



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**2024 Том 25 № 2**

**DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2**

**<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>**

**Научный журнал**

**Издается с 2000 г.**

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

**Свидетельство о регистрации** ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

**Учредитель:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

**Главный редактор**

**Разумный Юрий Николаевич** — доктор технических наук, профессор, директор инженерной академии, директор департамента механики и механики инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Заместитель главного редактора**

**Резник Сергей Васильевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», факультет «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Ответственный секретарь**

**Агасиева Светлана Викторовна** — кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Члены редакционной коллегии**

**Агравал Бридж** — профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

**Алифанов Олег Михайлович** — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**Варатараджу Ренугант** — профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

**Василе Массимилиано Л.** — профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

**Вивiani Антонио** — профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

**Гасбарри Паоло** — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Герман Анна** — профессор, Университет Бейра-Интернор, Ковильян, Португалия

**Гитас Иоаннис Зоис** — профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

**Грациани Филиппо** — почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Гурфил Пини** — почетный профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

**Джеа Мориба** — доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

**Джесента Дзанкарло** — профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

**Кавагути Дзюнъитиро** — профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

**Кадугин Владимир Тимофеевич** — доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Капустин Владимир Михайлович** — доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

**Кузнецов Николай Борисович** — профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

**Линарес Ричард** — профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

**Матюшин Максим Михайлович** — доктор технических наук, Центр управления полетами ЦНИИмаш, ГК «Роскосмос», Королев, Россия

**Медведев Андрей Всеволодович** — доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

**Мисра Арун** — профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

**Мортари Даниэле** — профессор, Техасский университет А&М, Колледж-Стейшн, США

**Мохамамед Сейду О.** — профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

**Палмерини Джованни** — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Петухов Вячеслав Георгиевич** — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**Попков Юрий Соломонович** — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

**Попов Гарри Алексеевич** — академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**Прадо Антонио** — профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

**Редько Иван Яковлевич** — доктор технических наук, профессор, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского, Москва, Россия

**Спенсер В. Дэвид** — профессор, Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-Парк, США

**Фурфаро Роберто** — профессор, Университет Аризоны, Тусон, США

**Челани Фабио** — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Черн Рок Ченг-Шинг** — профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

**Ясака Тэцуо** — почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions.

**Цель и тематика**

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» — периодическое международное рецензируемое научное издание в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям:

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки);
- 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки).

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

---

Редактор *И.Л. Панкратова*  
Редактор англоязычных текстов *А.С. Корзин*  
Компьютерная верстка *Н.В. Маркеловой*

**Адрес редакции:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-07-16; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Адрес редакционной коллегии журнала**

**«Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования»:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-07-92; E-mail: [engi@rudn.ru](mailto:engi@rudn.ru)

---

Подписано в печать 19.06.2024. Выход в свет 28.06.2024. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 10,70. Тираж 500 экз. Заказ № 603. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН им. Патриса Лумумбы

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-08-74; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2024 Volume 25 Number 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

---

### Editor-in-Chief

**Yury N. Razoumny** — Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

### Associate Editor-in-Chief

**Sergey V. Reznik** — Dr. (Technical Sciences), Professor, Head of the Department SM-13 "Composite Materials for Aerospace", Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### Assistant to the Editor-in-Chief

**Svetlana V. Agasieva** — Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

### Editorial Board

**Brij Agrawal** — Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

**Oleg M. Alifanov** — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Fabio Celani** — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Rock Jeng-Shing Chern** — Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

**Roberto Furfaro** — Professor, University of Arizona, Tucson, USA

**Paolo Gasbarri** — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Giancarlo Genta** — Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

**Ioannis Zois Gitas** — Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

**Filippo Graziani** — Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Anna Guerman** — Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

**Pini Gurfil** — Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

**Moriba Jah** — Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

**Vladimir T. Kalugin** — Dr. (Technical Sciences), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Vladimir M. Kapustin** — Dr. (Technical Sciences), Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russia

**Junichiro Kawaguchi** — Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

**Nikolay B. Kuznetsov** — Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Richard Linares** — Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

**Maxim M. Matyushin** — Dr. (Technical Sciences), Mission Control Center (TSUP), Central Research Institute for Machine Building (TsNIIMash), State Space Corporation "Roscosmos", Korolev, Russia

**Andrey V. Medvedev** — Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Arun Misra** — Professor, McGill University, Montreal, Canada

**Seidu O. Mohammed** — Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

**Daniele Mortari** — Professor, Texas A&M University, College Station, USA

**Giovanni Palmerini** — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Vyacheslav G. Petukhov** — Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Yury S. Popkov** — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Harri A. Popov** — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Antonio Prado** — Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

**Ivan Y. Redko** — Dr. (Technical Sciences), Professor, Krzhizhanovskiy Energy Institute, Moscow, Russia

**David B. Spencer** — Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

**Renuganth Varatharajoo** — Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

**Massimiliano L. Vasile** — Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

**Antonio Viviani** — Professor, University of Campania "Luigi Vanvitelli", Naples, Italy

**Tetsuo Yasaka** — Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

Published by the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Publication frequency: quarterly.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions.

### Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Research — is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of aviation and space technology, mechanical engineering. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE:  
<http://publicationethics.org>

---

Copy Editor *I.L. Pankratova*  
English Texts' Editor *A.S. Korzin*  
Layout Designer *N.V. Markelova*

**Address of the editorial board:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-16; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Research:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-92; E-mail: [engj@rudn.ru](mailto:engj@rudn.ru)

---

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba  
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

**Printed at RUDN Publishing House:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-08-74; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Андриков Д.А., Курбанов С.В.</b> Алгоритмическое обеспечение спектральной обработки кардиограмм ....	111
<b>Khalid M.R.W., Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S.</b> Technical Solution to Decrease Cavitation Effects in the Kaplan Turbine Blade (Техническое решение по снижению эффекта кавитации в лопатке турбины Каплана) .....	121
<b>Белюсов Ю.В.</b> Распределение нагрузки между телами качения роликовых подшипников .....	130
<b>Корнилова А.В.</b> Исследование влияния термоциклирования на магнитные и механические свойства сталей .....	140
<b>Коняева П.А., Салтыкова О.А., Купреев С.А.</b> Построение предиктивной модели для прогнозирования цен недвижимости на основе сформированной базы данных .....	151
<b>Ranasinghe N.K., Kruglova L.V.</b> The Role of Convolutional Neural Networks in Cricket Performance Analysis (Роль сверточных нейронных сетей в анализе результатов игры в крикет) .....	162
<b>Li Z., Lei F., Ermakov D.N., Symaniuk N.V., Poletaev I.V., Aziz N.M.H., Obaid A., Ivanov P.I.</b> The Dual Aspects of Legal Reasoning in the Era of Artificial Intelligence — Defeasible Reasoning and Argumentation Scheme (Множественные аспекты юридического правоприменения в эпоху искусственного интеллекта — формирование обоснованности правовой аргументации) .....	173
<b>Khudhair H.S., Al-Jameel H.A.E., Konoplev V.N., Asoyan A.R.</b> Improving the Capacity of the Carriageway of the City Streets of Karbala (Повышение пропускной способности проезжей части городских улиц Кербелы) .....	186

## CONTENTS

<b>Andrikov D.A., Kurbanov S.V.</b> Algorithmic Support for Spectral Processing of Cardiograms .....	111
<b>Khalid M.R.W., Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S.</b> Technical Solution to Decrease Cavitation Effects in the Kaplan Turbine Blade .....	121
<b>Belousov Yu.V.</b> Load Distribution Between Rolling Elements of Roller Bearings .....	130
<b>Kornilova A.V.</b> Investigation of the Effect of Thermal Cycling on the Magnetic and Mechanical Properties of Steels .....	140
<b>Konyaeva P.A., Saltykova O.A., Kupreev S.A.</b> Building a Predictive Model for Predicting Real Estate Prices Based on the Generated Database .....	151
<b>Ranasinghe N.K., Kruglova L.V.</b> The Role of Convolutional Neural Networks in Cricket Performance Analysis .....	162
<b>Li Z., Lei F., Ermakov D.N., Symaniuk N.V., Poletaev I.V., Aziz N.M.H., Obaid A., Ivanov P.I.</b> The Dual Aspects of Legal Reasoning in the Era of Artificial Intelligence — Defeasible Reasoning and Argumentation Scheme .....	173
<b>Khudhair H.S., Al-Jameel H.A.E., Konoplev V.N., Asoyan A.R.</b> Improving the Capacity of the Carriageway of the City Streets of Karbala .....	186



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-111-120

УДК 519.711.3

EDN: HMIHLA

Научная статья / Research article

## Алгоритмическое обеспечение спектральной обработки кардиограмм

Д.А. Андриков<sup>ORCID</sup>, С.В. Курбанов<sup>ORCID</sup>✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ ya.sinan@yandex.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 18 марта 2024 г.

Доработана: 14 мая 2024 г.

Принята к публикации: 20 мая 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство

**Аннотация.** Метод регистрации электрокардиограмм, как неинвазивный метод исследования, широко применяется в современной функциональной диагностике. Развиваются спектральные методы диагностики, основанные на преобразовании Фурье и вейвлет-преобразовании. Для целей идентификации нарушений сердечного ритма методом исследования выбран спектральный (частотный) анализ кратковременных записей ЭКГ, вплоть до одного периода сердечных сокращений. Проведено разложение в ряд Фурье на одном периоде кардиосигнала в EDF-формате. Определено, что максимальная точность описания кардиосигнала достигается при числе гармоник, равном половине числа точек дискретизации кардиосигнала в течение периода. Корректность работы разработанного для спектрального анализа скрипта проверялась восстановлением кардиосигнала по его спектру и сравнением с исходным сигналом. Установлена корреляция спектра и формы кардиосигнала. Сделан вывод о применимости метода спектрального анализа для идентификации нарушений сердечного ритма, а также о возможности использования спектра электрических сигналов сердечных сокращений как многомерной функции состояния сердца. Указано направление дальнейшего выявления закономерностей путем статистического анализа с интерпретацией результатов профильными специалистами. Теоретическая и практическая ценность настоящего исследования заключается как в определении направлений применения спектрального анализа кардиосигнала для диагностики и лечения, так и в полученных практических результатах, которые могут быть применены при разработке экспертной системы или конкретного технического устройства.

**Ключевые слова:** цифровая электрокардиограмма, EDF-формат, спектральный анализ, ряд Фурье

### Для цитирования

Андриков Д.А., Курбанов С.В. Алгоритмическое обеспечение спектральной обработки кардиограмм // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 111–120. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-111-120>

© Андриков Д.А., Курбанов С.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Algorithmic Support for Spectral Processing of Cardiograms

Denis A. Andrikov<sup>ORCID</sup>, Sinan V. Kurbanov<sup>ORCID</sup>✉

RUDN University, Moscow, Russia

✉ ya.sinan@yandex.ru

### Article history

Received: March 18, 2024

Revised: May 14, 2024

Accepted: May 20, 2024

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The method of recording electrocardiograms as a non-invasive research method is widely used in modern functional diagnostics. Spectral diagnostic methods based on Fourier transform and wavelet transform are being developed. For the purposes of identification of cardiac rhythm disorders, the method of research selected is spectral (frequency) analysis of short-term ECG recordings, up to one period of heartbeats. Fourier series decomposition of the cardiac signal (ECG) in EDF-format for one period was carried out. It is determined that the maximum accuracy of cardiac signal description is achieved at the number of harmonics equal to half of the number of sampling points of the cardiac signal during the period. The correctness of the script developed for spectral analysis was checked by reconstructing the cardiac signal from its spectrum and comparing it with the original signal. The correlation between the spectrum and the shape of the cardiac signal has been established. The conclusion is made about the applicability of the spectral analysis method for the identification of heart rhythm disorders, as well as about the possibility of using the spectrum of electrical signals of heart contractions as a multidimensional function of the heart state. The direction of further identification of regularities by means of statistical analysis with interpretation of results by specialized specialists is indicated. The theoretical and practical value of this study lies both in determining the areas of application of spectral analysis of the cardiac signal for diagnosis and treatment, and in the practical results obtained, which can be used in the development of an expert system or a specific technical device.

**Keywords:** digital electrocardiogram, EDF-format, spectral analysis, Fourier series

### For citation

Andrikov DA, Kurbanov SV. Algorithmic support for spectral processing of cardiograms. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):111–120. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-111-120>

### Введение

Компьютерное моделирование сердечно-сосудистой системы человека является актуальной задачей современной науки. Построение максимально полной модели позволило бы интенсифицировать научные исследования, например, за счет возможности проводить виртуальные эксперименты. В настоящее время известно множество подходов к моделированию сердечно-сосудистой системы [1–3], так или иначе основанных на декомпозиции сложной биологической системы сердца. Все

эти модели достаточно сложны и, как правило, не могут представить сердце во всем его многообразии. Поэтому заслуживает внимания модель сердца как «черного ящика», о состоянии которого судят по ограниченному набору доступных для наблюдения параметров. Этот подход широко применяется в медицинской практике, примером является электрокардиография.

Существует также множество систем искусственного интеллекта [4], которые, как в представленной статье, необходимо оснастить проектом с открытым исходным кодом.



Лучшие практики разработки программного обеспечения и ИТ-архитектуры были рассмотрены на примерах инновационных стартапов [5]. Приведенные методы и приемы будут аналогичным образом представлены в следующем исследовании.

## 1. Постановка задачи

Современной тенденцией функциональной диагностики является получение максимальной информации при минимальном воздействии на организм пациента. Таким методом неинвазивного исследования является метод регистрации электрокардиограмм, который широко применяется в современной медицине. Развиваются спектральные методы диагностики [6–9], основанные на преобразовании Фурье и вейвлет-преобразовании.

Как указано в [10], оценка изменчивости сердечного ритма, называемая также анализом variability ритма сердца (VРС), как клиническая практика, получила развитие с начала 60-х гг. XX в. Этому процессу способствовало применение для исследования методов математической статистики, алгоритмов обработки биологических сигналов и развитие физиологической интерпретации полученных данных. В дальнейшем VРС выделился в самостоятельный неинвазивный метод в кардиологии. Метод активно развивается в настоящее время [11–15].

Методы анализа кардиоинтервалов разделяются на визуальные и математические методы. Математические методы делятся на три больших класса:

- 1) исследование общей variability (статистические методы или временной анализ);
- 2) исследование периодических составляющих VРС (частотный анализ);
- 3) исследование внутренней организации динамического ряда кардиоинтервалов (автокорреляционный анализ).

Для целей идентификации нарушений сердечного ритма методом исследования выбран

спектральный (частотный) анализ кратковременных записей ЭКГ, вплоть до одного периода сердечных сокращений. Цель исследования — поиск ответов на следующие вопросы:

- 1) как изменяется спектр ЭКГ при нарушении сердечного ритма;
- 2) какова динамика изменения спектра ЭКГ (продолжительность переходного процесса);
- 3) какое число гармоник спектра необходимо для надежной фиксации факта нарушения сердечного ритма;
- 4) возможно ли использование спектра сердечных сокращений как многомерной функции состояния сердца.

Спектральный анализ представляет собой чувствительный инструмент исследований, основанный на преобразовании Фурье. Это преобразование по известной для некоторого сигнала функции времени  $f(t)$  позволяет построить функцию частоты  $F(\omega)$ , описывающую этот же сигнал. Преобразование Фурье имеет некоторые математические ограничения для исходной функции времени, но его можно выполнить над любым физическим сигналом<sup>1</sup> [16; 17], в частности над кардиосигналом [9; 8].

Как известно, электрокардиографический сигнал является периодическим с периодом  $T$ , поэтому этот сигнал можно разложить в ряд Фурье вида

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos \omega_n t + b_n \cdot \sin \omega_n t);$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} n, \quad (1)$$

где

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt; \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos \omega_n t dt;$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \omega_n t dt. \quad (2)$$

В связи с заменой аналоговых приборов цифровыми фактическим стандартом записи

<sup>1</sup> Мьшикис А.Д. Лекции по высшей математике. М., 1973. 640 с.

электрокардиографических сигналов является EDF-формат, где сигнал  $f(t)$  представлен точной функцией  $f(t_k)$  — набором значений напряжения в некоторые фиксированные моменты времени  $t_k$ . Таким образом, в настоящей работе решается задача спектрального анализа такого сигнала. Алгоритм решения достаточно очевиден:

- 1) извлечение информации из EDF-файла;
- 2) определение периода электрокардиографического сигнала;
- 3) разложение этого сигнала в ряд Фурье;
- 4) определение необходимого количества членов ряда для представления сигнала с заданной точностью.

## 2. Структура формата EDF и извлечение информации из EDF-файла

Европейский формат данных (EDF) был введен в 1992 г. как стандарт для записей ЭЭГ и PSG (сна) [19]. В процессе применения было установлено, что формат имеет ограничения для применения в других областях (миография, вызванные потенциалы, кардиология). Основное ограничение — это то, что EDF требует непрерывности записи. Поэтому был разработан формат EDF+, в котором это ограничение снято и сохранены все остальные спецификации формата EDF без изменений.

EDF+ позволяет хранить несколько несмежных записей в одном файле. Это единственная несовместимость с EDF. Используя EDF+, все сигналы, аннотации и события, записанные за один сеанс с использованием одной системы записи, можно безопасно хранить вместе в одном файле. EDF+ также может хранить только события и аннотации без каких-либо сигналов. Такая гибкость позволяет выбирать оптимальное сочетание.

Для обработки был выбран пакет MATLAB. За основу была взята функция `edfread2`, исходный скрипт доступен по [15].

Формат вызова функции:

```
[hdr, dataMat] = edfread2(fname).
```

Здесь `fname` — строковая константа, полное имя файла с расширением, например, `'any_name.edf'`, файл должен быть в текущем каталоге или должен быть указан полный путь.

Функция читает все записи из файла. Заголовки содержат общую информацию (идентификатор пациента, начало записи, конец записи и т.д.), эту информацию функция возвращает структуре `hdr`. Данные всех сигналов возвращаются в матрицу данных `dataMat`, каждый столбец этой матрицы представляет собой дискретный набор всех значений одного из сигналов.

Первые 256 байт EDF-файла содержат общую информацию о самом формате, данные о пациенте, данные о записях сигналов, в том числе количестве сигналов (`ns`). Эти данные дополняются блоками по 256 байт на каждый сигнал, где указывается тип сигнала по характеру содержащейся информации (например, температура тела, кардиограмма и т.д.), амплитуда аналоговая и цифровая, продолжительность (`duration`) сигнала в секундах, количество дискретных значений. Таким образом, заголовочный блок содержит  $256 + (ns * 256)$  байт.

За заголовочным блоком следует массив дискретных значений сигналов, на каждое значение выделено 2 байта, значение дискретное, представлено целым числом со знаком. Положение отдельных записей в заголовочном блоке следующее (каждый байт представляет собой символ в коде ASCII):

- 8 байт: версия формата данных (по умолчанию 0);
- 80 байт: идентификационные данные пациента;
- 80 байт: идентификационные данные записи;
- 8 байт: дата начала записи (dd.mm.yy);
- 8 байт: время начала записи (hh.mm.ss);
- 8 байт: количество байт в заголовочном блоке;
- 44 байта зарезервировано;
- 8 байт: количество записей данных (-1, если неизвестно, каждая запись может содержать несколько сигналов);
- 8 байт: продолжительность записи сигнала в секундах;
- 4 байта: количество сигналов в записи (`ns`);

далее множитель ( $ns \times$ ) означает, что параметр записан для каждого сигнала:

- $ns \times 16$  байт:  $ns$  меток сигналов (имеются в виду названия сигналов, например 'ECGV2Ref' или 'Body temp');
- $ns \times 80$  байт: тип преобразователя (например, электрод Ag/AgCl);
- $ns \times 8$  байт: единица измерения физической величины (mV - милливольты, degree - градусы Цельсия, и т. д.);
- $ns \times 8$  байт: физический минимум сигнала;
- $ns \times 8$  байт: физический максимум сигнала;
- $ns \times 8$  байт: цифровой минимум сигнала;
- $ns \times 8$  байт: цифровой максимум сигнала;
- $ns \times 80$  байт: параметры фильтрации при записи сигнала (например, полоса пропускания фильтра);
- $ns \times 8$  байт: количество цифровых значений (nr) при записи сигнала (произведение времени записи на частоту дискретизации; например, при записи продолжительностью 3330 с и частоте дискретизации 200 Гц здесь будет записано 666000);
- $ns \times 32$  байта зарезервировано.

Массив дискретных значений сигналов представляет собой матрицу  $nr \times ns$  ( $nr$  строк и  $ns$  столбцов), каждый столбец — это сигнал.

Таким образом, описанная функция полностью извлекает информацию из EDF-файла.

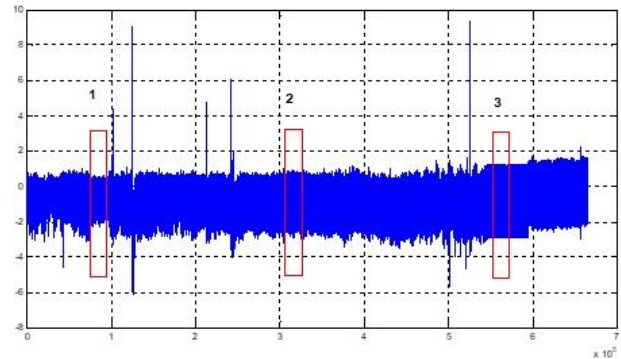
### 3. Пример работы алгоритмы обработки кардиограмм

Первый этап обработки сигнала — визуальный анализ кардиограммы в целом, выявление участков кардиограммы нормального ритма для данного пациента и характерных аритмий.

На рис. 1 показана осциллограмма сигнала, восстановленного из EDF-файла 01\_ГУСА.edf тестовой базы критических состояний 2019 г.<sup>2</sup>

Кардиограмма на первый взгляд подобна белому шуму, однако это впечатление создается из-за большой длительности записи. Тем не менее на кардиограмме даже в этом виде

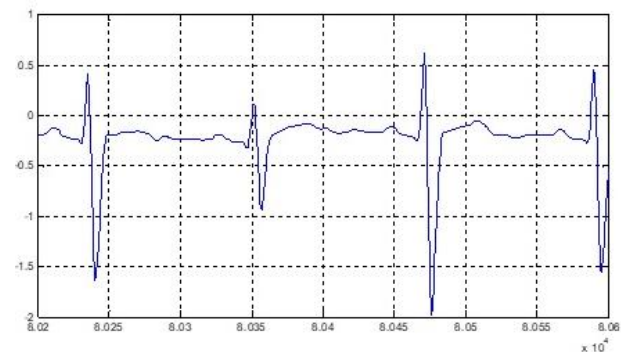
можно выделить, по меньшей мере, три различных участка, обозначенные на рис. 1 как 1, 2, 3.



**Рис. 1.** Полная кардиограмма из EDF-файла  
Источник: выполнено С.В. Курбановым  
в программе MATLAB

**Figure 1.** Full cardiogram from EDF-file  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software

Подробнее рассмотреть кардиограмму можно изменением масштаба времени. Например, выбором 400 точек на участке 1 получается часть сигнала, показанная на рис. 2.

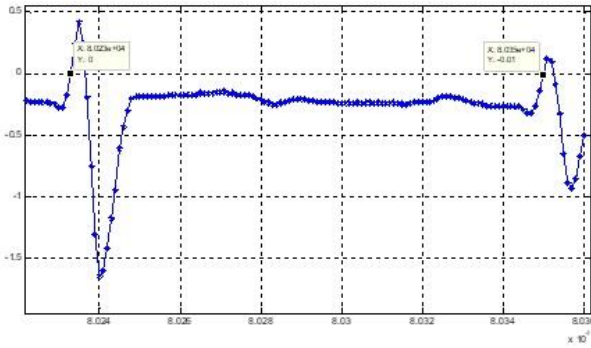


**Рис. 2.** Часть кардиограммы на участке 1  
Источник: выполнено С.В. Курбановым  
в программе MATLAB

**Figure 2.** Part of the cardiogram in section 1  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software

Здесь уже наблюдается характерный вид кардиограммы, позволяющий выделить один период сердечного ритма (точки данных отмечены символом «\*»). Этот период представлен на рис. 3. Период ограничен точками с индексами 80233 и 80350.

<sup>2</sup> РОХМиНЭ. Тестовая база критических состояний 2019 г. URL: <http://rohmine.org/baza-dannykh-rokhmine/testovaya-baza-kriticheskikh-sostoyaniy-2019-g/> (дата обращения: 15.11.2023).



