кластеризации в SEO проектировании: материалы II Всероссийской научной конференции «Наука, технологии, общество (НТО-II-2022)». 28-30 июля 2022, Красноярск; 2022: 233-238.

## REFERENCES

[1] Prokimnov N.N. Tekhnologii ispol'zovaniya informacionnyh resursov Interneta, Prikladnaya informatika, 5, 2008, 51-80 (in Russian).

[2] Kravchenko YU.A. Zadachi semanticheskogo poiska, klassifikacii, strukturizacii i integracii informacii v kontekste problem upravleniya znaniyami, Izvestiya YUzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 7 (180), 2016, 5-18 (in Russian).

[3] CHamina O.G., Beksaeva E.A. SEO-analitika veb-resursov elektronnoj kommercii, Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve, 3 (15), 2015, 180-188 (in Russian).

[4] Bohonok A., Sinyavskij A. Klasterizaciya semanticheskogo yadra: chto eto, dlya chego nuzhno. URL: <https://elit-web.com/blog/klasterizaciya-semanticheskogo-yadra> (data obrashcheniya: 01.08.2022) (in Russian).

[5] Davidenko A. Polnyj gajd po klasterizacii semanticheskogo yadra. URL: <https://kokoc.com/blog/klasterizaciya-zaprosov/> (data obrashcheniya: 01.08.2022) (in Russian).

[6] Mironov V. Instrumenty dlya klasterizacii zaprosov (semanticheskogo yadra). URL: <https://topodin.com/seo/post/instrumenty-dlya-klasterizatsii-zaprosov-semanticheskogo-yadra> (data obrashcheniya: 01.08.2022) (in Russian).

[7] Igoshin R. Excel-klasterizator klyuchevyh slov po vesu. URL: <https://www.it-agency.ru/academy/excel-clusterer> (data obrashcheniya: 01.08.2022) (in Russian).

[8] Igoshin R. Klasterizator klyuchevyh slov na Power Query. URL: <https://www.it-agency.ru/academy/power-query-keywords-clusterizer/> (data obrashcheniya: 01.08.2022) (in Russian).

[9] Klasterizaciya semanticheskogo yadra: algoritmy i podhody populyarnyh SEO-instrumentov. URL: <https://serpstat.com/ru/blog/kak-provesti-klasterizatsiyu-zaprosov-s-pomoshyu-serpstat/> (data obrashcheniya: 01.08.2022) (in Russian).

[10] Ashmanov I. S. Optimizaciya i prodvizhenie v poiskovyh sistemah. Sankt-Peterburg:

Piter, 2019. 512 (in Russian).

[11] Usachov A.V., Yablokova A.A. Metody klasterizacii v SEO proektirovanii: materialy II Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Nauka, tekhnologii, obshchestvo (NTO-II-2022). 28-30 iyulya 2022, Krasnoyarsk; 2022: 233-238 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алена Александровна Яблокова,**  
аспирант, Красноярский краевой Дом науки  
и техники Российского союза научных и  
инженерных общественных объединений,  
г. Красноярск, Россия  
e-mail: alena.yabl@yandex.ru

**Alena A. Yablokova**  
Post-graduate, Krasnoyarsk Regional Science  
and Technology City Hall of the Russian Union  
of Scientific and Engineering Public  
Associations, Krasnoyarsk, Russia  
e-mail: alena.yabl@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 22.07.2022; одобрена после рецензирования 18.08.2022; принята к публикации 23.08.2022.*

*The article was submitted 22.07.2022; approved after reviewing 18.08.2022; accepted for publication 23.08.2022.*

# Тематика журнала

---

## **Информатика, вычислительная техника:**

- Информатика, математическое моделирование, статистика
- Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей
- Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- Инфокоммуникационные технологии
- Компьютерное моделирование
- Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети
- Теоретические основы информатики
- Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления
- Программная инженерия и кибернетика

## **Системный анализ, управление и обработка информации:**

- Управление в социальных и экономических системах
- Управление в организационных системах
- Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- Методы и системы защиты информации, информационная безопасность
- Квантовые методы обработки информации
- Интеллектуальные технические системы в производстве и промышленной практике
- Исследование операций и принятие решений
- Анализ больших данных

## **Экономика и финансы:**

- Экономическая теория
- Экономика и управление народным хозяйством
- Финансы, денежное обращение и кредит
- Бухгалтерский учет, статистика
- Математические и инструментальные методы экономики
- Мировая экономика
- Цифровая экономика
- Модернизация экономики регионов

## **Экономика и управление АПК:**

- Организация и экономика сельскохозяйственного производства
- Менеджмент в АПК
- Государственное, муниципальное управление и кадровая политика
- Информационные технологии и математическое обеспечение информационных систем
- Устойчивое развитие: психология, педагогика и экология человека
- Логистика и маркетинг в АПК

## **Образование:**

- Информационно-коммуникационные технологии в управлении образованием
- STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) образование и WorldSkills
- Цифровизация и использование искусственного интеллекта в профессиональном образовании
- Теоретические основы, аппаратное и программное обеспечение электронного обучения
- Виртуальное обучение и виртуальная реальность
- Геймификация в образовании