**Рис. 3.** Период кардиограммы на участке 1  
Источники: выполнено С.В. Курбановым  
в программе MATLAB

**Figure 3.** The period of the cardiogram in section 1  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software

#### 4. Преобразование Фурье кардиосигналов

Полученные из EDF-файлов кардиограммы можно разложить в ряд Фурье с достаточно большим числом гармоник (спектр). Существует несколько алгоритмов разложения в ряд Фурье<sup>4</sup> [16; 17] — быстрое, дискретное и т. д. Эти алгоритмы обычно требуют фиксированного и кратного  $2^N$  числа точек на период, при выполнении этого и ряда других условий такие алгоритмы обеспечивают выигрыш в скорости вычислений. В случае кардиосигналов наблюдается значительный разброс числа точек на период из-за вариации частоты сердечных сокращений. Дискретизация кардиосигнала с  $2^N$  числа точек на период в этом случае потребует аппроксимации сигнала многочленами и вычисления значений аппроксимирующей функции на сетке  $2^N$  значений аргумента. Такие преобразования искажают исходный сигнал и нивелируют выигрыш в быстродействии. Для оценки совокупности положительных и отрицательных сторон необходимо достаточно сложное дополнительное исследование.

В свете изложенного, ввиду небольшого числа точек за период и предположительно небольшого числа вычисляемых гармоник, было отдано предпочтение прямому вычислению интегралов по формуле (2) методом трапеций, который по точности и объему вычислений

является компромиссом между другими методами (прямоугольников, парабол и т.д.). Расчетные формулы принимают вид

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T}n; a_0 = \frac{1}{2T} \sum_{k=1}^{m-1} (f_k + f_{k+1})(t_{k+1} - t_k);$$

$$a_n = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{m-1} (f_k \cdot \cos \omega_n t_k + f_{k+1} \cdot \cos \omega_n t_{k+1})(t_{k+1} - t_k);$$

$$b_n = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{m-1} (f_k \cdot \sin \omega_n t_k + f_{k+1} \cdot \sin \omega_n t_{k+1})(t_{k+1} - t_k),$$

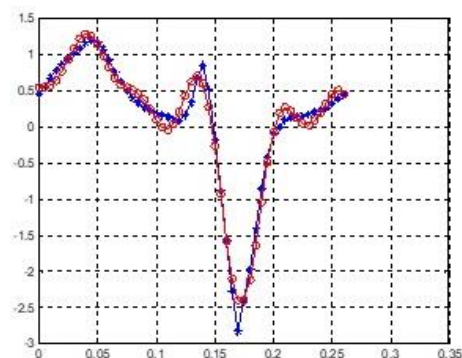
где  $m$  — число точек на период кардиосигнала.

Контроль корректности преобразования производился вычислением частичной суммы ряда Фурье по формуле (1).

Разложение кардиосигнала в ряд Фурье с восстановлением функции вычислением частичной суммы ряда, построением графиков и спектра было реализовано в скрипте (все переменные в Workspace должны быть сохранены).

#### 5. Исследование спектров кардиосигналов

Результаты экспериментального определения оптимального числа гармоник приведены ниже. При  $n = 5$  гармониках на 3-м участке (см. рис. 1) показаны на рис. 4 и рис. 5.



**Рис. 4.** Исходная кардиограмма (синяя линия)  
и частичная сумма ряда Фурье при  $n = 5$  гармониках  
Источники: выполнено С.В. Курбановым  
в программе MATLAB

**Figure 4.** Initial cardiogram (blue line)  
and partial sum of Fourier series at  $n = 5$  harmonics  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software

<sup>4</sup> Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье. М.: Физический факультет МГУ, 2019. 88 с.

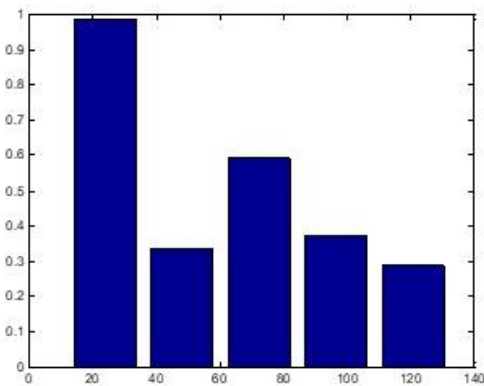
Как видно из рис. 4, пяти гармоник явно недостаточно для хорошей аппроксимации кардиосигнала. При  $n = 10$  получается картина, представленная на графиках рис. 6, при  $n = 20$  (рис. 7), при  $n = 40$  (рис. 8).

Сравнение рисунков показывает, что наилучший результат получается при числе гармоник, примерно равном половине числа значений кардиосигнала за период, в рассматриваемом случае это соответствует  $n = 26$ . Экспериментальное подтверждение данной гипотезы представлено на рис. 9. В этом случае наблюдается совпадение частичной суммы ряда Фурье и

значений кардиосигнала. Значительно меньшее число гармоник, равно как и значительно большее, вызывает искажение формы восстановленного кардиосигнала.

Таким образом, число гармоник при разложении в ряд Фурье должно равняться половине числа значений кардиосигнала за период.

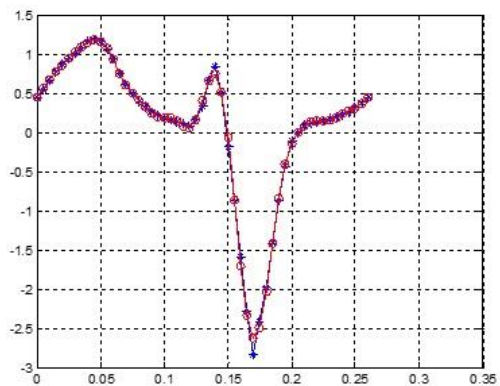
Следующий этап — сравнение спектров на различных участках кардиограммы. Кардиограммы, использованные в данной работе, были предоставлены РОХМИНЭ. Спектры представлены на рис. 10–14.



**Рис. 5.** Спектр кардиограммы  $A(\omega)$  при  $n = 5$  гармониках  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

**Figure 5.** Spectrum of the cardiogram  $A(\omega)$  at  $n = 5$  harmonics

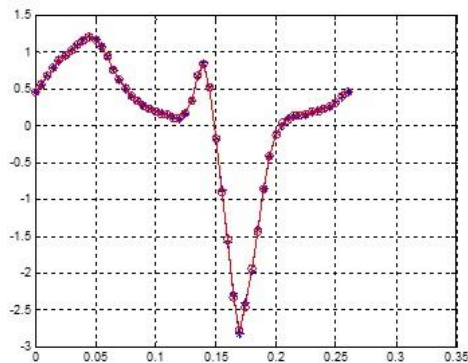
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software



**Рис. 6.** Исходная кардиограмма (синяя линия) и частичная сумма ряда Фурье при  $n = 10$  гармониках  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

**Figure 6.** Initial cardiogram (blue line) and partial sum of the Fourier series with  $n = 10$  harmonics

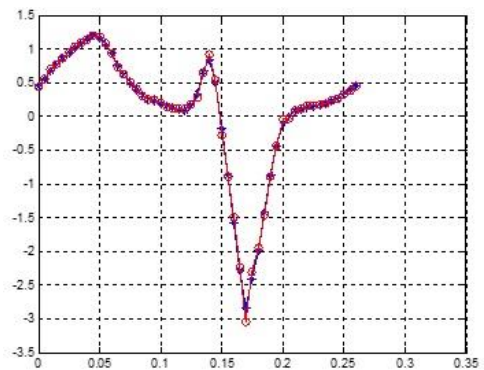
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software



**Рис. 7.** Исходная кардиограмма (синяя линия) и частичная сумма ряда Фурье при  $n = 20$  гармониках  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

**Figure 7.** Initial cardiogram (blue line) and partial sum of the Fourier series with  $n = 20$  harmonics

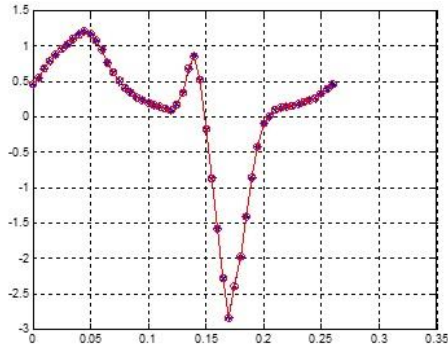
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software



**Рис. 8.** Исходная кардиограмма (синяя линия) и частичная сумма ряда Фурье при  $n = 40$  гармониках  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

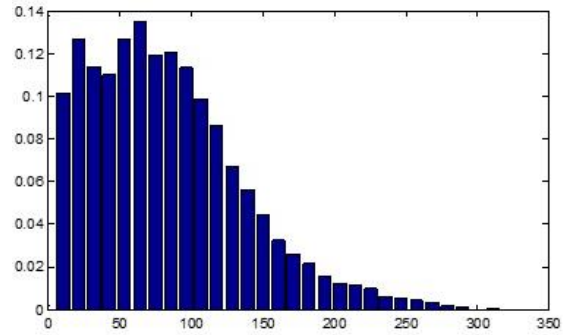
**Figure 8.** Initial cardiogram (blue line) and partial sum of the Fourier series with  $n = 40$  harmonics

Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software



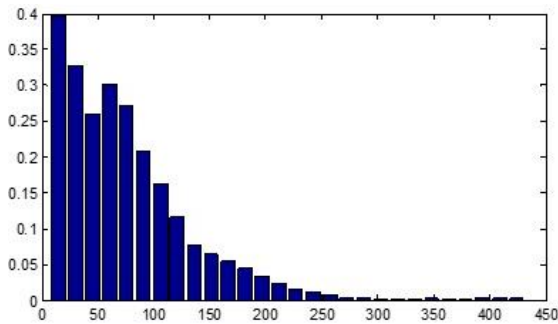
**Рис. 9.** Исходная кардиограмма (синяя линия) и частичная сумма ряда Фурье при  $n = 26$  гармониках  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

**Figure 9.** Initial cardiogram (blue line) and partial sum of the Fourier series with  $n = 26$  harmonics  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software



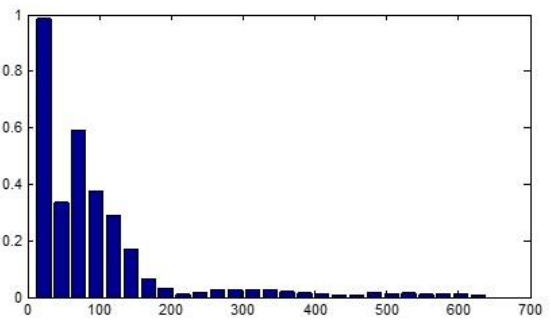
**Рис. 10.** Спектр кардиограммы на первом участке  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

**Figure 10.** Spectrum of the cardiogram in the first section  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software



**Рис. 11.** Спектр кардиограммы на втором участке  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

**Figure 11.** Spectrum of the cardiogram in the second section  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software



**Рис. 12.** Спектр кардиограммы на третьем участке  
Источник: выполнено С.В. Курбановым в программе MATLAB

**Figure 12.** Spectrum of the cardiogram in the third section  
Source: compiled by S.V. Kurbanov in the MATLAB software

Визуальный сравнительный анализ спектров кардиограмм позволяет сделать предположение, что при нормальной форме кардиосигнала в спектре присутствует значительное количество высших гармоник, при этом их амплитуда примерно равна амплитуде первой гармоники и даже превосходит ее. По мере развития аритмии происходит уменьшение амплитуды высших гармоник по сравнению с первой гармоникой, число гармоник значительной величины уменьшается.

## Заключение

В процессе исследования рассмотрена спецификация цифровых кардиограмм в EDF-формате и применение существующей функ-

ции системы MATLAB для извлечения этой информации.

Проведено разложение в классический ряд Фурье на одном периоде кардиосигнала. Определено, что максимальная точность описания кардиосигнала достигается при числе гармоник, равном половине числа точек дискретизации кардиосигнала в течение периода. Корректность работы разработанного для спектрального анализа скрипта проверялась восстановлением кардиосигнала по его спектру и сравнением с исходным сигналом.

Подтверждена явная зависимость спектра от формы кардиосигнала, что позволяет сделать вывод о применимости метода спектрального анализа для идентификации нарушений сердечного ритма. При этом выявление законо-

мерностей требует большого объема экспериментов и интерпретации их результатов профильными специалистами с целью диагностического использования. Тем не менее спектр электрических сигналов сердечных сокращений можно рассматривать как многомерную функцию состояния сердца.

Авторы отмечают значительную трудоемкость анализа кардиосигналов «вручную». Для развития работы по спектральным исследованиям требуется существенная автоматизация процедуры обработки исходной кардиограммы и проектирование понятного конечному пользователю интерфейса. Без развития функционала программного обеспечения исследование динамики изменения спектра ЭКГ представляется затруднительным.

#### Список литературы

1. Дрозд Д.Д. Основы применения математических моделей в кардиологии // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. 2015. Т. 5. № 9. С. 1140–1142. EDN: ULQVAL
2. Киселёв И.Н., Семисалов Б.В., Бибердорф Э.А., Шарипов Р.Н., Блохин А.М., Колпаков Ф.А. Модульное моделирование сердечно-сосудистой системы человека // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 2. С. 703–736. <https://doi.org/10.17537/2012.7.703>
3. Лебеденко И.С., Новосёлова Е.С., Ракитянская А.С., Ефимцева Ю.А. Математическая модель сердца // Биотехносфера. 2009. № 3. С. 24–31. EDN: KWTXFP
4. Карпов О.Э., Храмов А.Е., Андриков Д.А., Гусев А.В., Зарубина Т.В., Николаиди Е.Н., Пензин О.В., Раузина С.Е., Субботин С.А. Информационные технологии, вычислительные системы и искусственный интеллект в медицине. М.: ДПК Пресс, 2022. 480 с. <https://doi.org/10.56463/16504-7059-3414-n>
5. Qian T., Zhang L., Li Z. Algorithm of Adaptive Fourier Decomposition // IEEE Transactions on Signal Processing. 2011. Vol. 59. P. 5899–5906.
6. Захаров С.М., Знайко Г.Г. Спектральный анализ электрокардиосигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 110–115. EDN: YFYKID
7. Сергейчик О.И. Модели и алгоритмы спектрального анализа обработки кардиологических временных рядов: автореферат дис. ... канд. техн. наук. 2007. 23 с. EDN: NIPEIL
8. Genlang C., Zhiqing H., Yongjuan G., Chaoyi P. A cascaded classifier for multi-lead ECG based on feature

fusion // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2019. Vol. 178. P. 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.06.021>

9. Sun J. Automatic cardiac arrhythmias classification using CNN and attention-based RNN network // Healthcare Technology Letters. 2023. Vol. 10 (138). P. 53–61. <https://doi.org/10.1049/htl2.12045>

10. Снежницкий В.А., Шишко В.И., Зуховицкая Е.В., Дешко М.С. Вариабельность ритма сердца: применение в кардиологии. Гродно: ГрГМУ, 2010. 212 с. EDN: WMBLHV

11. Baevsky R.M., Chernikova A.G. Heart rate variability analysis: physiological foundations and main methods // Cardiometry. 2017. No. 10. P. 66–76. EDN: YPOTMP

12. Латфуллин И.А., Ким З.Ф., Тенгин Г.М., Мамедова Л.Э. ЭКГ высокого разрешения: от действительного к возможному // Российский кардиологический журнал. 2010. № 2 (82). С. 29–34. EDN: LPAGQV

13. Grinevich A.A., Chemeris N.K. Spectral analysis of heart rate variability based on the Hilbert–Huang method // Doklady Biochemistry and Biophysics. 2023. Vol. 511. No. 1. P. 169–172. <https://doi.org/10.1134/s1607672923700333>

14. Москаленко А.В., Махортых С.А. К вопросу о спектральном анализе регуляции основного ритма сердца // Доклады Международной конференции «Математическая биология и биоинформатика». Пушкино: ИМПБ РАН. 2022. Т. 9. <https://doi.org/10.17537/icmbb22.13>

15. Cerutti S., Bianchi A.M., Mainardi L.T., Signorini M.G. Spectral Analysis of Cardiovascular Variability Signals // Cardiac Arrhythmias, Pacing & Electrophysiology. Developments in Cardiovascular Medicine / ed. by P.E. Vardas. 1998. Vol. 201. P. 171–183. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5254-9\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5254-9_25)

16. Marple Jr. S.L., Carey W.M. Digital spectral analysis with applications // The Journal of the Acoustical Society of America. 1989. Vol. 86. Iss. 5. <https://doi.org/10.1121/1.398548>

17. Rauscher C. Fundamentals of Spectrum Analysis. München: Rohde & Schwarz Publ., 2001. 221 p. URL: <https://archive.org/details/fundamentalsofsp0000raus> (accessed: 15.03.2024).

18. Sawant N., Patidar S. Diagnosis of Cardiac Abnormalities Applying Scattering Transform and Fourier-Bessel Expansion on ECG Signals // 2021 Computing in Cardiology (CinC). Brno, Czech Republic, 2021. <https://doi.org/10.23919/CinC53138.2021.9662751>

19. Alvarez-Estevéz D. European Data Format. URL: <https://www.edfplus.info> (accessed: 15.03.2024).

20. Карпов О.Э., Храмов А.Е. Прогностическая медицина // Врач и информационные технологии. 2021. Т. 3. С. 20–37. [https://doi.org/10.25881/18110193\\_2021\\_3\\_20](https://doi.org/10.25881/18110193_2021_3_20)

## References

1. Drozd DD. Basics of application of mathematical models in cardiology. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2015;5(9):1140–1142. (In Russ.) EDN: ULQVAL
2. Kiselev IN, Semisalov BV, Biberdorf EA, Shari-pov RN, Blokhin AM, Kolpakov FA. Modular modeling of the human cardiovascular system. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2012;7(2):703–736. (In Russ.) <https://doi.org/10.17537/2012.7.703>
3. Lebedenko IS, Novoselova ES, Rakityanskaya AS, Efimceva YA. Pump function mathematical model of heart. *Biotechnosphere*. 2009;3:24–31. (In Russ.) EDN: KWTXFP
4. Karpov OE, Khramov AE, Andrikov DA, Gu-sev AV, Zarubina TV, Nikolaidi YeN, Penzin OV, Rauczina SYe, Subbotin SA. *Information technologies, computing systems and artificial intelligence in medicine*. Moscow: DPK Press; 2022. (In Russ.) <https://doi.org/10.56463/16504-7059-3414-n>
5. Qian T, Zhang L, Li Z. Algorithm of Adaptive Fourier Decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2011;59:5899–5906.
6. Zakharov SM, Znaiko GG. Spectral analysis of electrocardiosignals. *Questions of radio electronics*. 2017;3:110–115. (In Russ.) EDN: YFYKID
7. Sergeychik OI. *Models and algorithms for spectral analysis of processing cardiac time series* (abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences). 2007. (In Russ.) EDN: NIPEIL
8. Genlang C, Zhiqing H, Yongjuan G, Chaoyi P. A cascaded classifier for multi-lead ECG based on feature fusion. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2019;178:135–143. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.06.021>
9. Sun J. Automatic cardiac arrhythmias classification using CNN and attention-based RNN network. *Healthcare Technology Letters*. 2023;10(138):53–61. <https://doi.org/10.1049/htl2.12045>
10. Snezhitsky VA, Shishko VI, Zukhovitskaya EV, Deshko MS. *Heart rate variability: applications in cardiology*. Grodno: GrSMU; 2010. (In Russ.) EDN: WMBLHV
11. Baevsky RM, Chernikova AG. Heart rate variability analysis: physiologic foundations and main methods. *Cardiometry*. 2017;10:66–76. EDN: YPOTMP
12. Latfullin IA, Kim ZF, Teptin GM, Mammadova LE. High-resolution ECG: from present to future. *Russian Journal of Cardiology*. 2010;2(82):29–34. (In Russ.) EDN: LPAGQV
13. Grinevich AA, Chemeris NK. Spectral analysis of heart rate variability based on the Hilbert–Huang method. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2023;511(1):169–172. <https://doi.org/10.1134/s1607672923700333>
14. Moskalenko AV, Makhortykh SA. On spectral analysis of the regulation of the main cardiac rhythm. *Proceedings of the International Conference “Mathematical Biology and Bioinformatics”*. Pushchino: IMPB. 2022; 9:e41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17537/icmbb22.13>
15. Cerutti S, Bianchi AM, Mainardi LT, Signorini MG. Spectral Analysis of Cardiovascular Variability Signals. In: Vardas PE (eds.) *Cardiac Arrhythmias, Pacing & Electrophysiology. Developments in Cardiovascular Medicine Springer, Dordrecht*. 1998;201:171–183. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5254-9\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5254-9_25)
16. Marple JrSL, Carey WM. Digital spectral analysis with applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1989;86(5). <https://doi.org/10.1121/1.3985481>
17. Rauscher C. *Fundamentals of Spectrum Analysis*. München: Rohde & Schwarz Publ.; 2001. Available from: <https://archive.org/details/fundamentalsofsp0000raus> (accessed: 15.03.2024)
18. Sawant N, Patidar S. Diagnosis of Cardiac Abnormalities Applying Scattering Transform and Fourier-Bessel Expansion on ECG Signals. *2021 Computing in Cardiology (CinC)*. Brno, Czech Republic, 2021. <https://doi.org/10.23919/CinC53138.2021.9662751>
19. Alvarez-Estevéz D. *European Data Format*. Available at: <https://www.edfplus.info> (accessed: 15.03.2024)
20. Karpov OE, Khramov AE. Predictive medicine. *Medical doctor and IT*. 2021;3:20–37. (In Russ.) [https://doi.org/10.25881/18110193\\_2021\\_3\\_20](https://doi.org/10.25881/18110193_2021_3_20)

## Сведения об авторах

**Андриков Денис Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики процессов и управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; E-mail: andrikovdenis@mail.ru

**Курбанов Синан Владимирович**, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0005-6632-9102; E-mail: ya.sinan@yandex.ru

## About the authors

**Denis A. Andrikov**, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; E-mail: andrikovdenis@mail.ru

**Sinan V. Kurbanov**, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0005-6632-9102; E-mail: ya.sinan@yandex.ru





DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-121-129

UDC 621.91.01

EDN: HWEUSZ

Research article / Научная статья

## Technical Solution to Decrease Cavitation Effects in the Kaplan Turbine Blade

Mohammed Ridha W. Khalid<sup>ID</sup>, Kazem Reza Kashyzadeh<sup>ID</sup>, Siamak Ghorbani<sup>ID</sup>✉

RUDN University, Moscow, Russia

✉ gorbani-s@rudn.ru

### Article history

Received: December 7, 2023

Revised: March 21, 2024

Accepted: April 2, 2024

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** Application of Kaplan turbines is widespread in low-water-head and large-capacity hydropower plants. An understanding of the failure mechanism of Kaplan Turbines is a key factor to provide useful solutions for their prevention or early treatment and to guarantee their workability. The long-term performance of Kaplan turbines depends on many factors such as cavitation, erosion, fatigue, and material defects. Cavitation in Kaplan turbines leads to flow instability, vibrations, surface damage, and reduce the machine performance. Therefore, this paper investigates the factors leading to cavitation in Kaplan turbine and presents practical solutions for it. Thermal-sprayed coatings are frequently applied due to their high wear resistance, cost effectiveness, weight reduction, and less negative impacts on base metal. Moreover, HVOF is used to create coatings with a high density and bonding strength. At high temperatures, cermet coatings, including nanoparticles, exhibit exceptional wear resistance. WC-based nanostructured and multifaceted coatings are utilized due to their high wear resistance. In addition, chromium carbide in WC-based coatings increases their oxidation and wear resistance.

**Keywords:** kaplan turbines, cavitation, failure, HVOF, nanostructured coatings

### For citation

Khalid MRW, Reza Kashyzadeh K, Ghorbani S. Technical solution to decrease cavitation effects in the Kaplan turbine blade. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):121–129. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-121-129>



## Техническое решение по снижению эффекта кавитации в лопатке турбины Каплана

М.Р.В. Халид<sup>ORCID</sup>, К. Реза Каши Заде<sup>ORCID</sup>, С. Горбани<sup>ORCID</sup>✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ gorbani-s@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 7 декабря 2023 г.

Доработана: 21 марта 2024 г.

Принята к публикации: 2 апреля 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Применение турбин Каплана широко распространено на гидроэлектростанциях малой и большой мощности. Понимание механизмов отказа указанных турбин является ключевым фактором для разработки решений по их предотвращению или своевременному устранению, а также для обеспечения их работоспособности. Надежная работа турбин Каплана зависит от многих факторов, таких как кавитация, эрозия, усталость и дефекты материалов. Кавитация в турбинах Каплана приводит к нестабильности потока, вибрациям, повреждению поверхности и снижению производительности машины. В связи с этим исследованы факторы, приводящие к кавитации в турбине Каплана, и представлены практические решения данной проблемы. Покрытия, нанесенные термонапылением, часто применяются из-за их высокой износостойкости, экономической эффективности, снижения веса и меньшего негативного воздействия на основной металл. Кроме того, высокоскоростное распыление кислородного топлива (HVOF) используется для создания покрытий с высокой плотностью и прочностью сцепления. При высоких температурах металлокерамические покрытия, в том числе наночастицы, обладают исключительной износостойкостью. Наноструктурированные и многогранные покрытия на основе WC используются из-за их высокой износостойкости. Кроме того, карбид хрома в покрытиях на основе WC повышает их стойкость к окислению и износу.

**Ключевые слова:** турбины Каплана, кавитация, отказ, HVOF, наноструктурированные покрытия

### Для цитирования

Khalid M.R.W., Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S. Technical solution to decrease cavitation effects in the Kaplan turbine blade // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 121–129. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-121-129>

### Introduction

Kaplan turbines are used at sites with a typical head range of 2 to 40 meters, with 15–100% efficiency at full discharge of water [1]. The main problems in Kaplan hydro turbines are cavitation, erosion, fatigue, and material defects [2–4]. Hydraulic turbine deterioration is now largely due to cavitation, which decreases turbine efficiency,

increases turbine vibrations, and blade wear, leading to reduce the turbine operating life [5; 6]. Xavier et al. have described cavitation as the state at which vapor cavities are created and expanded because of dynamic pressure reductions to the liquid's vapor pressure at constant temperature [7]. It is a fact that in order to increase energy production, turbines operate in ways that worsen the problem of cavity erosion [8]. Also,

cavitation and other complex flow phenomena in the flow field leads to structural fatigue failures [9]. To promote research on cavitation in Kaplan hydro turbines, many scholars have summarized the related studies. Kjolle has discovered that the main causes of damage to water turbines is due to cavitation problems [10]. In this regard, runners and draft tube cones in Kaplan turbines are the turbine components most susceptible to cavitation. It has been stated that the impact of cavitation erosion may be lessened by enhancing hydraulic component production and design, using materials resistant to erosion, and positioning the turbines to operate within the permissible range of cavitation conditions [11]. The advantages of cavitation monitoring in hydraulic turbines through vibration methods have been demonstrated [12]. This method was applied to verify a small alteration to its distributor that aimed to decrease the severity of the cavitation and, consequently, the associated erosion. Karimi and Avellan have presented a new cavitation erosion device that generates vortex cavitation [13]. To confirm their vortex cavitation generator, a comparative research study between various cavitation erosion conditions was conducted. They concluded that the hardened surface layers in specimens exposed to flow cavitation were thicker than those in specimens exposed to vibratory cavitation, which results in faster rates of erosion. A hydro turbine blade online monitoring system has been implemented by Shi et al. [14]. In this research, Continuous Sound Monitoring (CSM) was done for both audible sound (20 Hz–20 kHz) and ultrasound (50–300 kHz). The signal properties were assessed, including the standard deviation, noise level, and frequency components. In addition, the evaluation results were stored in a database in association with the operating condition determined by the water head and wicket gate opening or power output. To this end, sound produced by cavitation was separated from other sounds like water flow and mechanical sound based on its frequency characteristics. Therefore, it was possible to determine the cavitation intensity at various water heads and powers. Alligne et al.

have investigated the ability of hydroelectric power plants to adapt to changes in the use of electrical power networks [15]. Also, under specific circumstances, the swirling flow leaving the runner of a turbine may operate as an excitation source for the entire hydraulic system. The purpose of their study was to determine how the location of the full load excitation source affect the eigen values, shape modes, and the stability of the system. In summary, there is much research on different failure processes on the Kaplan turbine, which are the main reason for the authors of this paper to produce a state-of-the-art survey focusing on the cavitation problem alone to evaluate the current cavitation phenomenon for Kaplan turbine more effectively. Accordingly, the main aim of the present paper is to overview the Kaplan turbines' different failures based on the cavitation and introduce some practical solutions to reduce damages.

## 1. Cavitation phenomenon

Cavitation phenomenon is defined as the development of cavities (vapor bubbles) as a result of a pressure drop below saturated vapor pressure [16]. Kaplan turbine is prone to cavitation, which has the potential to reduce performance and harm the blade surfaces. Water vaporization and water vapor condensation are both involved in the two-phase (water and water-vapor) interaction known as cavitation. When the local pressure in the flow field is lower than the vapor pressure of water (e.g., 3.17 kPa at 25 °C), vapor bubbles are created [17]. Noise and vibrations are produced as a result of the high pressures that are briefly formed when the bubbles are compressed and collapsed. Industrial experience shows that vibrations and noise produced by cavitation cause cracks, particularly in Kaplan turbines [18]. Figure 1 presents examples of localized damage to a pump blade due to cavitation. Up to 90% of hydro turbines suffer cavitation damage, and cavitation-erosive damage is most likely to occur on the low-pressure side of the turbine runner blades [18]. The main types of cavitation in axial

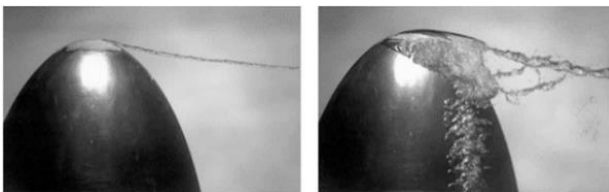
reaction turbines are tip vortex cavitation phenomena, lead edge cavitation, surface cavitation, hub cavitation, draft, and inter-blade vortex cavitation. In the following, a brief description of them will be given.



**Figure 1.** Localized cavitation damage and severe cavitation erosion on a pump blade  
Source: Brennen C.E. [18]

### 1.1. Tip vortex cavitation

As shown in Figure 2, tip vortex cavitation can occur in the low-pressure sites generated over the turbine blades and in the wake of propellers and control surfaces [19]. When there are small bubbles or other cavitation nuclei in the core of a concentrated vortex and the core pressure shifts into tension, tip vortex cavitation begins to form. In the region of a vortex cavitation collapse, tip vortex cavitation may cause surface damage, noise, and a decrease in mechanical efficiency [20].

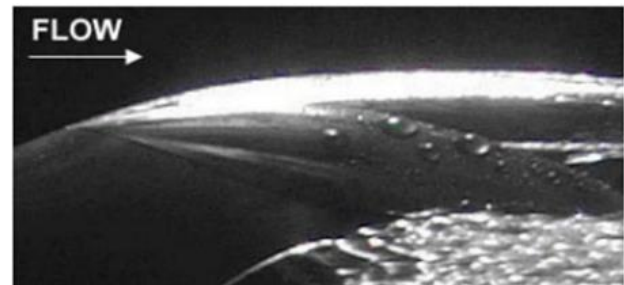


**Figure 2.** Cavitating tip vortices  
Source: Higuchi H. et al. [19]

### 1.2. Lead edge cavitation

Attached cavitation, or leading-edge cavitation, is one of the cavitation categories that may form in a flow surrounding a lifting body and is known

to cause significant erosive damage. From Figure 3, this kind of cavitation is distinguished by a partial vapor cavity that separates from a lifting body's leading edge and spreads downriver [21]. Also, due to operating at a higher head than the machine's design head, it manifests as a connected cavity on the suction side of the runner blades [11]. This is a very frequent and complex type of cavitation, and depending on the hydrodynamic circumstances, it can exhibit several regimes.



**Figure 3.** Lead edge cavitation  
Source: Mohamed F., Francois A. [21]

### 1.3. Hub cavitation

The high swirl of the flow in the blade slipstream close to the rotational axis is where the wasted energy is first used up. This swirl will cause a pressure drop in relation to ambient pressure, which will produce an unfavorable drag force on the blade [22]. Also, when the swirl is high, axial thrust will not be produced by the energy transfer to the fluid at the hub, and turbulence will be dispersed by mixing. In addition, hub vortex cavitation, as shown in Figure 4, has a sizable cavity.



**Figure 4.** Hub vortex cavitation  
Source: Sezen S., Atlar M. [22]

As a result, the lift force that is meant to be created may be lost if the rudder or any other control surfaces are positioned parallel to the propeller-shaft system axis. Eventually, depending on the axial load distribution on the propeller and hub geometry, the vortices around the hub cause an increase in energy loss, which lowers the propeller's efficiency. On the other hand, hub vortex cavitation may cause vibration, noise, and, in certain instances, surface erosion [23].

#### 1.4. Traveling bubble cavitation

In this type of cavitation, the cavitation nuclei, also known as microbubbles, travel through the flow field until they reach the lower pressure zones, where they transform into large macroscopic cavitation bubbles before collapsing at pressure recovery zones. According to Figure 5, the interactions between the produced bubbles and nearby walls or other bubbles often result in complicated shapes for the bubbles [24].



Figure 5. Travelling bubble cavitation  
Source: Jani D.B. et al. [24]

## 2. Cavitation measurement

In general, cavitation-erosion damage occurs in two stages: 1 — incubation stage, during which the surface deforms plastically but no weight loss is visible and is typically characterized by a duration or incubation period; 2 — erosion stage, during which weight loss and cracking occur at varying rates depending on the time [25]. The incubation period was first described by Leith as the time when significant plastic deformation of the test surface occurs without any visible weight loss [26]. Based on the maximum mean penetration

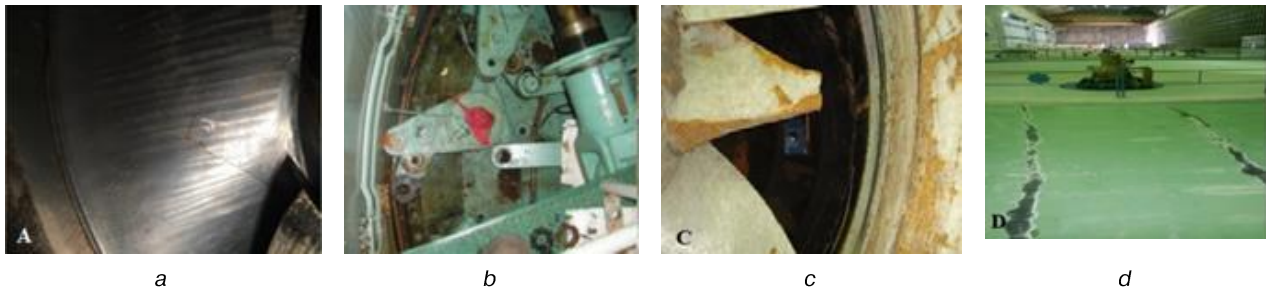
rate, some researchers have developed relationships to estimate the incubation duration. In this regard, the volume loss in the sample divided by the exposed area yields the maximum depth of penetration. This criterion is very helpful for evaluating materials with varying densities and incubation times in various cavitation devices [26]. For materials that have been exposed to cavitation, residual stress measurements and information about early microcrack formation by employing X-ray analysis have been utilized to predict early weight loss [27]. X-ray photoelectron spectroscopy or hyper spectral photography can be used to identify the composition of surface materials and surface degradation [28]. An increase in the first subharmonic of the ultrasonic driving frequency indicates the start of cavitation. The beginning of instability in enormous bubbles just before they begin to collapse is the cause of this phenomenon [29]. The acoustic signs might be different since the measuring approach is based on detecting the bubble collapse inside the bulk liquid near a surface [30]. The CaviSensor and CaviMeter™ systems are two of the cavitation sensors developed by The National Physics Laboratory (NPL) in the United Kingdom [31]. A hydrophone device called the Hygea ultrasonic activity meter by ultrawave uses a 15 mm diameter probe to measure the frequency and acoustic pressure inside an ultrasonic bath [32]. With a straightforward display for ultrasonic frequency (5–50 kHz) and power (10–100%), this device is geared toward end users and is suitable for comparing measurements over time.

## 3. Effects of cavitation on other parts of system

The following measures to detect cavitation have been undertaken: vibration, pressure, acoustic emission, sound measurements [33]. Cavitation severely harms turbines by destroying the runners' and flow channels' surfaces. Moreover, noise generation is significantly increased by cavitation-induced vibration. In hydropower plants, equipment failure brought on by vibration results in shutdowns or a catastrophe [2; 34].

Excessive vibrations wear down components like guide vanes, runner blades, rims, bearings, shaft seals, and runner labyrinths through fatigue, as shown in Figure 6. Sometimes hydropower units are operated in the draft tube surge region to accommodate the various power systems. Draft

tube vibrations also arise during remote operations of a unit with an operator in a surging region. The power plant operator can feel or hear some noise during this procedure, and as a result, it can take the necessary precautions to leave this dangerous zone.



**Figure 6.** Failures due to excessive vibrations:

- a* — runner blade crack Kaplan turbine. Source: [35], *b* — breakage of wicket gate linkage. Source: [36];  
*c* — runner blade damage. Source: made by G. Siamak, S. Ghorbani  
*d* — structural cracks in Haditha hydropower plant. Source: photo by Ministry of Electricity of Iraq, <https://mofa.gov.iq/geneva>

#### 4. Technical solution

Several techniques, including plasma nitriding, shot peening, deep rolling, and coating deposition, have been discussed to enhance cavitation erosion resistance by hardening the material's surface. The improvement depends on the substrate, coating material, and testing conditions, but even when these factors are the same, there are occasionally noticeable variances in the improvement [37]. Furthermore, a protective layer or coating component's production conditions may occasionally be slightly altered, which may even result in a reduction in resistance against untreated material. Plasma nitriding can increase resistance up to

20, but this is not uncommon. Also, up to five times more erosion resistance can be achieved with friction stir processing or shot peening [38]. When increased cavitation-erosion resistance is required, cobalt alloys are employed. Due to the development of an extremely tough, supersaturated fcc-phase known as expanded austenite, or S-phase, low-temperature plasma nitriding is known to significantly improve the CE resistance of austenitic and duplex stainless steels [38]. PVD coatings were one of the other efficient

treatments (an improvement of up to 40 times) created from a very soft reflective coating to one that is extremely hard and resistant to fatigue even at high temperatures [39]. However, the majority of PVD coating applications are linked to their high hardness, elastic modulus, fracture strength, strong tribological properties—particularly low friction coefficient—good oxidation resistance, good fatigue endurance, and high wear resistance [40, 41]. Due to their greater hardness, fracture toughness, and subsequently increased wear resistance compared to their traditional counterparts, nanostructured WC-Co based thermal spray coatings have garnered considerable attention in recent years. The strong tendency of these coatings to decarburize and dissolve during the thermal spraying process, which can impair their mechanical qualities, has long been a challenge for nanostructured WC-Co-based coatings [42]. In addition, the results of studies showed that HVOF sprayed nanostructured WC-Co based coatings had higher wear, corrosion, and cavitation erosion resistance than conventional ones and were better bonded to the substrate with a high fraction of retained near-nano WC grain, low porosity, and a low quantity of harmful reaction products [43].

## Conclusion

To increase the wear resistance of component surfaces, various techniques such as thermal spraying, plasma nitriding, chemical vapor deposition, physical vapor deposition, laser cladding, and hardening have been developed. Also, for different machinery components, thermal spraying techniques like Air Plasma Spraying (APS), Detonation Gun (D-Gun), and HVOF have been used. In hydro power plant facilities, where mechanical components are subjected to severe abrasive wear, HVOF spraying has been extensively utilized to apply WC-based coatings. Due to their exceptional resistance to abrasive wear, WC-based nanostructured and multifaceted coatings have received a lot of interest. By providing an efficient means of controlling processing variables during thermal spraying application, the WC-Co coatings produced by HVOF that contain nanoparticle sizes have better mechanical and tribological properties.

## References

1. Gordon JL. Hydraulic turbine efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2001;28(2):238–253. <https://doi.org/10.1139/100-10>
2. Fahmi ATWK, Kashyzadeh KR, Ghorbani S. A comprehensive review on mechanical failures cause vibration in the gas turbine of combined cycle power plants. *Engineering Failure Analysis*. 2022;106094. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106094>
3. Kashyzadeh KR, Kivi SA, Rynkovskaya M. Fatigue life assessment of unidirectional fibrous composite centrifugal compressor impeller blades based on FEA. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2016;7:6–11.
4. Amiri N, Shaterabadi M, Reza Kashyzadeh K, Chizari M. A comprehensive review on design, monitoring, and failure in fixed offshore platforms. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(12):1349. <https://doi.org/10.3390/jmse9121349>
5. Rus T, Dular M, Širok B, Hočevar M, Kern I. An Investigation of the Relationship Between Acoustic Emission, Vibration, Noise, and Cavitation Structures on a Kaplan Turbine. *Journal of Fluids Engineering*. 2007;129(9):1112–1122. <https://doi.org/10.1115/1.2754313>
6. Cencic T, Hocevar M, Sirok B. Study of Erosive Cavitation Detection in Pump Mode of Pump–Storage Hydropower Plant Prototype. *Journal of Fluids*

- Engineering*. 2014;136(5):051301. <https://doi.org/10.1115/1.4026476>
7. Xavier E, Eduard E, Mohamed F, Francois A., Miguel C. Detection of cavitation in hydraulic turbines. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006;20(4):983–1007. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.08.006>
8. Duraiselvam M, Galun R, Wesling V, Mordike BL, Reiter R, Oligmuller J. Cavitation erosion resistance of AISI 420 martensitic stainless steel laser-clad with nickel aluminide intermetallic composites and matrix composites with TiC reinforcement. *Surface and Coatings Technology*. 2006;201(3–4):1289–1295. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.054>
9. Farrahi GH, Chamani M, Kashyzadeh KR, Mostafazade A, Mahmoudi AH, Afshin H. Failure analysis of bolt connections in fired heater of a petrochemical unit. *Engineering Failure Analysis* 2018;92:327–342. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.06.004>
10. Ming Z, David V, Carme V, Mònica E, Eduard E. Failure investigation of a Kaplan turbine blade. *Engineering Failure Analysis* 2019;97:690–700. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.056>
11. Kumar P, Saini RP. Study of cavitation in hydro turbines — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(1):374–383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.024>
12. Farhat M, Bourdon P, Gagné JL, Remillard L. Improving hydro turbine profitability by monitoring cavitation aggressiveness. *CEA Electricity '99 Conference and Exposition*. Vancouver, March. 1999. p. 1–15.
13. Karimi A, Avellan F. Comparison of erosion mechanisms in different types of cavitation. *Wear*. 1986;113(3):305–322. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90031-1)
14. Shi H, Li Z, Bi Y. An On-line Cavitation Monitoring System for Large Kaplan Turbines. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Tampa, FL, USA; 2007. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385723>
15. Alligne S, Nicolet C, Allenbach P, Kawkabani B, Simond JJ, Avellan F. Influence of the vortex rope location of a Francis turbine on the hydraulic system stability. *Proceedings of the 24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Foz do Iguassu, Brazil, October 27–31, 2008*. <http://doi.org/10.5293/IJFMS.2009.2.4.286>
16. Mohammad DA, Frengki MF. Cavitation Analysis of Kaplan-Series Propeller: Effect of Pitch Ratio and nProp using CFD. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*. 2021;6(2):114–124. <http://doi.org/10.12962/j25481479.v6i2.8747>
17. White FM, Majdalani J. *Viscous Fluid Flow*. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education; 2021. 2021.
18. Brennen CE. *Cavitation and bubble dynamics*. UK: Cambridge University Press; 2013.

19. Higuchi H, Arndt REA, Rogers MF. Characteristics of Tip Vortex Cavitation Noise. *Journal of Fluids Engineering*. 1989;111(4):495–501. <https://doi.org/10.1115/1.3243674>
20. Chang N, Ganesh H, Yakushiji R, Ceccio SL. Tip Vortex Cavitation Suppression by Active Mass Injection. *Journal of Fluids Engineering*. 2011;133(11):111301. <https://doi.org/10.1115/1.4005138>
21. Mohamed F, Francois A. On the detachment of a leading edge cavitation. *Laboratory For Hydraulic Machines Swiss Federal Institute of Technology EPFL-IMHEF-LMH*. Av. De Cour, 33 CH-1006 Lausanne, Switzerland. 2014. Available from: <https://caltechconf.library.caltech.edu/130/> (accessed: 02.05.2023)
22. Sezen S, Atlar M. Mitigation of Hub Vortex Cavitation with Application of Roughness. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022;10:1426. <https://doi.org/10.3390/jmse10101426>
23. Ghassemi H, Mardan A, Ardeshir A. Numerical analysis of hub effect on hydrodynamic performance of propellers with inclusion of pbcf to equalize the induced velocity. *Polish Maritime Research*. 2012;19:17–24. <https://doi.org/10.2478/v10012-012-0010-x>
24. Jani DB, Mistry Y, Suthar M, Suthar A, Shah J, Patel P. An overview on cavitation in centrifugal pump. *International Journal of Innovative Research in Technology*. 2019;6(5):1–5.
25. Pohl M, Stella J. Quantitative CLSM roughness study on early cavitation-erosion damage. *Wear*. 2002; 252(5–6):501–511. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00003-0)
26. Leith WC. *Cavitation damage of metals*. Doctoral thesis. McGill University, Department of Mechanical Engineering; 1960.
27. Mathias M, Göcke A, Pohl M. The residual stress, texture and surface changes in steel induced by cavitation. *Wear*. 1991;150(1–2):11–20. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90302-B](https://doi.org/10.1016/0043-1648(91)90302-B)
28. Ermolieff A, Amouroux A, Marthon S, Faviet JF, Peccoud L. XPS studies of contamination of reactor and silicon surfaces caused by reactive ion etching. *Semiconductor Science and Technology*. 1991;6(4):290–295. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/6/4/011>
29. Santis DP, Sette D, Wanderlingh F. Cavitation Detection: The Use of the Subharmonics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1967;42(2):514–516. <https://doi.org/10.1121/1.1910611>
30. Neppiras E. Measurement of acoustic cavitation. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1968; 15(2):81–88. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1968.29452>
31. Gyöngy M, Coussios CC. Passive cavitation mapping for localization and tracking of bubble dynamics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2010;128(4):175–180. <https://doi.org/10.1121/1.3467491>
32. Verhaagen B, Fernández RD. Measuring cavitation and its cleaning effect. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016;29:619–628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>
33. Čdina M. Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2003;17(6):1335–1347. <https://doi.org/10.1006/mssp.2002.1514>
34. Nandi S, Toliyat HA, Xiaodong L. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors- a review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005;20(4): 719–729. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955>
35. Zhang M, Valentín D, Valero C, Egusquiza M, Egusquiza E. Failure investigation of Kaplan turbine blade. *Engineering failure analysis*. 2019;97:690–700. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.056>
36. Mohanta RK, Chelliah TR, Allamsetty S, Akula A, Ghosh R. Sources of vibration and their treatment in hydro power stations-A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016;20(2):637–648. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.11.004>
37. Alicja KK. Degradation and Protection of Materials from Cavitation Erosion: A Review. *Materials*. 2023;16(5):2058. <https://doi.org/10.3390/ma16052058>
38. Kumar R, Bhandari S, Goyal A. Synergistic effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> reinforcements on slurry erosion performance of nickel-based composite coatings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2017;232(8): 974–986. <https://doi.org/10.1177/1350650117736487>
39. Romero MC, Tschiptschin AP, Scandian C. Low temperature plasma nitriding of a Co<sub>30</sub>Cr<sub>19</sub>Fe alloy for improving cavitation erosion resistance. *Wear*. 2019;426–427:581–588. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.019>
40. Inspektor A, Salvador PA. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: a review. *Surface and Coatings Technology*. 2014;257:138–153. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.068>
41. Andrievski RA. Nanostructured superhard films as typical nanomaterials. *Surface and Coatings Technology*. 2007;201:6112–6116. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.119>
42. Krella AK. Degradation of protective PVD coatings, In: *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete, and Power Industries*. 1st ed. Makhlof A.S.H., Mahmood A. Publisher: Elsevier; 2016. p. 411–440.
43. Basak AK, Celis JP, Vardavoulias M, Matteazzi P. Effect of nanostructuring and Al alloying on friction and wear behaviour of thermal sprayed WC-Co coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2012;206:3508–3516. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.02.030>



### About the authors

**Mohammed Ridha W. Khalid**, Ph.D. student, Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0009-0798-4317; E-mail: 1042218144@rudn.ru

**Kazem Reza Kashyzadeh**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Transport, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0003-0552-9950; E-mail: reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

**Siamak Ghorbani**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0003-0251-3144; eLIBRARY SPIN-code: 8272-2337; E-mail: gorbani-s@rudn.ru

### Сведения об авторах

**Халид Мохаммед Рида Валид**, аспирант базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0009-0798-4317; E-mail: 1042218144@rudn.ru

**Реза Каши Заде Казем**, кандидат технических наук, профессор департамента транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0003-0552-9950; E-mail: reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

**Горбани Сиамак**, кандидат технических наук, доцент базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0003-0251-3144; eLIBRARY SPIN-code: 8272-2337; E-mail: gorbani-s@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-130-139

УДК 62-233.27

EDN: GQXPKZ

Научная статья / Research article

## Распределение нагрузки между телами качения роликовых подшипников

Ю.В. Белоусов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия  
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ juvbelousov@bmstu.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 9 февраля 2024 г.

Доработана: 15 апреля 2024 г.

Принята к публикации: 26 апреля 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Аннотация.** Разработана методика определения степени нагруженности тел качения в рабочей зоне роликовых радиальных однорядных подшипников, согласно которой распределение нагрузки между телами качения в рабочей зоне данных подшипников зависит от их расположения в этой зоне и размеров контактной площадки между максимально нагруженным телом качения и наружным кольцом подшипника. Используя разработанную методику, для конкретных примеров выполнен расчет радиальной силы, действующей на подшипник. В результате получено соотношение между радиальной силой подшипника и силой, действующей на наиболее нагруженное тело качения, которое отличается от принятого в современной практике расчета данных подшипников. Показано также, что данное соотношение не является постоянным, а зависит от величины силы, действующей на наиболее нагруженное тело качения, и размеров колец и тел качения подшипника. В этой связи для определения максимальной нагрузки на тела качения-ролики в рабочей зоне подшипника с помощью разработанной методики предлагается использовать метод итераций или последовательных приближений, сущность которого состоит в первоначальном приближенном определении силы, действующей на наиболее нагруженное тело качения, последующем определении нагрузки на подшипник и сравнении ее с действительной силой. Многократно повторяя этот процесс, можно получить максимальную силу, действующую на тела качения в рабочей зоне подшипника с любой степенью точности.

**Ключевые слова:** роликовый радиальный подшипник, тела качения, полуширина контактной площадки, контактные напряжения



### Для цитирования

Белоусов Ю.В. Распределение нагрузки между телами качения роликовых подшипников // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 130–139. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-130-139>

---

## Load Distribution Between Rolling Elements of Roller Bearings

Yuriy V. Belousov 

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia  
RUDN University, Moscow, Russia

✉ [juvbelousov@bmstu.ru](mailto:juvbelousov@bmstu.ru)

---

### Article history

Received: February 9, 2024

Revised: April 15, 2024

Accepted: April 26, 2024

### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

**Abstract.** A method for determining the degree of loading of rolling elements in the working area of roller radial single-row bearings has been developed, according to this method the load distribution between rolling elements in the working area of these bearings depends on their location in this zone and the size of the contact pad between the maximally loaded rolling element and the outer ring of the bearing. Using the developed methodology, the radial force acting on the bearing is calculated for specific examples. As a result, the ratio between the radial force of the bearing and the force acting on the most loaded rolling body is obtained, which differs from the calculation of these bearings accepted in modern practice. It is also shown that this ratio is not constant, but depends on the magnitude of the force acting on the most loaded rolling body and the size of the rings and rolling bodies of the bearing. In this regard the following is proposed, in order to determine the maximum load on the rolling bodies-rollers in the working area of the bearing using the developed methodology, the method of iterations or successive approximations is suggested to be used, the essence of which consists in the initial approximate determination of the force acting on the most loaded rolling body, subsequent determination of the load on the bearing and comparing it with the actual force. By repeating this process many times, it is possible to obtain the maximum force acting on the rolling elements in the working area of the bearing with any degree of accuracy.

**Keywords:** roller radial bearing, rolling elements, half-width of the contact pad, contact stresses

---

### For citation

Belousov YuV. Load distribution between rolling elements of roller bearings. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):130–139. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-130-139>

---

### Введение

*Подшипники качения* — это опоры валов и вращающихся осей, которые ориентируют их в пространстве и воспринимают действующие на них нагрузки. Причем характер опор зависит от схемы нагружения подшипников. Это может

быть как простая, так и двойная шарнирная опора, заделка [1–5]. Подшипники качения состоят из наружного и внутреннего колец, тел качения (шариков или роликов) и сепаратора, разделяющего тела качения. Наиболее часто применяются шариковые подшипники. Роликовые подшипники используются там, где не подходят

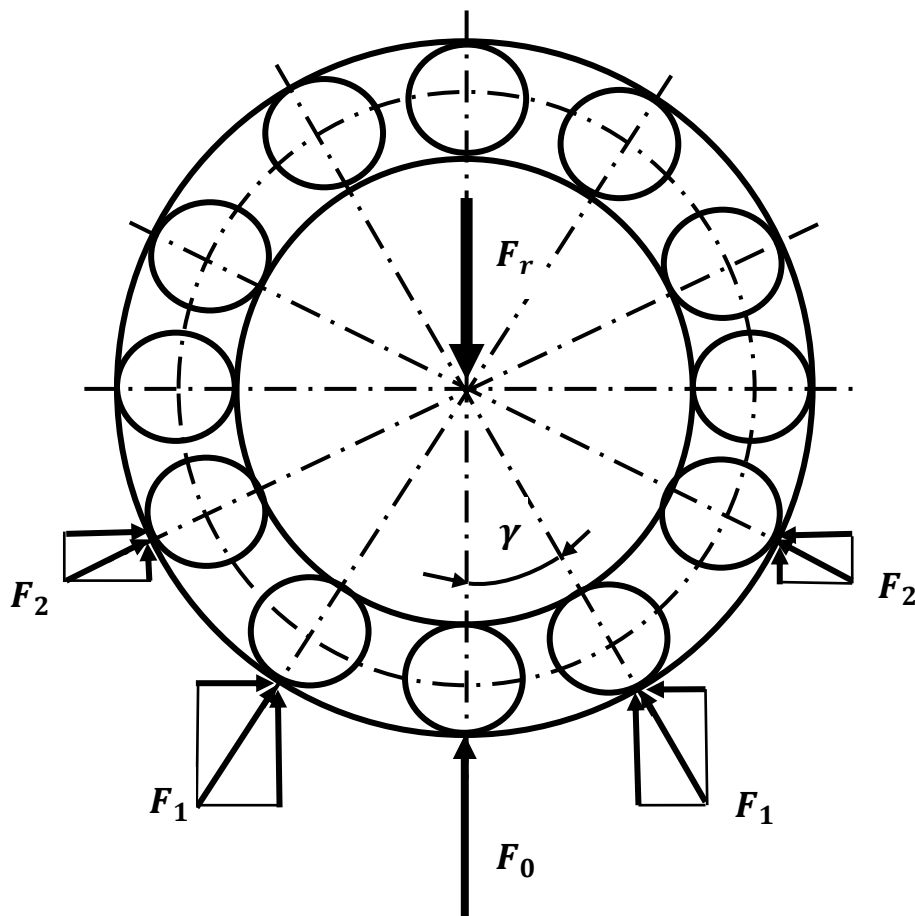
шариковые вследствие больших статических и динамических нагрузок.

Работоспособность подшипников в значительной степени зависит от контактных напряжений между телами качения и кольцами. Максимальные контактные напряжения возникают на поверхности наиболее нагруженного тела качения. Для их определения необходимо знать закон распределения нагрузки между телами качения. Данная задача носит название задачи Штрибека. Она довольно просто решается для шариковых подшипников. Для роликовых подшипников решение отсутствует. В литературе [6–12] имеются достаточно подробные сведения о специфике работы, характере контактного взаимодействия тел качения с кольцами

роликовых подшипников. Однако для решения данной задачи их явно недостаточно. Поэтому задача о нахождении силы, действующей на максимально нагруженное тело качения роликовых подшипников, является довольно актуальной.

## 1. Методы исследования

Рассмотрим роликовый радиальный подшипник. При приложении к подшипнику с углом контакта  $\alpha = 0^\circ$  радиальной силы  $F_r$  тела качения, находящиеся в нижней части подшипника, будут воспринимать нагрузки  $F_0, F_1, F_2, \dots, F_n$  (рис. 1). Тела качения будут нагружены неравномерно.



**Рис. 1.** Распределение нагрузки между телами качения в рабочей зоне подшипника

Источник: выполнено Ю.В. Белоусовым

**Figure 1.** Load distribution between rolling elements in the bearing working area  
Source: made by Yu.V. Belousov

Из условия равновесия следует, что

$$F_r = F_0 + 2 \cdot F_1 \cdot \cos \gamma + 2 \cdot F_2 \cdot \cos(2\gamma) + \dots + 2 \cdot F_n \cdot \cos(n\gamma), \quad (1)$$

где  $F_0$  — сила, действующая на наиболее нагруженное тело качения;  $\gamma$  — угол между смежными телами качения.

Сближение тел качения с кольцами подшипников можно найти по формулам для контакта цилиндров с параллельными осями [13–15]. Сближение тел качения с внутренним кольцом подшипника

$$\delta_i = 8,67 \cdot 10^{-6} \frac{F_i}{l\pi} \left( \frac{2}{3} + \ln \frac{4D_1 D_2}{c_i^2} \right), \quad (2)$$

с наружным кольцом

$$\delta_i = 8,67 \cdot 10^{-6} \frac{F_i}{l} (1 - \ln c_i), \quad (3)$$

где  $c_i$  — половина ширины прямоугольной площадки контакта тела качения с кольцом подшипника

$$c_i = \frac{2,35}{10^3} \sqrt{\frac{F_i}{l} \frac{D_1 D_2}{D_1 \pm D_2}}, \quad (4)$$

где  $l$  — длина тела качения;  $D_1$  — диаметр дорожки качения кольца подшипника;  $D_2$  — диаметр тела качения.

В формуле (4) знак «+» соответствует контакту тела качения с внутренним кольцом подшипника, а знак «−» с наружным.

Нагрузка  $F_r$  на корпусные детали передается наружным кольцом подшипника. Внутреннее кольцо обычно с натягом устанавливается на вал и является как бы его продолжением. Поэтому в данном случае правильнее будет рассмотреть контактное взаимодействие тел качения с наружным кольцом подшипника.

Из геометрических соотношений

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \delta_0 \cos \gamma; \quad \delta_2 = \delta_0 \cos(2\gamma); \\ \delta_i &= \delta_0 \cos(i\gamma); \quad \gamma = 2\pi / z, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $z$  — количество тел качения в подшипнике.

Тогда

$$\cos(i\gamma) = \frac{\delta_i}{\delta_0} = \frac{F_i}{F_0} \frac{1 - \ln c_i}{1 - \ln c_0}. \quad (6)$$

Обозначим  $k_i = F_i / F_0$ . Используя свойства натурального логарифма, формулу (6) можно представить следующим образом:

$$\cos(i\gamma) = \frac{\ln \left( \frac{e}{c_i} \right)^{k_i}}{\ln \left( \frac{e}{c_0} \right)} = \log_{\left( \frac{e}{c_0} \right)} \left( \frac{e}{c_i} \right)^{k_i}. \quad (7)$$

Следовательно,

$$\left( \frac{e}{c_0} \right)^{\cos(i\gamma)} = \left( \frac{e}{c_i} \right)^{k_i}. \quad (8)$$

Теперь представим, что

$$c_0 = m\sqrt{F_0}; \quad c_i = m\sqrt{F_i}, \quad (9)$$

где для внутреннего кольца подшипника

$$m = \frac{2,35}{10^3} \sqrt{\frac{D_1 D_2}{(D_1 - D_2)l}}, \quad (10)$$

тогда

$$\left( \frac{e}{m\sqrt{F_0}} \right)^{\cos(i\gamma)} = \left( \frac{e}{m\sqrt{F_i}} \right)^{k_i}. \quad (11)$$

Возведем правую и левую часть выражения (11) в степень  $1/k_i$ . В результате получим

$$\left( \frac{e}{m\sqrt{F_0}} \right)^{\frac{\cos(i\gamma)}{k_i}} = \frac{e}{m\sqrt{F_i}}. \quad (12)$$

Откуда

$$\sqrt{F_i} = \frac{e}{m \left( \frac{e}{m\sqrt{F_0}} \right)^{\frac{\cos(i\gamma)}{k_i}}} \quad (13)$$

Возведем правую и левую часть формулы (13) в квадрат. Учтем также, что  $F_i = k_i F_0$ :

$$k_i F_0 = F_i = \left[ e / m \left( \frac{e}{m\sqrt{F_0}} \right)^{\frac{\cos(i\gamma)}{k_i}} \right]^2 \quad (14)$$

Из формулы (14) получим следующее выражение для  $k_i$ :

$$\begin{aligned} k_i &= \frac{1}{F_0} \left[ e / m \left( \frac{e}{m\sqrt{F_0}} \right)^{\frac{\cos(i\gamma)}{k_i}} \right]^2 = \\ &= \left[ e / m\sqrt{F_0} \left( \frac{e}{m\sqrt{F_0}} \right)^{\frac{\cos(i\gamma)}{k_i}} \right]^2 = \\ &= \left( \frac{e}{m\sqrt{F_0}} \right)^{2 \left( 1 - \frac{\cos(i\gamma)}{k_i} \right)}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$k_i = \left( \frac{e}{c_0} \right)^{2 \left( 1 - \frac{\cos(i\gamma)}{k_i} \right)} \quad (15)$$

Далее обозначим

$$x = 2 \left( 1 - \frac{\cos(i\gamma)}{k_i} \right) \quad (16)$$

Тогда

$$k_i = \left( \frac{e}{c_0} \right)^x \quad (17)$$

Представим знаменатель формулы (17) в следующем виде [16]:

$$c_0^x = e^{x \ln c_0}, \quad (18)$$

тогда

$$k_i = \frac{e^x}{e^{x \ln c_0}} = e^{x(1 - \ln c_0)} \quad (19)$$

Последняя формула в выражении (19) может быть заменена следующей приближенной формулой, полученной из ряда Тейлора для показателя степени при  $e$  меньше единицы [16]:

$$e^{x(1 - \ln c_0)} = 1 + x(1 - \ln c_0), \quad (20)$$

то есть

$$k_i = 1 + 2 \left( 1 - \frac{\cos(i\gamma)}{k_i} \right) (1 - \ln c_0) \quad (21)$$

В итоге приходим к квадратному уравнению относительно  $k_i$ :

$$a k_i^2 + b k_i + c = 0, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} a &= 1; \quad b = 2 \ln c_0 - 3; \\ c &= 2 \cos(i\gamma) (1 - \ln c_0). \end{aligned} \quad (23)$$

Из двух корней уравнения (22) необходимо выбрать подходящий в данном случае корень. Таким образом, можно определить величину отношения сил, действующих на  $i$ -е и максимально нагруженное тело качения подшипника. Эта величина зависит от расположения тел качения в рабочей зоне подшипника и полуширины прямоугольной площадки контакта максимально нагруженного тела качения с наруж-

ным кольцом подшипника. Суммируя все силы, действующие на тела качения в нагруженной зоне, можно получить силу, действующую на подшипник, то есть решить обратную задачу по определению нагруженности тел качения в рабочей зоне подшипника.

## 2. Результаты и обсуждение

Теперь перейдем к прямой задаче. В литературных источниках [13; 17; 18] приводится формула, которая связывает силу, действующую на наиболее нагруженное тело качения с радиальной нагрузкой на подшипник  $F_r$ . Она выглядит следующим образом:

$$F_0 = \beta \frac{F_r}{z}. \quad (24)$$

В этой формуле  $\beta = 4,37$  для шариковых и  $\beta = 4,06$  для роликовых подшипников.

Формула (24) удобна для практического использования. Однако для роликовых подшипников, в которых, согласно вышеизложенному, сила, действующая на максимально нагруженное тело качения зависит от нескольких параметров, выглядит недостаточно убедительно.

Обратимся к конкретному примеру. Для этого рассмотрим, например, радиальный роликовый подшипник с короткими цилиндрическими роликами № 2306 по Государственному стандарту СССР ГОСТ 8328-75<sup>1</sup>, согласно которому данный подшипник имеет следующие характеристики: внутренний диаметр  $d = 30$  мм; наружный диаметр  $D = 72$  мм; диаметр тела качения  $D_2 = 10$  мм; длину тела качения  $l = 10$  мм. Количество тел качения подшипника  $z = 12$ . Поэтому в рабочей зоне подшипника будет находиться пять тел качения: одно в центре и по два с каждой стороны. Диаметр дорожки качения наружного кольца подшипника

$$\begin{aligned} D_1 &= (d + D) / 2 + D_2 = \\ &= (30 + 72) / 2 + 10 = 61 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Угол между смежными телами качения

$$\gamma = 2\pi / z = \pi / 6 = 30^\circ.$$

Предположим также, что на наиболее нагруженное тело качения действует сила  $F_0 = 1000$  Н. Тогда полуширина площадки контакта этого тела с наружным кольцом подшипника составит

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{2,35}{10^3} \left[ \frac{F_0}{l} \frac{D_1 D_2}{D_1 - D_2} \right]^{1/2} = \\ &= \frac{2,35}{10^3} \left[ \frac{1000}{10} \frac{61 \cdot 10}{61 - 10} \right]^{1/2} = \\ &= 0,081 \text{ мм} = 81 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

Для роликов, ближайших к наиболее нагруженному, то есть при  $i = 1$ , по формулам (23) получим

$$b = 2 \cdot \ln 0,081 - 3 = -8,0266;$$

$$c = 2 \cdot \cos 30^\circ (1 - \ln 0,081) = 6,0852.$$

Подходящий корень уравнения (22) в этом случае  $k_1 = F_1 / F_0 = 0,8476$ .

Для следующих двух крайних роликов в рабочей зоне подшипника ( $i = 2$ ) по формулам (23) получим

$$b = -8,0266;$$

$$c = 2 \cdot \cos 60^\circ (1 - \ln 0,081) = 3,5133.$$

Подходящий корень уравнения (22)

$$k_2 = F_2 / F_0 = 0,4646.$$

<sup>1</sup> ГОСТ 8328-75. Подшипники роликовые радиальные с короткими цилиндрическими роликами. Типы и основные размеры. Государственный комитет СССР по стандартам. М.: Издательство стандартов, 1987. 27 с.

По формуле (1) найдем

$$F_r = F_0 \cdot (2 \cdot k_1 \cdot \cos \gamma + 2 \cdot k_1 \cdot \cos(2\gamma));$$

$$F_r = 1000 \cdot (2 \cdot 0,8476 \cdot \cos 30^\circ + 2 \cdot 0,4646 \cdot \cos 60^\circ)$$

$$= 2932,6863 \text{ Н.}$$

Тогда коэффициент  $\beta$  в формуле (24)

$$\beta = \frac{F_0 \cdot z}{F_r} = \frac{1000 \cdot 12}{2932,6863} = 4,0918.$$

Анализируя данные приведенного примера, можно отметить, что для роликов, ближайших к наиболее нагруженному, которые, в свою очередь, нагружены гораздо больше остальных, второе слагаемое в формуле (20) много меньше единицы (точнее  $-0,1524$ ). Поэтому погрешность определения силы, действующей на эти ролики, не превышает 1,5 % [16; 19]. Для остальных роликов погрешность составит примерно 10...15 %. Однако силы, действующие на эти ролики, гораздо меньше, а их доля в общем балансе сил незначительна. Таким образом, точность приведенных расчетов вполне удовлетворительна.

Согласно предлагаемой методике, распределение нагрузки между телами качения в рабочей зоне подшипника зависит от их расположения и размеров площадки контакта максимально нагруженного тела качения с наружным кольцом подшипника. При этом размеры площадки контакта в значительной степени зависят от силы, воспринимаемой телом качения. Поэтому следует ожидать, что коэффициент  $\beta$  также будет зависеть от этой силы. Для иллюстрации данного предположения примем в приведенном выше примере силу  $F_0 = 500 \text{ Н}$ .

Получим, что  $\beta = 4,0832$ . Когда  $F_0 = 1500 \text{ Н}$ ,  $\beta = 4,0978$ . То есть с уменьшением нагрузки на подшипник величина коэффициента  $\beta$  также уменьшается, а значит, уменьшается и степень нагруженности тел качения в его рабочей зоне, и наоборот. Причем значения коэффициента  $\beta$ , полученные в примерах, отличаются от дан-

ных работ [13; 17]. И на этом отличия не заканчиваются. Здесь речь идет о конкретном подшипнике, приведенном в примере. Для других подшипников этого типа данная тенденция, очевидно, будет сохраняться. В данном случае степень изменения коэффициента  $\beta$  невелика. Для других подшипников ситуация может измениться, так как размеры площадок контакта зависят также и от размеров колец и тел качения подшипников.

Поскольку точное значение коэффициента  $\beta$  в каждом конкретном случае неизвестно, для нахождения максимальной нагрузки на тела качения в рабочей зоне подшипников будет целесообразно использовать метод итераций или последовательных приближений. Первоначально нагрузку можно определять по формуле (24), положив в ней коэффициент  $\beta$  равным, например, 4,09, то есть среднему значению в рассмотренном примере. Затем по формуле (4) определить в первом приближении полуширину площадки контакта наиболее нагруженного тела качения с наружным кольцом подшипника. Далее найти подходящие корни уравнения (22) для всех тел качения в рабочей зоне подшипника и по формуле (1) найти силу  $F_r$ . Полученную силу следует сравнить с действующей. Повторяя этот процесс несколько раз, можно получить искомую силу  $F_0$  с любой степенью точности.

Следует, однако, отметить, что процесс вычисления здесь довольно трудоемкий. Наибольшую трудность представляет нахождение подходящих корней квадратного уравнения. Поэтому для решения этой задачи необходимо разработать специальную программу расчета.

## Заключение

Разработана методика определения соотношения сил, действующих на тела качения в рабочей зоне роликового радиального однорядного подшипника, согласно которой отношение сил, действующих на  $i$ -е и максимально нагруженное тело качения, зависит от расположения



тела качения в рабочей зоне и полуширины прямоугольной площадки контакта максимально нагруженного тела качения с наружным кольцом подшипника. Эта методика позволяет путем суммирования всех сил, действующих на тела качения в рабочей зоне, определять результирующую силу или силу, нагружающую подшипник, то есть решать обратную задачу по определению нагруженности тел качения в рабочей зоне подшипника: по известной максимальной силе, действующей на ролики в рабочей зоне, определять силу, нагружающую сам подшипник.

На этой основе для конкретных примеров решена прямая задача по определению нагруженности тел качения. В результате получено соотношение между радиальной силой в подшипнике и силой, действующей на максимально нагруженное тело качения. Показано, что данное соотношение отличается от принятого в современной практике расчета данных подшипников. Показано также, что данное соотношение не является неизменным. Оно зависит от величины силы, действующей на наиболее нагруженное тело качения, а также от размеров колец и тел качения подшипников.

Поскольку соотношение между радиальной силой в подшипнике и силой, действующей на максимально нагруженное тело качения, не является неизменным, то для определения максимальной нагрузки на тела качения-ролики в рабочей зоне подшипника с использованием разработанной методики предлагается использовать метод итераций или последовательных приближений, сущность которого состоит в первоначальном приближенном определении силы, действующей на наиболее нагруженное тело качения, последующем определении нагрузки на подшипник и сравнении ее с действительной силой. Многократно повторяя этот процесс, можно получить максимальную силу, действующую на тела качения в рабочей зоне подшипника с любой степенью точности. Однако процесс вычисления здесь довольно трудоемкий. Наибольшую трудность представляет нахождение подходящих корней

квадратного уравнения. Поэтому для решения этой задачи необходимо разработать специальную программу расчета.

### Список литературы

1. Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Теоретическое обоснование новых особенностей работы подшипников качения в условиях комбинированного нагружения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 18. № 2. С. 184–195. <http://doi.org/10.22363.2312-8143-2021-22-2-184-195>.
2. Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Экспериментальная проверка новых особенностей работы подшипников в условиях комбинированного нагружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 278–287. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-278-287>
3. Белоусов Ю.В., Кириловский В.В., Рекач Ф.В. Исследование влияния степени соприкосновения поверхностей качения на контактные напряжения в шариковых радиальных подшипниках // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 213–223. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-213-223>
4. Орлов А.В. Повышение статической грузоподъемности шарикоподшипников // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 67–70. EDN: KUIAEN
5. Полубарьев И.Н., Дворянинов И.Н., Салиев Е.Р. Экспериментальная проверка нового подхода к определению нагрузок, действующих на шариковые радиальные однорядные подшипники // Форум молодых ученых. 2017. № 9 (13). С. 591–600. EDN: ZSJYWB
6. Bogdański S., Trajer M.A. Dimensionless multi-size finite element model of a rolling contact fatigue crack // Wear. March 2005. Vol. 258. Iss. 7–8. P. 1265–1272. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.036>
7. Golmohammadi Z., Sadeghi F. A 3D finite element model for investigating effects of refurbishing on rolling contact fatigue // Tribology Transactions. 2020. Vol. 63. Iss. 2. P. 251–264. <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1684606>
8. Paulson N.R., Evans N.E., Bomidi J.A.R., Sadeghi F., Evans R.D., Mistry K.K. A finite element model for rolling contact fatigue of refurbished bearings // Tribology International. 2015. Vol. 85. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.006>
9. Weinzapfel N., Sadeghi F., Bakolas V. A 3D finite element model for investigating effects of material micro-

structure on rolling contact fatigue // *Tribology and Lubrication Technology*. 2011. Vol. 67. Iss. 1. P. 17–19.

10. Abdullah M.U., Khan Z.A., Kruhoeffler W., Blass T. A 3D finite element model of rolling contact fatigue for evolved material response and residual stress estimation // *Tribology Letters*. 2020. Vol. 68. P. 122. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01359-w>

11. Lin H., Wu F., He G. Rolling bearing fault diagnosis using impulse feature enhancement and nonconvex regularization // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 142. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106790>

12. Wang H., Du W. A new K-means singular value decomposition method based on self-adaptive matching pursuit and its application in fault diagnosis of rolling bearing weak fault // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2020. Vol. 16. Iss. 5. <https://doi.org/10.1177/1550147720920781>

13. Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы современных машин и приборов: энциклопедический справочник. М.: Машиностроение, 1997. 640 с.

14. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

15. Gaikwad J.A., Gholap Y.B., Kulkarni J.V. Bearing fault detection using Thomson's multitaper periodogram // 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). 2018. P. 1135–1139. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8663183>

16. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд. 10-е, стер. М.: Наука, 1964. 608 с.

17. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качества: расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.

18. Smith W.A., Randall R.B. Diagnostics using the case western reserve university data: a benchmark study // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 64–65. P. 100–131. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.021>

19. Gao Z., Lin J., Wang X., Xu X. Bearing fault detection based on empirical wavelet transform and correlated kurtosis by acoustic emission // *Materials*. 2017. Vol. 10. Iss. 6. P. 571. <https://doi.org/10.3390/ma10060571>

## References

1. Kirilovskiy VV, Belousov YuV. Theoretical substantiation of new features of rolling bearings operation under combined loading conditions. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(2):184–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-2-184-195>

2. Kirilovskiy VV, Belousov YuV. Experimental verification of new features of bearing operation under combined loading conditions. *Construction Mechanics of Engineering Structures and Structures*. 2021;17(3):278–287. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-2021-17-3-278-287>

3. Belousov YuV, Kirilovskiy VV. Investigation of the influence of the degree of contact of rolling surfaces on contact stresses in ball radial bearing. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):213–223. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-213-223>.

4. Orlov AV. Increasing the static load capacity of ball bearing. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2009;(5):67–70. (In Russ.) EDN: KUIAEH

5. Polubaryev IN, Dvoryaninov IN, Saliev ER. Experimental verification of a new approach to the determination of the loads acting on the single-row radial ball bearings. *Forum Molodyh Uchenyh*. 2017;9(13):591–600. (In Russ.) EDN: ZSJYWB

6. Bogdański S, Trajer MA. Dimensionless multi-size finite element model of a rolling contact fatigue crack. *Wear*. 2005;258(7–8):1265–1272. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.036>

7. Golmohammadi Z, Sadeghi FA. 3D finite element model for investigating effects of refurbishing on rolling contact fatigue. *Tribology Transactions*. 2020;63(2):251–264. <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1684606>

8. Paulson NR, Evans NE, Bomidi JAR, Sadeghi F, Evans RD, Mistry KK. A finite element model for rolling contact fatigue of refurbished bearings. *Tribology International*. 2015;85:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.006>

9. Weinzapfel N, Sadeghi F, Bakolas V. A 3D finite element model for investigating effects of material microstructure on rolling contact fatigue. *Tribology and Lubrication Technology*. 2011;67(1):17–19.

10. Abdullah MU, Khan ZA, Kruhoeffler W, Blass T. A 3D finite element model of rolling contact fatigue for evolved material response and residual stress estimation. *Tribology Letters*. 2020;68:122. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01359-w>

11. Lin H, Wu F, He G. Rolling bearing fault diagnosis using impulse feature enhancement and nonconvex regularization. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020;142:106790. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106790>

12. Wang H, Du W. A new K-means singular value decomposition method based on self-adaptive matching pursuit and its application in fault diagnosis of rolling bearing weak fault. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2020;16(5). <https://doi.org/10.1177/1550147720920781>

13. Nosov VB. *Bearing units of modern machines and devices: Encyclopedic reference book*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1997. (In Russ.)

14. Timoshenko SP, Goodyear J. *Theory of elasticity*. Moscow: Nauka Publ. (In Russ.)

15. Gaikwad JA, Gholap YB, Kulkarni JV. Bearing fault detection using Thomson's multitaper periodogram. *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)* Madurai; 2018. p. 1135–1139. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8663183>

16. Bronstein IN, Semendyaev KA. *Handbook of mathematics for engineers and students of higher edu-*

*cation institutions. Tenth edition, stereotypical*. Moscow: Nauka Publ.; 1964.

17. Perel LYa, Filatov AA. *Rolling bearings: Calculation, design and maintenance of supports: Handbook*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1992. (In Russ.)

18. Smith WA, Randall RB. Diagnostics using the case western reserve university data: a benchmark study. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015;64–65:100–131. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.021>

19. Gao Z, Lin J, Wang X, Xu X. Bearing fault detection based on empirical wavelet transform and correlated kurtosis by acoustic emission. *Materials*. 2017;10(6):571. <https://doi.org/10.3390/ma10060571>

### Сведения об авторе

**Белоусов Юрий Вениаминович**, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; доцент департамента строительства инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 7102-6966, ORCID: 0000-0002-7591-8313; E-mail: juvbelousov@bmstu.ru

### About the author

**Yuriy V. Belousov**, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Basic of Machine Designing, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia; Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 7102-6966, ORCID: 0000-0002-7591-8313; E-mail: juvbelousov@bmstu.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-140-150

УДК 66.065.32-977

EDN: GSPCLR

Научная статья / Research article

## Исследование влияния термоциклирования на магнитные и механические свойства сталей

А.В. Корнилова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Москва, Россия

✉ Anna44@yandex.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 7 февраля 2024 г.

Доработана: 4 апреля 2024 г.

Принята к публикации: 10 апреля 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии  
конфликта интересов.

**Аннотация.** В настоящее время во всем мире процессы термоциклической обработки признаны наиболее эффективными способами повышения стойкости металлообрабатывающих инструментов. Однако для конструкционных сталей эта перспективная технология мало изучена. А вопрос влияния термоциклической обработки на магнитные свойства (коэрцитивную силу) в научной литературе практически не поднимался. Поэтому авторами была поставлена цель исследовать изменение коэрцитивной силы и твердости сталей при применении различных схем термоциклической обработки. При проведении экспериментов были исследованы стали различного назначения (конструкционные и инструментальные) и химического состава. Исследованы маятниковое, низкотемпературное, среднетемпературное, высокотемпературное термоциклирование и термоциклирование вблизи точки Кюри цементита. Все стандартные виды термоциклирования показали падение коэрцитивной силы. Для углеродистой конструкционной стали было проведено термоциклирование вблизи точки Кюри цементита. На третьем цикле сталь показала скачок свойств. В результате исследования структуры выявлено, что произошла частичная сфероидизация перлита, несмотря на то что термоциклирование проходило ниже линии фазовых превращений, а также показано, что зернистый перлит обладает существенно большей коэрцитивной силой, чем перлит пластинчатый. Вопрос нуждается в дальнейшем исследовании, а явление должно найти свое практическое применение.

**Ключевые слова:** термоциклирование, твердость, коэрцитивная сила, пластинчатый перлит, зернистый перлит

### Для цитирования

Корнилова А.В. Исследование влияния термоциклирования на магнитные и механические свойства сталей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 140–150. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-140-150>

© Корнилова А.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Investigation of the Effect of Thermal Cycling on the Magnetic and Mechanical Properties of Steels

Anna V. Kornilova 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

✉ Anna44@yandex.ru

### Article history

Received: February 7, 2024

Revised: April 4, 2024

Accepted: April 10, 2024

### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

**Abstract.** Currently, throughout the world, thermal cycling processes are recognized as the most effective ways to increase the durability of metalworking tools. However, this promising technology has been little studied for structural steels. But the question of the influence of thermal cycling on magnetic properties (coercive force) has practically not been raised in the scientific literature. Therefore, in this work, the goal was to study the change in the coercive force and hardness of steels when using various thermal cycling schemes. During the experiments, steels of various purposes (structural and instrumental) and chemical composition were investigated. The following were studied: — pendulum, low-temperature, medium-temperature, high-temperature thermal cycling and thermal cycling near the Curie temperature of cementite. All standard types of thermal cycling showed a drop in coercive force. Thermal cycling for carbon structural steel was carried out near the Curie point of cementite. The steel showed a jump in properties during the third cycle. A study of the structure revealed that partial spheroidization of pearlite occurred despite the fact that thermal cycling took place below the line of phase transformations. Research has shown that granular pearlite has a significantly greater coercive force than lamellar pearlite. The issue needs further research, and the phenomenon must find its practical application.

**Keywords:** thermal cycling, hardness, coercive force, lamellar pearlite, granular pearlite

### For citation

Kornilova AV. Investigation of the effect of thermal cycling on the magnetic and mechanical properties of steels. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):140–150. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-140-150>

### Введение

*Термоциклирование* — множество циклов изменения температуры между заданными экстремальными значениями. В качестве неразрушающего контроля термоциклирование применяется для выявления скрытых дефектов изделий, которые могут проявиться в процессе эксплуатации. Другое применение термоциклирования — термоциклическая обработка металлических изделий (ТЦО). Метод ТЦО как способ термообработки (ТО) основан на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов. При этом важной особенностью цикла является его интенсивность, отсутствие или

наличие небольших выдержек при крайних температурах, а также оптимальный диапазон изменения температуры. ТЦО позволяет существенно повысить конструкционную прочность и снизить металлоемкость изделий и конструкций. ТЦО металлов и сплавов, являясь одной из разновидностей термопластической обработки, имеет два основных технологических направления в повышении долговечности и надежности деталей машин. Первое из них связано с повышением прочности и вязкости разрушения сталей и сплавов многих конструкционных металлических материалов за счет создания в них оптимальной фрагментарной структуры (измельчение зерна, субструктур-

ное упрочнение) и снятия напряжений. Другое — с упрочнением поверхностных слоев изделий за счет интенсификации диффузионных процессов. В обоих случаях эффекту термоциклического упрочнения существенно способствуют гетерофазное состояние и использование объемного эффекта фазовых превращений в металлах и сплавах [1].

В последние годы интерес к ТЦО в мире возрос. Анализ публикаций в периодической научной печати и патентов по теме исследования показал, что основные страны-патентообладатели по этой теме Япония и Китай (на них приходится 45 % патентов), а наибольшее количество запатентованных решений по ТЦО приходится на 2021 и 2022 гг. В [2] экспериментально доказано, что ТЦО позволяет достигать оптимального сочетания прочности и пластичности в сталях, содержащих никель и марганец за счет измельчения зерна. Эффект термоциклирования применительно к изделиям из композитов рассмотрен в [3].

В результате анализа литературных данных установлено, что многократные полиморфные превращения в стали при ТЦО приводят к фазовому наклепу, измельчению микро- и субзеренной структуры, увеличению плотности дислокаций и дефектов кристаллического строения. Такая структура создает преимущественно деформационное (дислокационное) упрочнение во всем объеме стальной матрицы.

Процессы ТЦО являются наиболее эффективными и экономичными способами повышения стойкости режущих и штамповых металлообрабатывающих инструментов. Однако для изменения свойств конструкционных углеродистых сталей эта перспективная технология мало изучена. А вопрос влияния ТЦО на магнитные свойства сталей практически в научной литературе не поднимался. Поэтому в данной работе была поставлена цель — *исследовать изменение коэрцитивной силы и твердости сталей при применении различных схем ТЦО.*

## 1. Виды термоциклической обработки

По назначению все процессы ТЦО делятся на две основные группы:

1) предварительная ТЦО для улучшения структуры перед термической и механической обработкой;

2) упрочняющая ТЦО (УТЦО), формирующая структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами.

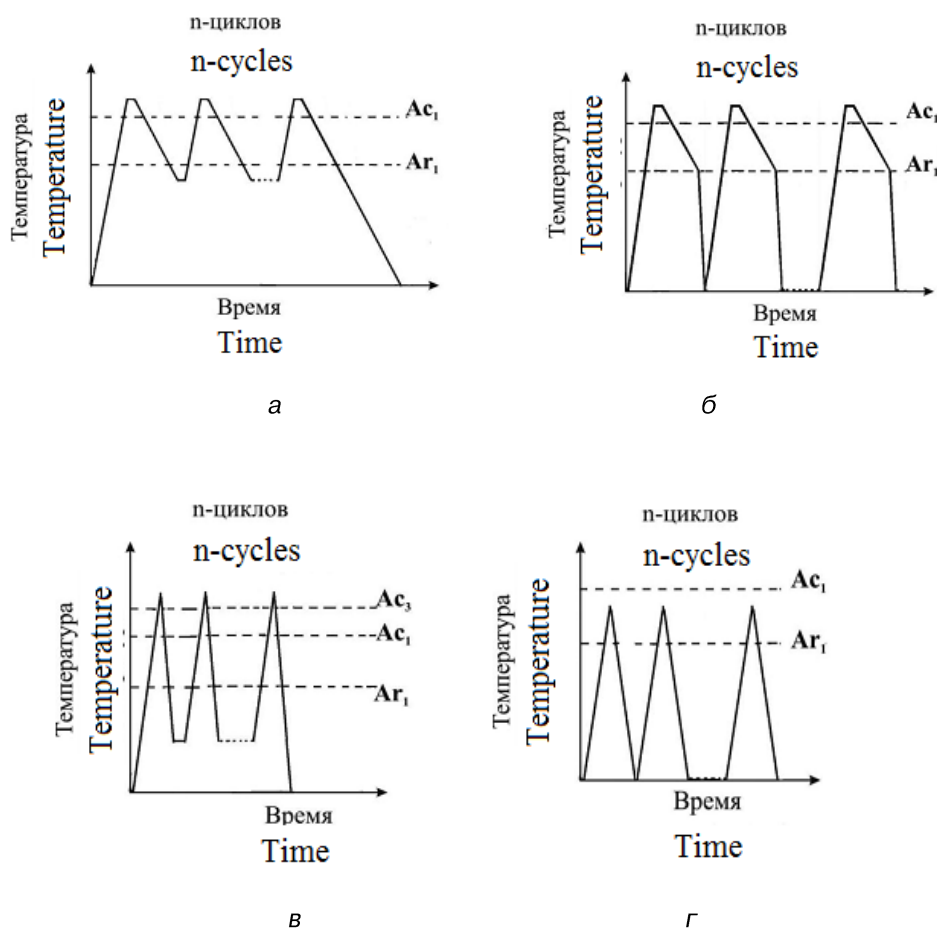
В современных работах российских и белорусских ученых [4–6] и др. предложена новая классификация известных способов УТЦО. УТЦО может проходить с фазовыми превращениями или без них, с завершенными или незавершенными структурно-фазовыми превращениями при циклическом нагреве и охлаждении, осуществляться по диффузионному, сдвиговому или смешанному механизмам фазовой перекристаллизации, самостоятельно или вместе с другими видами воздействий. По уровню прикладываемых температур можно сгруппировать виды ТЦО сталей в три группы: 1) низкотемпературная (НТЦО), 2) среднетемпературная (СТЦО) и 3) высокотемпературная (ВТЦО). Режимы ТЦО различают по назначению, по характеру структурных превращений, по температурному диапазону термоциклирования [4]. СТЦО предусматривает нагрев в цикле до температуры выше  $A_{c1}^1$  (но ниже  $A_{c3}^2$ ), при этом нижняя температура цикла может быть ниже  $A_{t1}^3$  (при применении маятниковой ТЦО (МТЦО), или быть комнатной (лабораторной) 20 °С.

На рис. 1 показаны основные схемы ТЦО. Маятниковую ТЦО используют для измельчения зерна феррито-перлитных сталей. СТЦО применяется для получения сорбитообразной структуры в среднеуглеродистых улучшаемых сталях, для получения структуры зернистого перлита, уменьшения твердости. ВТЦО часто проводят с закалкой в последнем цикле, обеспечивающей повышенный комплекс механических характеристик. НТЦО часто применяется для устранения ликвации кремния.

<sup>1</sup>  $A_{c1}$  — температура начала превращения перлита в аустенит при нагреве (начало перекристаллизации).

<sup>2</sup>  $A_{c3}$  — температура перехода стали в однофазное аустенитное состояние (конец перекристаллизации).

<sup>3</sup>  $A_{t1}$  — температура эвтектидного превращения.



**Рис. 1.** Схемы ТЦО: а — маятниковая, б — среднетемпературная, в — высокотемпературная, г — низкотемпературная  
Источник: [4]

**Figure 1.** Schemes of thermal cycling treatment (TCT):  
а — pendulum, б — medium temperature, в — high temperature, г — low temperature  
Source: [4]

## 2. Материалы и методы

Исследовались инструментальные и конструкционные стали — У8А, 40Х, Х12М и сталь 25. Критические точки исследуемых сталей приведены в табл. 1.

Для проведения экспериментов использовали следующее оборудование и приборы:

1. Лабораторная печь ПМ-16М-1200-В с микропроцессорными регуляторами температуры «РТ-1200» и «РТ-1250 Т».

2. Стационарный твердомер по измерению твердости по Роквеллу HR-150А.

3. Коэрцитиметр (структуроскоп) КИМ-2М.

4. Металлографический микроскоп Bresser Science MTL-201.

5. Пирометр для измерения температур при охлаждении.

Исследовались твердость и коэрцитивная сила. Из-за условия проведения эксперимента коэрцитивная сила измерялась перед первым циклом и после последнего 5-го цикла.

Размеры образцов 58×35×8 мм, что соответствует размерам ГСО 2192–89, комплект СОКС-1 для измерения магнитных характеристик сталей (рис. 2).

Таблица 1

**Критические точки исследуемых сталей при нагревании**

Сталь	Критические точки	
	Ac <sub>1</sub> , °C	Ar <sub>1</sub> , °C
У8А (ГОСТ 1435–99) <sup>1</sup>	720	700
40Х (ГОСТ 4543–2016) <sup>2</sup>	743	693
Х12МФ (ГОСТ 5950–2000) <sup>3</sup>	830	750
Сталь 25 (ГОСТ 1577–93) <sup>4</sup>	735	680

Table 1

**Critical points of the studied steels during heating**

Steel	Critical points Steel's	
	Ac <sub>1</sub> , °C	Ar <sub>1</sub> , °C
U8A (GOST 1435–99) <sup>1</sup>	720	700
40X (GOST 4543–2016) <sup>2</sup>	743	693
X12MV (GOST 5950–2000) <sup>3</sup>	830	750
Steel 25 (GOST 1577–93) <sup>4</sup>	735	680



**Рис. 2.** Часть исследуемых образцов  
Источни к : выполнено А.В. Корниловой

**Figure 2.** Part of the studied specimens  
Source : made by A.V. Kornilova

### 3. Результаты и обсуждение

*Сталь 25 (качественная углеродистая конструкционная сталь).* Термоциклирование было проведено по 4 различным схемам, рекомендованным в [4; 5]. Результаты эксперимента показаны в табл. 2.

В исследовании применялись низкотемпературное ТЦО — нагрев до 780 °С и охлаждение до 20 °С; среднетемпературное ТЦО — нагрев до 780 °С, охлаждение до 680 °С, затем охлаждение до 20 °С на спокойном воздухе; высокотемпературное ТЦО — нагрев до 880 °С, охлаждение до 650 °С и повторение цикла.

<sup>1</sup> ГОСТ 1435–99. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия.

<sup>2</sup> ГОСТ 4543–2016.Metalloпродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия.

<sup>3</sup> ГОСТ 5950–2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали.

<sup>4</sup> ГОСТ 1577–93. Прокат толстолистовой и широкополосный из конструкционной качественной стали. Технические условия.



Каждому виду ТЦО соответствовал контрольный образец, который был нагрет до максимальной температуры цикла и охлажден на спокойном воздухе. Изменение твердости и коэрцитивной силы по сравнению с первоначаль-

ным состоянием у контрольных образцов произошло в меньшей степени, чем у образцов, подвергнутых ТЦО, что, видимо, объясняется более полным прохождением фазовых процессов при ТЦО.

Таблица 2

## Результаты экспериментальных исследований стали 25

№ цикла	Низкотемпературное термоциклирование		Среднетемпературное термоциклирование		Высокотемпературное термоциклирование		Маятниковое термоциклирование	
	HRB	Hc, А/м	HRB	Hc, А/м	HRB	Hc, А/м	HRB	Hc, А/м
1	90	1023	90	1023	90	1023	90	1023
2	72		71		Из-за схемы проведения эксперимента замеры невозможны		Из-за схемы проведения эксперимента замеры невозможны	
3	71		70					
4	70		69					
5	69	783	67	715	67	603	66	603

Источник: выполнено А.В. Корниловой

Table 2

## The Results of Experimental Studies Steel 25

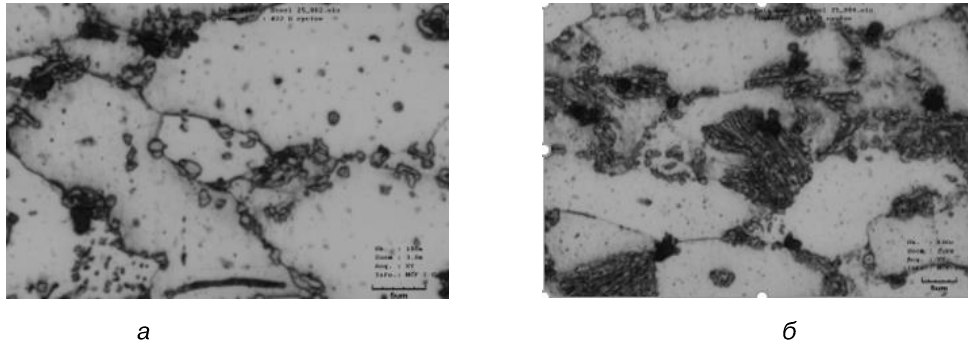
Cycle's number	Low-temperature thermocycling		Medium-temperature thermocycling		High-temperature thermocycling		Pendulum thermocycling	
	HRB	Hc, A/m	HRB	Hc, A/m	HRB	Hc, A/m	HRB	Hc, A/m
1	90	1023	90	1023	90	1023	90	1023
2	72		71		Due to the scheme of the experiment, measurements are not possible		Due to the scheme of the experiment, measurements are not possible	
3	71		70					
4	70		69					
5	69	783	67	715	67	603	66	603

Source: made by A.V. Kornilova

Для проверки результатов работ [7; 8], которые были положены в основу патента [9], был проведен эксперимент по схеме: нагрев при температуре печи 300 °С со скоростью 1 мм/мин до полного прогрева сечения, выдержка 5 мин после полного прогрева, охлаждение на спокойном воздухе. Цикл повторяли 5 раз. На третьем цикле было зафиксировано резкое увеличение коэрцитивной силы и твердости образцов. Исследование микроструктуры после ТЦО показало, что произошла частичная сфероидизация перлита, несмотря на то что ТЦО проходило ниже линии PSK диаграммы «железо — цемен-

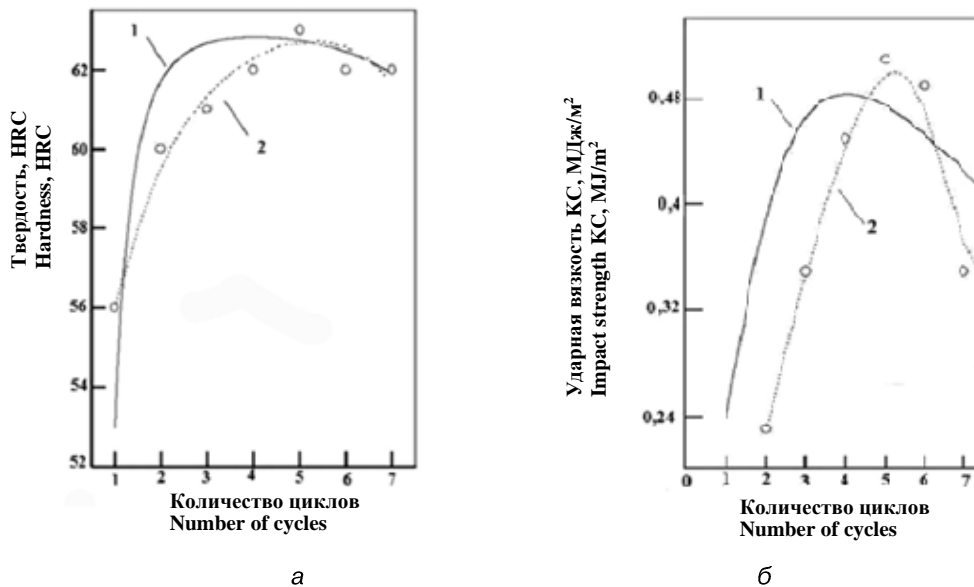
тит», на которой происходит первое фазовое превращение при нагреве (рис. 3).

Аналогичное явление — повышение твердости и ударной вязкости при термоциклировании вблизи точки Кюри цементита (210 °С) было установлено и в работах белорусских ученых научной школы профессора А.А. Шматова, который выявил этот эффект экспериментально и аналитически, решая уравнение Фоккера — Планка и опираясь на данные работ [10–12] для нанокластерного образования зернистого цементита Fe<sub>3</sub>C, эксперимент проводился на стали У8 (рис. 4).



**Рис. 3.** Микроструктура образца (вырезка поперек проката):  
 а — до ТЦО, б — после третьего цикла ТЦО  
 Источник: выполнено А.В. Корниловой

**Figure 3.** Microstructure of the steel specimen (cutting across the rolled product):  
 а — before the TCO, б — after the third cycle of the TCT  
 Source: made by A.V. Kornilova

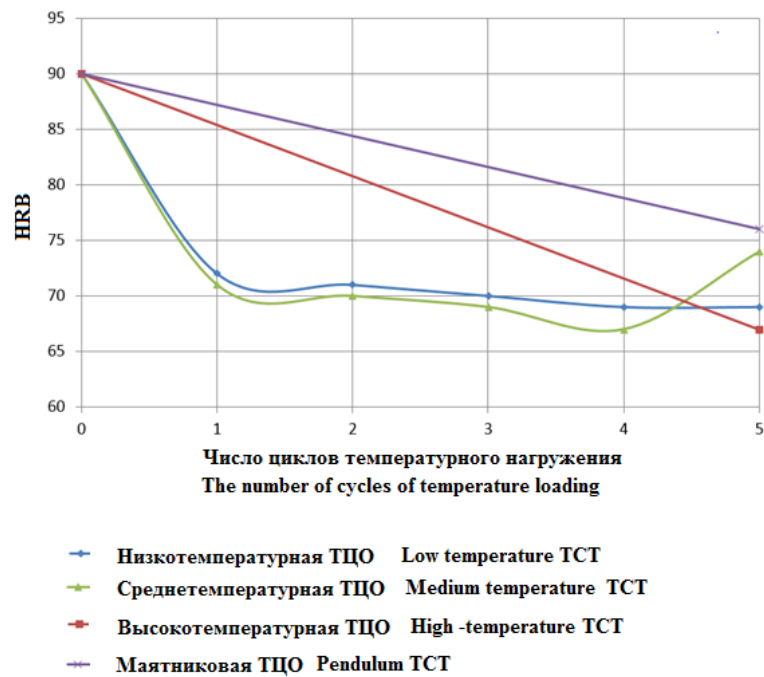


**Рис. 4.** Расчетная и экспериментальная зависимости твердости (а) и ударной вязкости (б) стали У8 после ТЦО:  
 1 — расчетные данные, 2 — экспериментальные данные  
 Источник: [6]

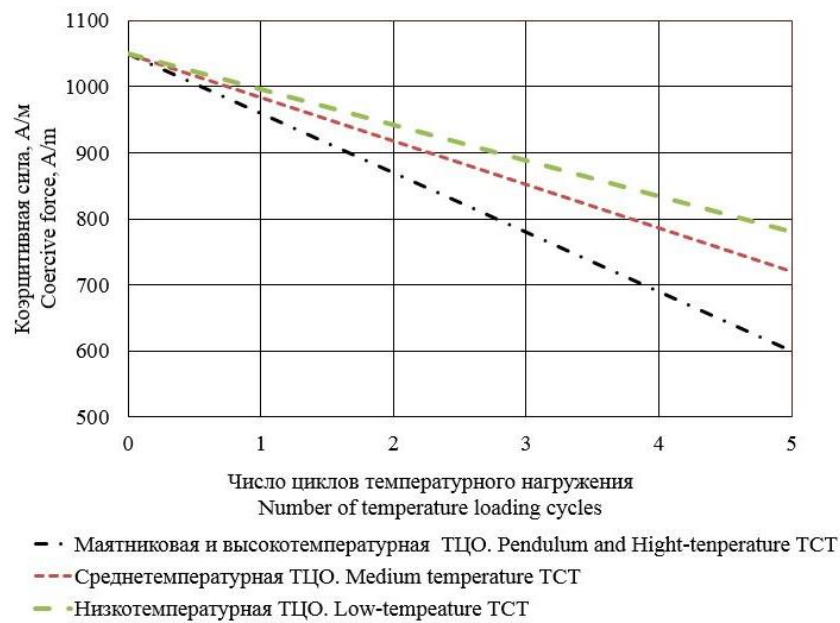
**Figure 4.** Calculated and experimental dependences of the hardness (а) and impact strength (б) of steel U8 after thermal cycling:  
 1 — calculated data, 2 — experimental data  
 Source: [6]

В [13–15] экспериментальным путем установлено, что зернистый перлит обладает более высокими значениями коэрцитивной силы, чем пластинчатый. Пока можно только зафиксировать этот факт и предположить, что граница зерен зернистого перлита имеет большую протяженность, что влияет на процесс намагничи-

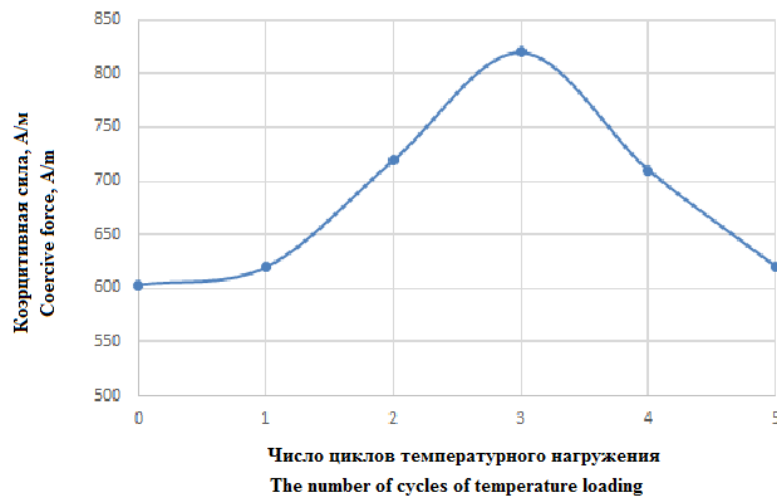
вания. Обобщенные результаты исследования ТЦО исследуемой стали показаны на рис. 5 — зависимость твердости и рис. 6 — коэрцитивной силы от числа циклов ТЦО (конечные значения коэрцитивной силы для высокотемпературного и маятникового ТЦО для исследуемой стали совпали).



**Рис. 5.** Зависимость твердости от числа циклов ТЦО  
 Источник: выполнено А.В. Корниловой  
**Figure 5.** The dependence of hardness on the number of cycles  
 Source: made by A.V. Kornilova



**Рис. 6.** Зависимость коэрцитивной силы от числа циклов ТЦО  
 Источник: выполнено А.В. Корниловой  
**Figure 6.** The dependence of coercive force on the number of cycles  
 Source: made by A.V. Kornilova



**Рис. 7.** Зависимость коэрцитивной силы от числа циклов ТЦО  
Источник: выполнено А.В. Корниловой

**Figure 7.** Dependence of coercive force on the number of cycles TCT  
Source: made by A.V. Kornilova

Также был проведен эксперимент по закалке в воду стали 25, который показал, что закалка исследуемых образцов повысила исследуемые свойства (в 2,5 раза), несмотря на недостаточное для этого количество углерода. Вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

*Сталь У8А.* Сталь имеет эвтектоидную структуру в равновесном состоянии. ТЦО проводилась по схеме нагрев до 750 °С и охлаждение на спокойном воздухе до температуры 20 °С (5 циклов). Графическое представление полученных результатов показано на рис. 7. На третьем цикле сталь показала скачок свойств.

Данные полностью соответствуют результатам работы [6], где данное явление объясняется следующим образом: при ТЦО конкурируют два взаимно противоположных процесса: растворение цементитных фаз, с одной стороны; укрупнение и зародышеобразование включений цементита, — с другой, в результате чего после проведения ТЦО эвтектоидной стали формируется композиционная структура, состоящая из двух видов зерен с большой и малой концентрациями углерода.

*Стали с содержанием хрома.* Для стали 40Х применен маятниковый тип ТЦО, для стали

Х12МФ — высокотемпературное ТЦО. При этих схемах невозможны промежуточные замеры. У стали Х12МФ коэрцитивная сила уменьшилась на пятом цикле с 580 до 470 А/м, у стали 40Х — с 200 до 130 А/м.

## Заключение

ТЦО имеет ряд преимуществ перед стандартными термическими обработками, у которых ограниченное число параметров — температура, время выдержки, скорость нагрева, скорость охлаждения. Возможности совершенствования этих технологий практически исчерпаны. При ТЦО число параметров больше — добавляются число циклов, температуры цикла верхняя и нижняя. Можно варьировать и сами циклы. Важным технологическим моментом при проведении ТЦО являются высокие скорости нагрева.

Одним из неожиданных результатов исследования явилось то, что зернистый перлит обладает существенно большей коэрцитивной силой, чем перлит пластинчатый. Это явление также зафиксировано учеными Института физики металлов УрО РАН при исследовании

эвтектоидной стали с различными формами перлита. Данный вопрос нуждается в дальнейшем исследовании, а явление должно найти свое практическое применение.

1. При проведении экспериментов были исследованы стали различного назначения: инструментальные — углеродистая У8А, легированная Х12МФ, конструкционные — углеродистая сталь 25, легированная 40Х. Исследованы мартеновское, низкотемпературное, среднетемпературное, высокотемпературное ТЦО и ТЦО вблизи точки Кюри цементита (для стали 25).

2. Для стали 25 все стандартные виды ТЦО показали падение исследуемых свойств. Такой же результат показали стали 40Х и Х12МФ. Кроме того, для стали 25 было проведено ТЦО вблизи точки Кюри цементита. На третьем цикле сталь показала скачок свойств. Исследование структуры выявило, что произошла частичная сфероидизация перлита, несмотря на то что ТЦО проходило ниже линии PSK. Также был проведен эксперимент по закалке в воду стали 25, который показал, что закалка исследуемых образцов повысила исследуемые свойства (2,5 раза), несмотря на недостаточное для этого количество углерода. Вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

3. Для стали У8А был проведен эксперимент, который подтвердил выводы ученых белорусской школы, занимающихся исследованием применения ТЦО для инструментальных сталей, под руководством А.А. Шматова. На третьем цикле при нагреве выше  $A_{c1}$  на  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  охлаждение до температуры  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  произошло резкое увеличение исследуемых свойств.

## Список литературы

1. *Аргунова А.А.* Структурные изменения и механические свойства низколегированных сталей и их сварных соединений после термоциклической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01: защищена 14.12.2000: утв. 20.06.2001. Якутск, 2000. 113 с.
2. *Jha S.R., Ardham S., Tennyson G., Gurao N.P., Biswas K.* An experimental and computational framework to investigate the thermal cycling approach for strengthening low SFE FeMnNi medium entropy alloy // *Materialia*. 2023. Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101937>
3. *Luders C., Kalinka G., Li W., Sinapius M., Wille T.* Experimental and numerical multiscale approach to thermally cycled FRP // *Composite Structures*. 2020. Vol. 244. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112303>
4. *Шматов А.А.* Методы упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. № 8. С. 59–63.
5. *Шматов А.А., Шоош Л., Крайни З.* Практическое применение технологии комбинированной упрочняющей обработки стальных инструментов // *Материаловедение*. 2023. № 9. С. 15–21. <http://doi.org/10.31044/1684-579X-2023-0-9-15-21>
6. *Шматов А.А.* Компьютерное моделирование упрочняющей термоциклической обработки эвтектоидной стали // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. № 6. С. 82–86.
7. *Kornilova A.V., Kyaw Z.* The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2022. Т. 23. № 2. С. 140–145. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-140-145>
8. *Zaya K., Paing T., Kornilova A.V.* The effects of operational thermal cycling on mechanical and magnetic properties of structural steels // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 675. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012041>
9. *Корнилова А.В., Идармачев И.М., Тем Паунг М., Чжо Зяяр М.* Способ упрочнения мало- и среднеуглеродистых сталей. Патент № 2701239 С1 Российская Федерация, МПК C21D 1/78: заявл. 20.09.2018.2019.
10. *Chiou Wun C.Jr., Carter Emily A.* Structure and stability of Fe<sub>3</sub> C-cementite surfaces from first principles // *Surface Science*. 2003. Vol. 530 (1–2). P. 88–100. [http://doi.org/10.1016/s0039-6028\(03\)00352-2](http://doi.org/10.1016/s0039-6028(03)00352-2)
11. *Валл А.Н., Растегин А.Э., Перевалова И.А.* Физическая кинетика. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 103 с.
12. *Босов А.Д., Орлов Ю.Н.* Эмпирическое уравнение Фоккера-Планка для нестационарных временных рядов // *Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН*. 2013. № 3. 30 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-3> (дата обращения: 12.01.2024)
13. *Stashkov A.N., Schapova E.A., Afanasiev S.V., Stashkova L.A., Nichipuruk A.P.* Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. Vol. 546. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168850>
14. *Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V.* Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // *NDT*

& E International. 2021. Vol. 118. <http://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102398>.

15. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Щапова Е.А., Казанцева Н.В., Макарова М.В. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления // Физика твердого тела. 2021. Т. 63. № 11. С. 1719–1724. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/51567>(дата обращения: 12.01.2024)

## References

1. Argunova AA. Structural changes and mechanical properties of low-alloy steels and their welded joints after thermocyclic processing (dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 02/05/01: defended 12/14/2000: approved. 06/20/2001. Yakutsk; 2000. (In Russ.)

2. Jha SR, Ardham S, Tennyson G, Gurao NP, Biswas K. An experimental and computational framework to investigate the thermal cycling approach for strengthening low SFE FeMnNi medium entropy alloy. *Materialia*. 2023; 32:101937. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101937>

3. Luders C, Kalinka G, Li W, Sinapius M, Wille T. Experimental and numerical multiscale approach to thermally cycled FRP. *Composite Structures*. 2020;244:112303. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112303>

4. Shmatov AA. Methods of hardening processing of metalworking tools. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021;8:59–63. (In Russ.)

5. Shmatov AA, Shoosh L, Kraini Z. Practical application of the technology of combined hardening processing of steel tools. *Materials Science*. 2023;9:15–21. (In Russ.) <http://doi.org/10.31044/1684-579X-2023-09-15-21>

6. Shmatov AA. Computer modeling of strengthening thermal cyclic treatment of eutectoid steel. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021;6:82–86. (In Russ.)

7. Kornilova AV, Kyaw Z. The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in

carbon hypoeutectoid steels. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):140–145. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-140-145>

8. Zaya K, Paing T, Kornilova AV. The effects of operational thermal cycling on mechanical and magnetic properties of structural steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;675:1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012041>

9. Kornilova AV, Idarmachev IM, Thet Paing M, Zhuo Zayar M. Method of hardening low- and medium-carbon steels. Patent No. 2701239 C1 Russian Federation, IPC C21D 1/78.: application. 09.20.2018. 2019. (In Russ.)

10. Chiou Wun CJr, Carter Emily A. Structure and stability of Fe<sub>3</sub>C-cementite surfaces from first principles. *Surface Science*. 2003;530(1–2):88–100. [http://doi.org/10.1016/s0039-6028\(03\)00352-2](http://doi.org/10.1016/s0039-6028(03)00352-2)

11. Wall AN, Rastegin AE, Perevalova IA. *Physical kinetics*. Irkutsk: ISU Publishing House; 2014.

12. Bosov AD, Orlov YuN. *Empirical Fokker-Planck equation for non-stationary time series*. Preprint of IPM im. M.V. Keldysh RAS. 2013;3. (In Russ.) Available from: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-3> (accessed: 12.01.2024)

13. Stashkov AN, Schapova EA, Afanasiev SV, Stashkova LA, Nichipuruk AP. Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022; 546:168850. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168850>

14. Stashkov AN, Schapova EA, Nichipuruk AP., Korolev AV. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel. *NDT & E International*. 2021;118:102398. <http://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102398>

15. Nichipuruk AP, Stashkov AN, Shchapova EA, Kazantseva NV, Makarova MV. Structure and magnetic properties of 09G2S steel produced by selective laser alloying. *Solid State Physics*. 2021;63(11):1719–1724. (In Russ.) Available from: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/51567> (accessed: 12.01.2024)

## Сведения об авторе

**Корнилова Анна Владимировна**, доктор технических наук, профессор кафедры испытания сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240, ORCID: 0000-0001-5569-9320; E-mail: [anna44@yandex.ru](mailto:anna44@yandex.ru)

## About the author

**Anna V. Kornilova**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240; ORCID: 0000-0001-5569-9320; E-mail: [anna44@yandex.ru](mailto:anna44@yandex.ru)



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-151-161

УДК 004.852

EDN: TMZJXN

Научная статья / Research article

## Построение предиктивной модели для прогнозирования цен недвижимости на основе сформированной базы данных

П.А. Коняева, О.А. Салтыкова<sup>✉</sup>, С.А. Купреев<sup>ID</sup>

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ saltykova-oa@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 28 января 2024 г.

Доработана: 12 марта 2024 г.

Принята к публикации: 8 апреля 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Представлено решение актуальной задачи прогнозирования цен на недвижимость с помощью построения предиктивной модели на основе сформированной базы данных по недвижимости в Москве, размещенной на веб-сайте «Move Недвижимость». Рассмотрены существующие методы машинного обучения для решения задачи прогнозирования и применен один из них — множественная линейная регрессия. Проведен регрессионный анализ полученных результатов решения задачи прогнозирования. В качестве управляющих параметров рассматриваются 11 независимых переменных. Исследовано влияние учитываемых при построении модели переменных на результаты решения задачи прогнозирования цен на недвижимость. Определено, какие из независимых переменных оказывают наибольшее влияние на результаты работы модели. Для улучшения качества модели была осуществлена предобработка и стандартизация признаков, а также идентификация выбросов и пропусков значений при формировании базы данных. Коэффициенты модели множественной линейной регрессии определялись с помощью метода наименьших квадратов. Для оценки качества модели проводился анализ следующих параметров модели:  $R$ -квадрат, скорректированный  $R$ -квадрат,  $p$ -значение. Результатом построения предиктивной модели является полученное уравнение регрессии. Применение полученного уравнения может быть использовано для последующего учета конкретных характеристик при решении задачи прогнозирования цен на недвижимость. Показаны преимущества использования данного метода и перспективы применения полученного результата.

**Ключевые слова:** машинное обучение, регрессионный анализ, множественная линейная регрессия, метод наименьших квадратов, уравнение регрессии,  $R$ -квадрат, скорректированный  $R$ -квадрат,  $p$ -значение



#### Для цитирования

Коняева П.А., Салтыкова О.А., Купреев С.А. Построение предиктивной модели для прогнозирования цен недвижимости на основе сформированной базы данных // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 151–161. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-151-161>

---

## Building a Predictive Model for Predicting Real Estate Prices Based on the Generated Database

Polina A. Konyaeva, Olga A. Saltykova<sup>✉</sup>, Sergei A. Kupreev<sup>ID</sup>

RUDN University, Moscow, Russia

✉ [saltykova-oa@rudn.ru](mailto:saltykova-oa@rudn.ru)

---

#### Article history

Received: January 28, 2024

Revised: March 12, 2024

Accepted: April 8, 2024

---

#### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

---

#### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

---

**Abstract.** The work is devoted to solving the current problem of forecasting real estate prices by building a predictive model based on the generated database of real estate in Moscow, posted on the Move Real Estate website. Existing machine learning methods for solving the forecasting problem are considered and one of them is applied — multiple linear regression. A regression analysis of the obtained results of solving the forecasting problem was carried out. Eleven independent variables are considered as control parameters. The influence of the variables taken into account when constructing the model on the results of solving the problem of forecasting real estate prices was studied. It was determined which of the independent variables have the greatest impact on the results of the model. To improve the quality of the model, preprocessing and standardization of features were carried out. Identification of outliers and omissions of values was carried out during the formation of the database. The coefficients of the multiple linear regression model were determined using the least squares method. To assess the quality of the model, the following model parameters are analyzed: *R*-squared, adjusted *R*-squared, *p*-value. The result of constructing a predictive model is the resulting regression equation. The application of the resulting equation can be used to subsequently take into account specific characteristics when solving the problem of forecasting real estate prices. The work shows the advantages of using this method and the prospects for applying the obtained result.

**Keywords:** machine learning, regression analysis, multiple linear regression, least squares method, regression equation, *R*-squared, adjusted *R*-squared, *p*-value

---

#### For citation

Konyaeva PA, Saltykova OA., Kupreev SA. Building a predictive model for predicting real estate prices based on the generated database. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):151–161. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-151-161>

---

#### Введение

Машинным обучением называют совокупность методов и алгоритмов, направленных на автоматическое обучение системы, основываясь на определенных данных [1]. Методы и подходы машинного обучения часто применя-

ются к решению не только сугубо научных, но и прикладных задач, в частности для решения задач прогнозирования изменения цен на недвижимость [2–7], поведения клиентов [8–11], динамики рынка ценных бумаг [12–14] и пр. Методы, которые применяются для решения вышеупомянутых задач, относятся к методам



машинного обучения и интеллектуального анализа данных, активное развитие и применение которых мы наблюдаем в последнее время [15–16]. В литературе можно встретить работы по прогнозированию цен на московском рынке с точки зрения микро- и макроэкономических показателей [17–18]. Целью данной работы является решение актуальной задачи по построению математической модели на основе методов машинного обучения, для решения задачи прогнозирования динамики цен на недвижимость в Москве на основе данных с сайта о недвижимости. В области машинного обучения широко используется регрессионный анализ [19], одним из наиболее распространенных методов в прогнозировании цен на недвижимость является множественная линейная регрессия [20]. Для использования этого метода необходимо провести анализ нескольких переменных, которые могут повлиять на цену недвижимости. Это позволяет определить, какие из независимых переменных оказывают наибольшее влияние на цену недвижимости. Полученная в результате моделирования модель, построенная на основе реальных данных, позволит предсказать цену недвижимости на основании наиболее значимых факторов, влияющих на ее динамику.

## 1. Методы исследования

На основе сформированной базы данных по объявлениям недвижимости, размещенным на веб-сайте «Move Недвижимость»<sup>1</sup> и обработанным параметрам будет построена предиктивная модель и выведено уравнение регрессии. Для предсказания цены, а также значения и оценки связи между одной зависимой переменной (ценой) и 11 независимыми переменными (количество комнат, площадь, этаж квар-

тиры, этаж дома, год постройки, расстояние до метро, тип транспорта до метро, тип продажи, тип квартиры, время до центра города, время до метро) будет использоваться статистический метод — множественная линейная регрессия, которую можно представить в виде следующего уравнения:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $y$  — зависимая переменная,  $x_1, x_2, \dots, x_k$  — независимые переменные,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  — коэффициенты, а  $\varepsilon$  — случайная ошибка. Коэффициенты модели множественной линейной регрессии находятся с помощью метода наименьших квадратов<sup>2</sup>. Метод наименьших квадратов (МНК) — это метод оценки параметров линейной регрессии, используемый для минимизации суммы квадратов разностей между наблюдаемыми значениями и значениями, расчет которых производится по модели.

## 2. Реализация построения предиктивной модели

Построим первую модель МНК<sup>3</sup>, не производя предварительную обработки данных (рис. 1).

В результате получается следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} y = & 148916981.57767546 + 9426604.6819443 * \text{Number rooms} + \\ & + 18.550068520072813 * \text{Square} + \\ & + 239260.53265802326 * \text{Floor sq.} + \\ & + 73329.76103038796 * \text{Floors} + (-47231.61525882067 * \text{Year}) + \\ & + 24804.15186899586 * \text{Distance metro km} + \\ & + (-1487711.8963242061 * \text{Type transport to metro}) + \\ & + (-13554120.797380297 * \text{Sale type}) + \\ & + (-41923145.71242697 * \text{Flat type}) + \\ & + (-406837.02772176114 * \text{Time to the center (from metro)}) + \\ & + 61407.48561820931 * \text{Time to metro in minutes.} \end{aligned} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Move Недвижимость // Move.ru — портал о недвижимости Москвы. URL: <https://move.ru/> (дата обращения: 28.02.2023)

<sup>2</sup> Профессиональное сообщество NTA Метод наименьших квадратов: формулы, код и применение // Хабр. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/672540/> (дата обращения: 09.04.2023).

<sup>3</sup> Как читать и интерпретировать таблицу регрессии // Кодкамп. 2022. URL: <https://www.codecamp.ru/blog/read-interpret-regression-table/> (дата обращения: 10.04.2023).

Далее будут просмотрены параметры полученной модели, но перед этим определим, что такое  $R$ -квадрат ( $R$ -squared), скорректированный  $R$ -квадрат (Adj.  $R$ -squared),  $p$ -значение ( $P$  для коэффициентов и Prob ( $F$ -statistic) для всей модели)<sup>4</sup>.

$R$ -квадрат является статистической мерой, которая оценивает, насколько хорошо выбран-

ная модель подходит для наблюдаемых данных и определяется следующей математической формулой:

$$R^2 = 1 - \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\sigma}_y^2} = 1 - \frac{\frac{SS_{res}}{n}}{\frac{SS_{tot}}{n}} = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}, \quad (3)$$

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Price	R-squared:	0.096			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.096			
Method:	Least Squares	F-statistic:	391.0			
Date:	Sun, 30 Apr 2023	Prob (F-statistic):	0.253			
Time:	13:15:23	Log-Likelihood:	-7.6250e+05			
No. Observations:	40597	AIC:	1.525e+06			
Df Residuals:	40585	BIC:	1.525e+06			
Df Model:	11					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	1.489e+08	2.15e+07	6.924	0.000	1.07e+08	1.91e+08
x1	9.427e+06	2.21e+05	42.586	0.000	8.99e+06	9.86e+06
x2	18.5501	18.074	1.026	0.305	-16.874	53.975
x3	2.393e+05	3.36e+04	7.120	0.021	1.73e+05	3.05e+05
x4	7.333e+04	2.45e+04	2.988	0.003	2.52e+04	1.21e+05
x5	-4.723e+04	1.06e+04	-4.472	0.000	-6.79e+04	-2.65e+04
x6	2.48e+04	8.06e+04	0.308	0.758	-1.33e+05	1.83e+05
x7	-1.488e+06	5.29e+05	-2.810	0.005	-2.53e+06	-4.5e+05
x8	-1.355e+07	5.22e+05	-25.947	0.214	-1.46e+07	-1.25e+07
x9	-4.192e+07	2.89e+06	-14.481	0.030	-4.76e+07	-3.62e+07
x10	-4.068e+05	1.56e+04	-26.058	0.000	-4.37e+05	-3.76e+05
x11	6.141e+04	1.93e+04	3.185	0.401	2.36e+04	9.92e+04

**Рис. 1.** Модель 1  
 Источник: выполнено П.А. Коняевой, О.А. Салтыковой  
**Figure 1.** Model 1  
 Source: compiled by P.A. Konyaeva, O.A. Saltykova

где  $SS_{res} = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  — сумма квадратов остатков регрессии;  $y_i, \hat{y}_i$  — фактические и расчетные значения объясняемой переменной;  $SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = n\hat{\sigma}_y^2$  — общая сумма квадратов;  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ . В случае линейной регрессии с константой:

$$SS_{tot} = SS_{reg} + SS_{res},$$

где  $SS_{reg} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$  — объясненная сумма квадратов. Отсюда возможно получить упрощенное определение  $R$ -квадрата как доли объясненной суммы квадратов в общей<sup>6</sup>:

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}}. \quad (4)$$

$R$ -квадрат может принимать значения от 0 до 1. Значение 0 означает, что выбранная модель не объясняет никакой изменчивости

<sup>4</sup>  $R$  — значит регрессия // Хабр. 2018. URL: <https://habr.com/ru/articles/350668/> (дата обращения: 10.04.2023).

<sup>6</sup> Коэффициент детерминации. // Википедия. 2022. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент\\_детерминации](https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_детерминации) (дата обращения: 10.04.2023).

наблюдаемых данных, а значение 1 указывает на идеальное соответствие выбранной модели и наблюдаемых данных.

Скорректированный  $R$ -квадрат, или скорректированный коэффициент детерминации, является статистической мерой, которая учитывает количество регрессоров (независимых переменных) в модели, и представляет собой измененный коэффициент детерминации  $R$ -квадрат, исправленный с учетом числа независимых переменных в модели:

$$R_{\text{скорр}}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1}, \quad (5)$$

где  $R^2$  — коэффициент детерминации,  $n$  — количество наблюдений (то есть размер выборки),  $k$  — количество независимых переменных в модели.

С помощью скорректированного  $R$ -квадрата можно оценить, насколько хорошо модель соответствует данным, учитывая количество регрессоров. Чем ближе значение скорректированного  $R$ -квадрата к 1, тем лучше соответствие модели данным.

$P$ -значение — это вероятность получения результата, не менее экстремального, чем наблюдаемый результат, при условии, что нулевая гипотеза верна. Если  $P$ -значение меньше предварительно определенного уровня значимости (менее 0,05), то нулевая гипотеза отвергается, что означает, что существует статистически значимая разница между группами или переменными. В противном случае ( $P$  более 0,05) нулевая гипотеза не отвергается, что означает, что недостаточно данных, чтобы вынести окончательный вывод.

Проверим значимость коэффициентов регрессии  $\beta_k$ . Для этого выведем гипотезы<sup>7</sup> для  $\beta_k$  для  $k = 0; 11$ :

$H_0: \beta_k = 0$  — коэффициент незначим;

$H_1: \beta_k \neq 0$  — коэффициент значим;

$\alpha = 0,05$ ,

$P$ -значение у коэффициентов  $\beta_k = (0,000; 0,000; 0,021; 0,003; 0,000; 0,005; 0,030; 0,000) < \alpha = 0,05$ , поэтому принимаем гипотезу  $H_1$  (коэффициент  $\beta_k$  значим с вероятностью 95 % для  $k = 0, 1, 3, 4, 5, 7, 9, 10$ ).

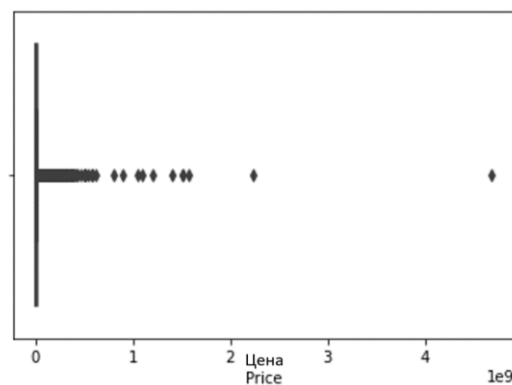
$P$ -значение у коэффициентов  $\beta_k = (0,305; 0,758; 0,214; 0,401) > \alpha = 0,05$ , поэтому принимаем гипотезу  $H_0$  (коэффициент  $\beta_k$  незначим с вероятностью 95 % для  $k = 2, 6, 8, 11$ ).

Значения параметров, полученные для всей модели:

$R$ -squared = 0,096; Adj.  $R$ -squared = 0,096; Prob ( $F$ -statistic) = 0,253.

**Вывод:** уравнение незначимо при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $0,253 > 0,05$ ), при этом 9,6 % (и 9,6 % по скорректированному  $R$ -квадрату) — вариация целевой переменной  $y = \text{price}$  объясняется вариацией факторов.

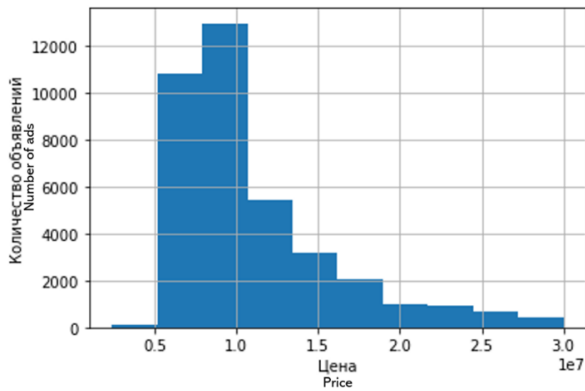
На следующем этапе после построения первой модели и получения результатов параметров необходимо сделать обработку данных. При проверке данных возможно столкнуться с выбросами<sup>8</sup> (рис. 2) — аномальными значениями, которые необходимо убрать. После предобработки данных (рис. 3) будут построены гистограммы без аномальных значений.



**Рис. 2.** Выброс в данных с параметром — цена  
Источники: выполнено П.А. Коняевой, О.А. Салтыковой  
**Figure 2.** Outlier in data with the price parameter  
Source: compiled by P.A. Konyaeva, O.A. Saltykova

<sup>7</sup> Мир статистических гипотез // Хабр. 2021. URL: <https://habr.com/ru/articles/558836/> (дата обращения: 11.04.2023).

<sup>8</sup> Выбросы в данных // Машинное обучение. 2023. URL: <https://www.dmitrymakarov.ru/data-analysis/outliers-09/> (дата обращения: 11.04.2023).



**Рис. 3.** Гистограмма по цене после удаления выбросов  
 Источник: выполнено П.А. Коняевой, О.А. Салтыковой  
**Figure 3.** Histogram by price after removal of outliers  
 Source: compiled by P.A. Konyaeva, O.A. Saltykova

Работу с выбросами необходимо проделывать со всеми параметрами из базы данных. После обработки построим вторую модель МНК (рис. 4).

В результате получается следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned}
 y = & -13143953.557547348 + \\
 & + 1746037.573731812 * \text{Number rooms} + \\
 & + 41982.3071491594 * \text{Square} + 46420.9958310878 * \text{Floor sq.} + \\
 & + 79133.40581343621 * \text{Floors} + 12236.46452122052 * \text{Year} + \\
 & + (-153413.0293165489 * \text{Distance metro km}) + \\
 & + (-57272.23972169444 * \text{Type transport to metro}) + \\
 & + (-5411948.059501247 * \text{Sale type}) + \\
 & + (-2621892.3884117184 * \text{Flat type}) + \\
 & + (-60224.83508604619 * \text{Time to the center (from metro)}) + \\
 & + (16731.62320475588 * \text{Time to metro in minutes}).
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

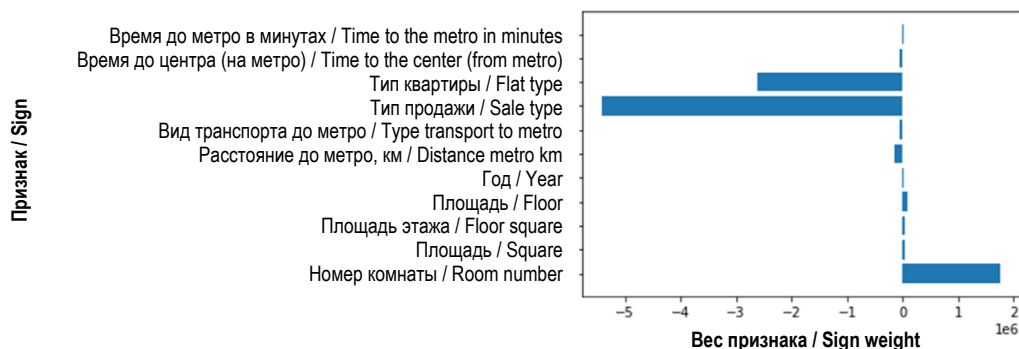
Аналогично проверим значимость коэффициентов регрессии  $\beta_k$ .  $P$ -значение у коэффициентов  $\beta_k = (0,000; 0,000; 0,007; 0,000; 0,000; 0,000; 0,000; 0,014; 0,000; 0,000; 0,000; 0,005) < \alpha = 0,05$ , поэтому принимаем гипотезу  $H_1$  (коэффициент  $\beta_k$  значим с вероятностью 95 % для  $k = \overline{0; 11}$ ).

Значения параметров, полученные для всей модели:  $R$ -squared = 0,864; Adj.  $R$ -squared = 0,857; Prob ( $F$ -statistic) = 0,000.

Вывод: уравнение значимо при  $\alpha = 0,05$ .

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Price	R-squared:	0.864			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.857			
Method:	Least Squares	F-statistic:	5496.			
Date:	Sun, 30 Apr 2023	Prob (F-statistic):	0.000			
Time:	13:16:04	Log-Likelihood:	-4.9302e+05			
No. Observations:	38568	AIC:	9.861e+05			
Df Residuals:	38568	BIC:	9.862e+05			
Df Model:	11					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-1.314e+07	1.58e+06	-8.321	0.000	-1.62e+07	-1e+07
x1	1.746e+06	3.05e+04	57.188	0.000	1.69e+06	1.81e+06
x2	4.198e+04	1349.681	31.105	0.007	3.93e+04	4.46e+04
x3	4.642e+04	3190.887	14.548	0.000	4.02e+04	5.27e+04
x4	7.913e+04	2324.085	34.049	0.000	7.46e+04	8.37e+04
x5	1.224e+04	766.854	15.957	0.000	1.07e+04	1.37e+04
x6	-1.534e+05	6963.841	-22.030	0.000	-1.67e+05	-1.4e+05
x7	-5.727e+04	4.51e+04	-1.269	0.014	-1.46e+05	3.12e+04
x8	-5.412e+06	4.33e+04	-124.965	0.000	-5.5e+06	-5.33e+06
x9	-2.622e+06	2.97e+05	-8.840	0.000	-3.2e+06	-2.04e+06
x10	-6.022e+04	1289.406	-46.707	0.000	-6.28e+04	-5.77e+04
x11	1.673e+04	2779.242	6.020	0.005	1.13e+04	2.22e+04

**Рис. 4.** Модель 2  
 Источник: выполнено П.А. Коняевой, О.А. Салтыковой  
**Figure 4.** Model 2  
 Source: compiled by P.A. Konyaeva, O.A. Saltykova



**Рис. 5.** Визуализация значимости признаков  
 Источник: выполнено П.А. Коняевой, О.А. Салтыковой  
**Figure 5.** Visualization of the significance of signs  
 Source: compiled by P.A. Konyaeva, O.A. Saltykova

Произведем визуализацию того, какой вклад вносит каждый из коэффициентов (рис. 5). Очевидно, что признаки имеют совершенно разное влияние на итоговую цену. При просмотре базы с параметрами, содержащей статистические данные, убедимся, что значения по каждому признаку имеют разный масштаб разброса значений. Для решения этой проблемы можно применить стандартизацию признаков (это процесс преобразования значений признаков в наборы с нулевым средним и единичным стандартным отклонением) [21]. Для этого

необходимо от значений каждого признака отнять среднее значение этого признака, а затем поделить на среднее квадратическое отклонение этого признака:

$$x_{\text{scaled}} = \frac{x - x_{\text{mean}}}{\sigma_x} \tag{7}$$

После стандартизации каждый признак имеет среднее значение 0 и среднее квадратическое отклонение 1. Построим третью модель на стандартизированных данных (рис. 6).

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	Price	R-squared:	0.917			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.898			
Method:	Least Squares	F-statistic:	5496.			
Date:	Mon, 01 May 2023	Prob (F-statistic):	0.000			
Time:	13:03:04	Log-Likelihood:	-4.9302e+05			
No. Observations:	38568	AIC:	9.861e+05			
Df Residuals:	38568	BIC:	9.862e+05			
Df Model:	11					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
-----						
const	1.068e+07	1.39e+04	768.249	0.000	1.06e+07	1.07e+07
x1	1.277e+06	2.23e+04	57.188	0.000	1.23e+06	1.32e+06
x2	6.884e+05	2.21e+04	31.105	0.000	6.45e+05	7.32e+05
x3	2.622e+05	1.8e+04	14.548	0.000	2.27e+05	2.98e+05
x4	6.528e+05	1.92e+04	34.049	0.000	6.15e+05	6.9e+05
x5	2.642e+05	1.66e+04	15.957	0.000	2.32e+05	2.97e+05
x6	-4.928e+05	2.24e+04	-22.030	0.000	-5.37e+05	-4.49e+05
x7	-2.771e+04	2.18e+04	-1.269	0.005	-7.05e+04	1.51e+04
x8	-2.527e+06	2.02e+04	-124.965	0.000	-2.57e+06	-2.49e+06
x9	-1.235e+05	1.4e+04	-8.840	0.000	-1.51e+05	-9.61e+04
x10	-7.284e+05	1.56e+04	-46.707	0.000	-7.59e+05	-6.98e+05
x11	9.06e+04	1.5e+04	6.020	0.000	6.11e+04	1.2e+05

**Рис. 6.** Модель 3  
 Источник: выполнено П.А. Коняевой, О.А. Салтыковой  
**Figure 6.** Model 3  
 Source: compiled by P.A. Konyaeva, O.A. Saltykova

В результате получается следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned}
 y = & 10675976.805853501 + \\
 & + 1277111.325193666 * \text{Number rooms} + \\
 & + 688409.5206161594 * \text{Square} + \\
 & + 262237.3861052125 * \text{Floor sq.} + \\
 & + 652771.7247589253 * \text{Floors} + 264218.82554299495 * \text{Year} + \\
 & (-492783.3576360492 * \text{Distance metro km}) + \\
 & + (-27706.89877696723 * \text{Type transport to metro}) + \\
 & + (-2526546.283715316 * \text{Sale type}) + \\
 & + (-123500.06207640213 * \text{Flat type}) + \\
 & + (-728416.9402160242 * \text{Time to the center (from metro)}) + \\
 & + 90596.00852600564 * \text{Time to metro in minutes}
 \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогично проверим значимость коэффициентов регрессии  $\beta_k$ .  $P$ -значение у коэффициентов

$$\beta_k = (0,000; 0,000; 0,000; 0,000; 0,000; 0,000; 0,000; 0,005; 0,000; 0,000; 0,000; 0,000) < \alpha = 0,05.$$

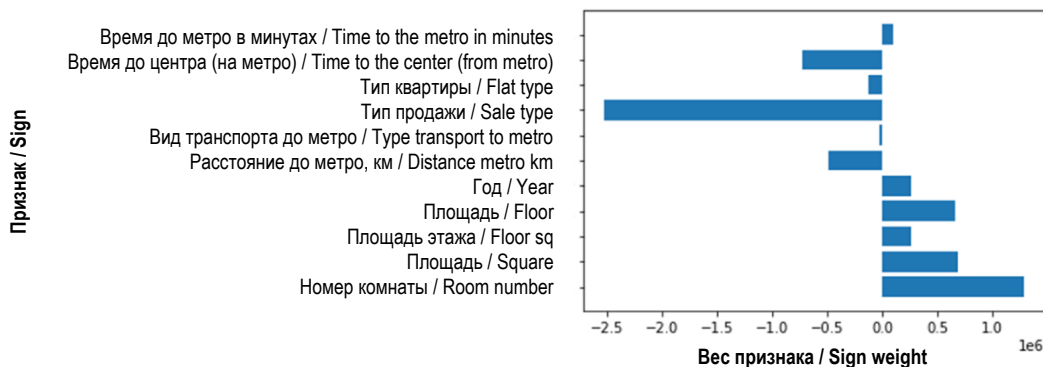
Так же как и в предыдущей модели, принимаем гипотезу  $H_1$  (коэффициент  $\beta_k$  значим с вероятностью 95 % для  $k = \overline{0; 11}$ ).

Значения параметров улучшились:  
 $R$ -squared = 0,917; Adj.  $R$ -squared = 0,898;  
 Prob ( $F$ -statistic) = 0,000.

**Вывод:** уравнение значимо при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $0,000 < 0,05$ ).

Данная модель улучшилась и будет предлагаться для использования предсказания цен на недвижимость, поставляя необходимые параметры.

Для новой окончательной модели также произведем визуализацию значимости признаков (рис. 7).



**Рис. 7.** Визуализация значимости признаков для новой модели  
 Источник : выполнено П.А. Коняевой, О.А. Салтыковой

**Figure 7.** Visualization of the significance of signs for the new model  
 Source : compiled by P.A. Konyaeva, O.A. Saltykova

После стандартизации данных веса признаков имеют совершенно иные значения относительно друг друга. Важно отметить, что стандартизация важна не только для отбора признаков, но также является важным этапом предобработки данных, без которого многие алгоритмы будут работать некорректно.

В результате после удаления выбросов и стандартизации данных получена улучшенная предиктивная модель. Также получено уравнение регрессии, предназначенное для прогнози-

рования цен недвижимости с указанием конкретных параметров, на основе сформированной базы данных.

## Заключение

В работе представлено построение предиктивной модели с помощью метода наименьших квадратов на основе сформированной базы данных. Для улучшения модели была осуществлена предобработка и стандартизация

признаков, после чего построено уравнение регрессии для возможности прогнозирования и анализа развития цен на рынке и оценки недвижимости при внесении необходимых параметров.

Собранная в данной работе информация может помочь отследить и сравнить цены на квартиры, дать общую картину рынка недвижимости за определенный период и определить наилучший вариант жилья для предоставления клиенту. Используя полученный результат в виде построения модели, возможно рассчитать состояние рынка недвижимости и построить прогнозы о его дальнейшем развитии, что, в свою очередь, предоставляет возможность для наиболее выгодных инвестиционных вложений. Вместе с тем полученная информация будет полезна для агентств недвижимости, что принесет дополнительную прибыль.

#### Список литературы

1. Алексеев Г. Введение в машинное обучение // Хабр. 2019. URL: <https://habr.com/ru/articles/448892/> (дата обращения: 27.03.2023).
2. Лейфер Л.А., Чёрная Е.В. Массовая оценка объектов недвижимости на основе технологий машинного обучения. Анализ точности различных методов на примере определения рыночной стоимости квартир // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2020. № 3 (222). С. 32–42. EDN: BQRFXX
3. Kok N., Koronen E.-L., Martinez-Barbosa C.A. (2017). Big Data in Real Estate From Manual Appraisal to Automated Valuation // The Journal of Portfolio Management. 2017. Vol. 43. No. 6. P. 202–211. <https://doi.org/10.3905/jpm.2017.43.6.202>
4. Ясницкий В.Л. Нейросетевое моделирование в задаче массовой оценки жилой недвижимости города Перми // Фундаментальные исследования. 2015. № 10–3. С. 650–653. EDN: UNXWSX
5. Сурков Ф.А., Петкова Н.В., Суховский С.Ф. Нейросетевые методы анализа данных в оценке недвижимости // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2016. № 3. С. 38–45. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2016-3-38-45>
6. Арефьева Е.А., Костяев Д.С. Использование нейронных сетей для оценки рыночной стоимости недвижимости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 10. С. 177–184. EDN: ZVLGJH
7. Выходцев Н.А. Использование искусственного интеллекта для оценки стоимости недвижимого имущества // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Т. 24. № 1. С. 68–72. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2021-24-1-68-72>
8. Арзамасцев С.А., Бгатов М.В., Картышева Е.Н., Деркунский В.А., Семенчиков Д.Н. Предсказание оттока абонентов: сравнение методов машинного обучения // Компьютерные инструменты в образовании. 2018. № 5. С. 5–23. <https://doi.org/10.32603/2071-2340-2018-5-5-23>
9. Радчук М. А., Копытина Е.А. Разработка программного средства для предсказания оттока клиентов с помощью методов машинного обучения // Сборник студенческих научных работ факультета компьютерных наук ВГУ. 2019. С. 190–196. EDN: PSWAXM
10. Lalwani P., Mishra M.K., Chadha J.S., Sethi P. Customer churn prediction system: a machine learning approach // Computing. 2022. Vol. 104. No. 2. P. 271–294. <https://doi.org/10.1007/s00607-021-00908-y>
11. Khodabandehlou S., Zivari Rahman M. Comparison of supervised machine learning techniques for customer churn prediction based on analysis of customer behavior // Journal of Systems and Information Technology. 2017. Vol. 19. Iss. 1/2. P. 65–93. <https://doi.org/10.1108/JSIT-10-2016-0061>
12. Андрианова Е.Г., Новикова О.А. Роль методов интеллектуального анализа текста в автоматизации прогнозирования рынка ценных бумаг // Cloud of science. 2018. Т. 5. № 1. С. 196–211. EDN: YUTJIN
13. Коваленко И.А. Использование искусственного интеллекта на биржевом и внебиржевом рынке ценных бумаг // Вестник науки. 2023. Т. 3. № 6 (63). С. 75–80. URL: <https://www.xn----8sbempclwd3bmt.xn--p1ai/article/8956> (дата обращения: 28.02.2023).
14. Henrique B.M., Sobreiro V.A., Kimura H. Literature review: Machine learning techniques applied to financial market prediction // Expert Systems with Applications. 2019. Vol. 124. P. 226–251. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.012>
15. Kumbure M.M., Lohrmann C., Luukka P., Porras J. Machine learning techniques and data for stock market forecasting: A literature review // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 197. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116659>
16. Mahesh B. Machine learning algorithms-a review // International Journal of Science and Research. 2020. Vol. 9. Iss. 1. P. 381–386. <https://doi.org/10.21275/ART20203995>
17. Сальников В.А., Михеева О.М. Модели прогнозирования цен на московском рынке жилой недвижимости // Проблемы прогнозирования. 2018. № 1 (166). С. 129–139. EDN: YLXJZZ

18. Стерник Г.М., Печенкина А.В. Прогноз цен предложения квартир на московском рынке жилья (макрэкономический подход) // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2007. № 10. С. 11–18. EDN: JXADIB

19. Назаров А. Регрессионный анализ в Data Science. Простая линейная регрессия. Библиотека statsmodels // Хабр. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/690414/> (дата обращения: 30.03.2023).

20. Дронов В. Линейная регрессия с помощью Scikit-Learn в Python // Обучение Python. 2021. URL: <https://tonais.ru/library/lineynaya-regressiya-s-pomoshyu-scikit-learn-v-python> (дата обращения: 05.04.2023).

21. Айлин А. Нормализация против стандартизации в линейной регрессии // Машинное обучение. 2023. URL: <https://www.baeldung.com/cs/normalization-vs-standardization> (дата обращения: 15.04.2023).

## References

1. Alekseev G. Introduction to machine learning. *Habr*. 2019. (In Russ.) Available from: <https://habr.com/ru/articles/448892/> (accessed: 03.27.2023).

2. Leifer LA, Chernaya EV. Machine learning techniques for real estate mass valuation. Analysis of accuracy for various methods on the example of the appraisal of apartments. *Property relations in the Russian Federation*. 2020;3:32–42. (In Russ.) EDN: BQRFXJ

3. Kok N, Koponen E-L, Martinez-Barbosa CA. Big Data in Real Estate From Manual Appraisal to Automated Valuation». *The Journal of Portfolio Management*. 2017; 43(6):202–211. <https://doi.org/10.3905/jpm.2017.43.6.202>

4. Yasnitskiy VL. Using a neural network to solve the problem of mass real estate appraisal of city Perm. *Fundamental Research*. 2015;10–3:650–653. (In Russ.) EDN: UNXWSX

5. Surkov FA, Petkova NV, Sukhovskiy SF. Neural network data analysis methods in real estate valuation. *News of universities. North Caucasus region. Technical science*. 2016;3:38–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2016-3-38-45>

6. Arefieva E.A, Kostyaev D S. Using neural NETWORKS for evaluation of market cost of real estate. *News of the Tula State University. Technical science*. 2017; 10:177–184. (In Russ.) EDN: ZVLGJH

7. Vykhotsev NA. Artificial intelligence in price estimation of real estate. *Proceedings of the TUSUR University*. 2021;24(1):68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2021-24-1-68-72>

8. Arzamastsev SA, Bgatov MV, Kartysheva EN, Derkunsky VA, Semenchikov DN. Predicting subscriber churn: comparison of machine learning methods. *Computer tools in education*. 2018;5:5–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/2071-2340-2018-5-5-23>

9. Radchuk MA, Kopytina EA. Development of a software tool for predicting customer churn using machine learning methods. *Collection of student scientific works of the Faculty of Computer Science of VSU*. 2019. p. 190–196. (In Russ.) EDN: PSWAXM

10. Lalwani P, Mishra MK, Chadha JS, Sethi P. Customer churn prediction system: a machine learning approach. *Computing*. 2022;104(2):271–294. <https://doi.org/10.1007/s00607-021-00908-y>

11. Khodabandehlou S, Zivari Rahman M. Comparison of supervised machine learning techniques for customer churn prediction based on analysis of customer behavior. *Journal of Systems and Information Technology*. 2017;19(1/2):65–93. <https://doi.org/10.1108/JSIT-10-2016-0061>

12. Andrianova EG, Novikova OA. The role of text mining methods in automating stock market forecasting. *Cloud of science*. 2018;5(1):196–211. (In Russ.) EDN: YUTIIN

13. Kovalenko IA. Use of artificial intelligence in the exchange and over-the-counter securities markets. *Bulletin of Science*. 2023;3(6):75–80. (In Russ.) Available from: <https://www.xn----8sbempclwd3bmt.xn--plai/article/8956> (accessed: 30.03.2023).

14. Henrique BM, Sobreiro VA, Kimura H. Literature review: Machine learning techniques applied to financial market prediction. *Expert Systems with Applications*. 2019; 124:226–251. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.012>

15. Kumbure MM, Lohrmann C, Luukka P, Porras J. Machine learning techniques and data for stock market forecasting: A literature review. *Expert Systems with Applications*. 2022;197:116659.

16. Mahesh B. Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research*. 2020; 9(1):381–386. <https://doi.org/10.21275/ART20203995>

17. Salnikov VA, Mikheeva OM. Models for forecasting prices on the Moscow residential real estate market. *Problems of forecasting*. 2018;1(166):129–139. (In Russ.) EDN: YLXJZZ

18. Sternik GM, Pechenkina AV. Forecast of supply prices for apartments on the Moscow housing market (macroeconomic approach). *Property relations in the Russian Federation*. 2007;10:11–18. (In Russ.) EDN: JXADIB

19. Nazarov A. Regression analysis in DataScience. Simple linear regression. statsmodels library. *Habr*. 2022. (In Russ.) Available from: <https://habr.com/ru/articles/690414/> (accessed: 30.03.2023).

20. Dronov V. Linear regression using Scikit-Learn in Python. *Learning Python*. 2021. (In Russ.) Available from: <https://tonais.ru/library/lineynaya-regressiya-s-pomoshyu-scikit-learn-v-python> (accessed: 05.04.2023).

21. Aylin A. Normalization vs. standardization in linear regression. *Machine learning*. 2023. Available from: <https://www.baeldung.com/cs/normalization-vs-standardization> (accessed: 15.04.2023).



### Сведения об авторах

**Кonyaева Полина Александровна**, магистрант инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; E-mail: 1032212116@pfur.ru

**Салтыкова Ольга Александровна**, кандидат физико-математических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-code: 3969-6701, ORCID: 0000-0002-3880-6662; E-mail: saltykova-oa@rudn.ru

**Купреев Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2287-2902, ORCID: 0000-0002-8657-2282; E-mail: kupreev-sa@rudn.ru

### About the authors

**Polina A. Konyaeva**, Master's student, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; E-mail: 1032212116@pfur.ru

**Olga A. Saltykova**, Doctor of Sciences (Techn.), Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 3969-6701, ORCID: 0000-0002-3880-6662; E-mail: saltykova-oa@rudn.ru

**Sergei A. Kupreev**, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2287-2902, ORCID: 0000-0002-8657-2282; E-mail: kupreev-sa@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-162-172

UDC 004.89


EDN: MURUAK

Scientific review / Научный обзор

## The Role of Convolutional Neural Networks in Cricket Performance Analysis

Naduni K. Ranasinghe , Larisa V. Kruglova  

RUDN University, Moscow, Russia

 kruglova-lv@rudn.ru

### Article history

Received: March 27, 2024

Revised: May 11, 2024

Accepted: May 17, 2024

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** Significant insights have arisen from an extensive review of the current literature, highlighting the importance of Convolutional Neural Networks (CNNs) in cricket performance analysis and mapping new directions for future research. Despite difficulties such as limited availability of data, processing difficulty, and interpretability issues, incorporating CNNs into cricket statistics is a potential effort made possible by advances in machine learning and deep learning methods. Instructors, players, and data analysts can use CNNs to better comprehend the game, extract meaningful information from video data, and improve decision-making processes. Key findings show that CNNs are effective tools for a variety of cricket analysis tasks involving batting, bowling, fielding, and player tracking. The use of CNNs represents an advancement in cricket analysis, promising to open up new aspects of performance and usher in a data-driven era of cricket genius. Augmenting data, the use of parallelization, explainable AI, and concerns about ethics, provide opportunities to address current challenges can be identified as future advances in sports analysis with CNNs. Embracing technological advancements and mapping out future research directions are critical steps towards realizing this revolutionary potential.

**Keywords:** artificial neural networks, cricket, deep learning, machine learning, sports analytics

### For citation

Ranasinghe NK, Kruglova L.V. The role of convolutional neural networks in cricket performance analysis. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):162–172. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-162-172>

© Ranasinghe N.K., Kruglova L.V., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Роль сверточных нейронных сетей в анализе результатов игры в крикет

Н.К. Ранасингхе<sup>ORCID</sup>, Л.В. Круглова<sup>ORCID</sup>✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ kruglova-lv@rudn.ru

---

### История статьи

Поступила в редакцию: 27 марта 2024 г.

Доработана: 11 мая 2024 г.

Принята к публикации: 17 мая 2024 г.

---

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

---

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

---

**Аннотация.** Обширный обзор современной литературы позволил сделать важные выводы, подчеркнув важность сверточных нейронных сетей (СНС) для анализа результатов игры в крикет и наметив новые направления для будущих исследований. Несмотря на такие трудности, как ограниченная доступность данных, трудности с обработкой и интерпретируемостью, включение СНС в статистику по крикету, — это потенциальная возможность, появившаяся благодаря достижениям в области машинного обучения и методов глубокого обучения. Инструкторы, игроки и аналитики данных могут использовать СНС для лучшего понимания игры, извлечения значимой информации из видеоданных и улучшения процессов принятия решений. Основные результаты показывают, что СНС являются эффективными инструментами для решения различных задач анализа крикета, связанных с отбиванием, боулингом, филдингом и отслеживанием игроков. Применение СНС представляет собой прогресс в анализе крикета, обещающий открыть новые аспекты производительности и ознаменовать эру совершенного крикета, основанного на данных. Расширение данных, использование распараллеливания, поддающийся объяснению искусственный интеллект и следование этическим принципам предоставляют возможности решения существующих проблем и определяют будущие успехи в области спортивного анализа с СНС. Внедрение технологических достижений и определение направлений перспективных исследований являются важными шагами на пути к реализации этого революционного потенциала.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, крикет, машинное обучение, глубокое обучение, спортивная аналитика

---

### Для цитирования

Ranasinghe N.K., Kruglova L.V. The role of convolutional neural networks in cricket performance analysis // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 162–172. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-162-172>

---

### Introduction

In the dynamic world of modern sports, data analytics integration has become increasingly important, revolutionizing how athletes, coaches, and analysts perceive and improve performance. Cricket, a sophisticated and nuanced sport, is not

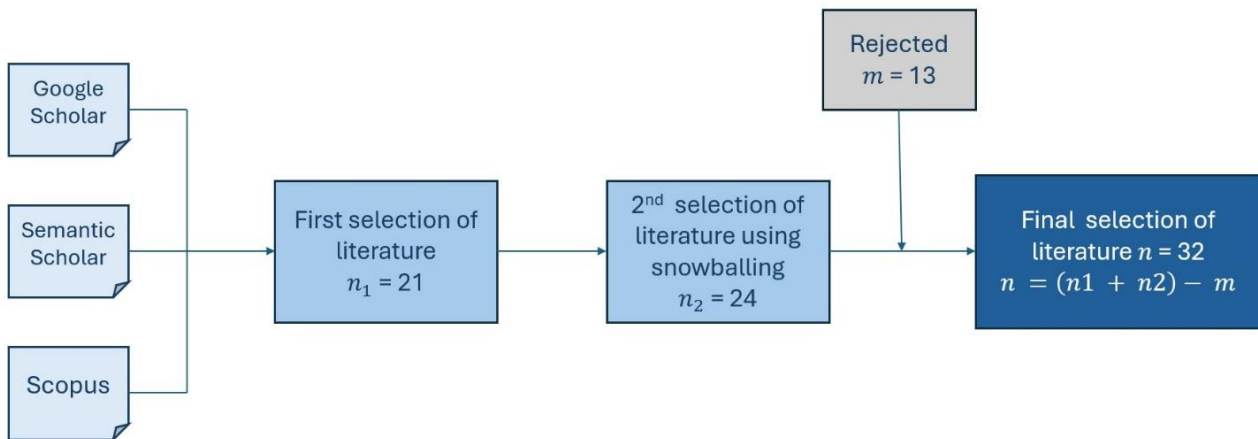
immune to this revolutionary wave. Cricket performance analysis has always depended on manual observation, subjective assessments, and basic statistical metrics. However, the introduction of advanced technology, particularly machine learning and deep learning techniques such as Convolutional Neural Networks (CNNs), has

created new opportunities for profound insights and predictive capacities in cricket performance monitoring.

This literature review seeks to investigate the critical significance of CNNs in cricket performance analysis, offering light on their evolution, uses, advancements, problems, and future directions. The review is motivated by an awareness of the critical need to use cutting-edge approaches to extract relevant insights from the massive and complex datasets produced by current cricket matches [1; 2] By evaluating the existing research, this review aims to provide a complete picture of how CNNs are changing the landscape of cricket analytics.

The literature is obtained from multiple databases by employing a range of keywords, such as “Convolutional Neural Networks in sports

analytics,” “data science in sports,” “cricket performance analysis,” and “deep learning in cricket performance analysis.” Figure 1 shows the procedure of literature selection for a review, commencing with preliminary searches carried out using Google Scholar, Semantic Scholar, and Scopus. An initial selection of 21 articles is made based on these sources. Subsequently, the snowballing technique is utilized, wherein the references of the first chosen papers are studied to discover supplementary literature that is relevant. This process results in the inclusion of an extra 24 articles in the selection. Afterward, a total of 13 articles are rejected for reasons such as lack of relevance, poor quality, or duplication. The final literature selection is obtained by merging the initial and subsequent selections and subsequently excluding the rejected articles, yielding a total of 32 articles.



**Figure 1.** Selection process of literature review  
Source: made by N.K. Ranasinghe

The evolution of sports analytics provides context for understanding the advent of CNNs in cricket. From basic statistical studies to advanced machine learning algorithms, the trip demonstrates a gradual change towards data-driven decision making and performance optimization [2]. Within this environment, CNNs have emerged as a powerful tool, making use of their ability to learn hierarchical representations from raw data, particularly

in image and video processing. Recent research has emphasized the potential of CNNs in image and video processing, particularly its ability to learn hierarchical representations from unprocessed data [3]. These representations are created from grid data, such as photos and videos, and can be applied to a variety of applications other than typical image and video processing, such as optimal control, flow cytometry, and molecular

simulations [4]. Furthermore, Convolutional Neural Network (CNN) feature maps can be used with different models of machine learning, such as Random Forests and Support Vector Machines, to improve classification performance [5].

Cricket, with its diverse nature that includes batting, bowling, fielding, and strategic intricacies, provides a unique and fruitful environment for the use of CNNs. Traditional techniques of performance analysis frequently fail to capture the nuances of cricketing moves and strategy, resulting in restricted insights. CNNs, on the other hand, present a viable answer because they allow for automatic, data-driven examination of numerous elements of cricket play [6]. CNNs have shown exceptional efficacy in deriving meaningful information from cricket data, ranging from assessing hitting approaches and bowler actions to recognizing fielding patterns and tracking player mobility [2].

As CNN-based cricket analytics evolves, it faces new hurdles. Data scarcity, computational complexity, and interpretability are key challenges that necessitate novel solutions. Furthermore, ethical concerns about player privacy and data fairness need cautious navigation in the quest of advanced analytics. Despite these problems, CNNs have enormous potential for cricket performance analysis. Future research directions show potential for future innovation, such as real-time analysis via wearable technologies, multimodal data integration, and the discovery of novel learning paradigms [1; 7].

This literature study aims to investigate the transformative effects of CNNs on cricket performance analysis. By synthesizing existing findings and recommending future research objectives, it hopes to contribute to a better understanding of how CNNs are changing the way we perceive and analyze cricket excellence.

## **1. Convolutional Neural Networks: Foundations and Basics**

Convolutional Neural Networks (CNNs) have emerged as a key tool in deep learning, particularly for computer vision, speech recognition,

and time series analysis [8]. These networks are artificial neural networks that excel at pattern recognition and inference [9]. They have been effectively used for a variety of applications, including natural language processing (NLP) [8]. CNNs have also been used to high-dimensional irregular domains like social networks and brain connectomes, using spectral graph theory [10]. This modification enables the effective development of localized convolutional filters that operate on graphs while maintaining the computational as well as learning complexity of classic CNNs [10].

Two innovative Convolutional Neural Network (CNN) structures are presented in distinct articles, both representing notable advancements in the field. The study [11], introduces a CNN structure that takes inspiration from quasi-linear hyperbolic systems, which are a type of partial differential equations (PDEs). This novel design enables weight adjustment by means of a continuous symmetry group, which deviates from the fixed structures and weights commonly observed in traditional models. Although this architecture takes an alternative approach, it obtains performance that is comparable to typical models on image classification tasks. This highlights the importance of internal symmetry in neural networks.

On the other hand, the following research [12], presents the Inception architecture, which sets a new benchmark in classification and detection for the ImageNet Large-Scale Visual Recognition Challenge 2014 (ILSVRC14). Inception effectively utilizes computer resources in the network by simultaneously expanding the depth and width, all while keeping the computational budget constant. The Inception framework, specifically the GoogLeNet form with 22 layers, showcases remarkable efficacy in classification and detection tasks.

According to [13], there has been a growing trend toward utilizing deeper neural networks to enhance accuracy. On the other hand, a new and broader design for Convolutional Neural Networks (CNNs) is suggested, taking inspiration from multi-column deep neural networks and Network in

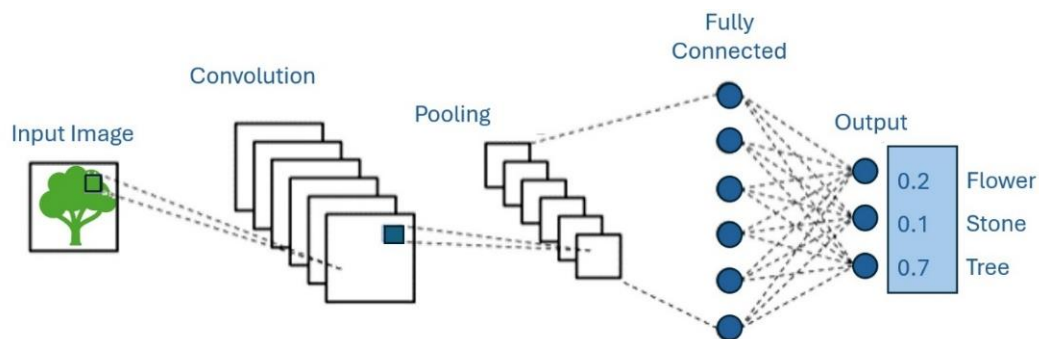
Network (NIN). The goal is to achieve more accuracy without altering the input data. The proposed architecture, referred to as “CNN in Convolution” (CNNIC), applies convolution to a small CNN instead of using the original generalized linear model (GLM)-based filters. This little CNN serves as a kernel for the original picture and a feature extraction layer. A global average pooling layer and a softmax layer perform further categorization. They have utilized dropout and orthonormal initialization to mitigate training challenges such as slow convergence and overfitting.

The article by [14], introduces two architectures, namely the selection graph neural network (GNN) and the aggregation GNN, which are designed to extend the capabilities of Convolutional Neural Networks (CNNs) for analyzing signals on graphs. The GNN selection replaces linear time-invariant filters with linear shift-invariant graph filters and redefines pooling as a nonlinear subsampling stage, while preserving the positions of sampled nodes for computations in deeper layers. The aggregation Graph Neural Network (GNN) propagates signals across the graph, capturing diffused components that are detected by specific nodes. This enables the utilization of Convolutional Neural Network (CNN) convolution and pooling stages. An aggregate Graph Neural Network (GNN) variant is presented, specifically designed for handling large-scale networks with multiple nodes. Both designs can be simplified to typical convolutional neural networks (CNNs) when applied to temporal signals on circulant graphs.

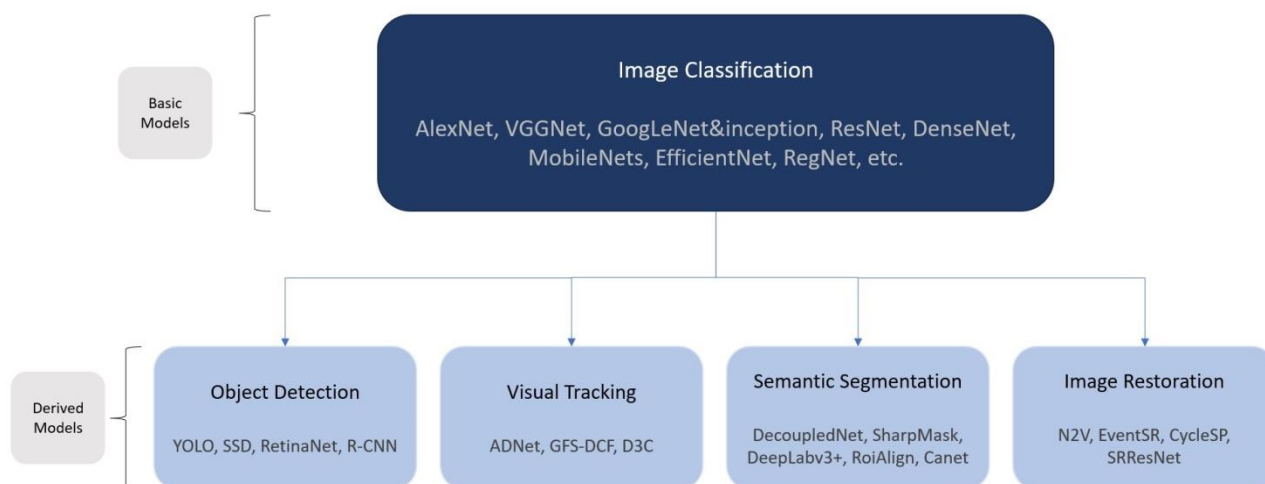
In image processing, Convolutional Neural Networks (CNNs) have shown to be incredibly successful, especially for tasks like feature learning and picture classification [15; 16]. The practical applications of CNNs in image processing are highlighted in both [3] and [17]. Hidalgo [17] concentrates on style transfer, denoising, and deep dreaming, while Sharma and team [3] present an improved CNN model that uses state-of-the-art preprocessing and augmentation techniques to improve image readability and simplify the learning process. All these experiments demonstrate how flexible and effective CNNs are for a range of image processing applications.

Image classification is one of the most crucial and fundamental fields for computer vision applications [18]. The CNN architecture used for classification of images is displayed in Figure 2. Fully connected layers, pooling layers, and convolutional layers make up CNN. It convolves the entire image and creates intermediate feature maps using different kernels in the convolutional layers to produce different feature maps.

The purpose of the pooling layers is to minimize the size of feature maps and the parameters of the network. It functions as a CNN classifier and is often found at the final stage of each CNN architecture for the entirely connected layers. The result, as illustrated in Figure 2, can be utilized for image classification after all layers have been connected or as illustrated in Figure 3, can transmit the output to the derived Deep Neural Networks (DNN).



**Figure 2.** A basic CNN Architecture for Image Classification  
Source: made by N.K. Ranasinghe



**Figure 3.** CNN basic models and derived models  
Source: made by N.K. Ranasinghe

Historically, sports analysis was based mainly on subjective observations, rudimentary statistics, and unreliable evidence [1]. However, the environment began to change with the introduction of increasingly sophisticated data collection and analysis techniques.

## 2. Evolution of Sports Analytics

The development of machine learning and deep learning techniques in recent decades has catapulted sports analytics into a new age. Machine learning algorithms, which can extract patterns and insights from large datasets, have transformed the way teams and players approach training, strategy, and performance evaluation [6]. Deep learning, a subset of machine learning distinguished by neural networks with numerous layers, has broadened the possibilities by allowing the extraction of complex characteristics and representations from raw data.

One of the most notable advancements in this progression has been the incorporation of Convolutional Neural Networks (CNNs) into sports analytics. CNNs, which were originally created for image identification tasks, have been shown to be extremely versatile and effective across a wide

range of sports. By learning hierarchical representations from raw data, CNNs can analyze visual data with unparalleled precision and efficiency [19].

The possibility of using pre-trained CNNs and hybrid optimization algorithms to enhance the precision and efficacy of sports video categorization and player performance analysis is emphasized by both [20] and [21]. By integrating CNNs for classification of sports in serial frames, [22] improves this even further and achieves a high classification accuracy. K. Dixit, A. Balakrishnan [23] uses CNNs to classify cricket ball-by-ball outcomes, and he achieves an astounding 80% accuracy rate. All of this research highlights how important CNNs are to improving sports analytics.

CNNs have been used in sports like soccer, basketball, and tennis to follow player movements, analyze game tactics, and forecast outcomes with amazing accuracy. CNNs have enabled coaches, analysts, and athletes to make better judgments and optimize performance plans by automating labor-intensive processes and revealing hidden patterns in data.

As technology advances and datasets become more complex, the role of CNNs in sports analytics is anticipated to grow, revealing new insights and opportunities for the success of the game and the players [1].

### 3. CNN Applications in Cricket Performance Analysis

Cricket, a sport renowned for its complexity and delicacy, has witnessed an increase in the use of advanced technologies such as CNNs to improve performance analysis. CNNs, which were originally created for image recognition tasks, have proven to be extremely effective at extracting useful insights from the huge and diverse datasets generated by cricket matches. This section looks into the various applications of CNNs in cricket performance analysis.

#### 3.1. Batting Performance Analysis:

CNNs have been used to analyze batting approaches and performance in cricket. CNNs can discover significant features of batsmen's performances by analyzing video footage [22]. These insights enable coaches and analysts to provide batsmen with specific feedback, allowing them to improve their methods and performance at the crease.

#### 3.2. Bowling Action Assessment

Assessing bowling movements is critical for detecting biomechanical problems and improving performance. Using a VGG16 model that had already been trained, [24] cut out the last layer, and then built three extra dense layers and an output layer for their classification. They kept the weights of the first 14 layers unchanged, using their dataset to train the subsequent layers. CNNs may analyze video footage of bowlers to discover minute differences in their movements, such as arm angle, release point, and follow-through [25]. CNNs help bowlers improve their performance on the pitch by identifying areas for improvement.

#### 3.3. Fielding Pattern Recognition

Fielding is an important component of cricket, and CNNs can help analyze fielding trends and methods. CNNs can detect trends and patterns in field placements, outfield coverage, and throwing accuracy by analyzing video footage of fielding positions and motions [22; 26]. This information

enables teams to optimize their fielding strategies and respond dynamically to match situations.

#### 3.4. Player Tracking and Motion Analysis

Tracking player motions and analyzing motion patterns is critical for understanding game dynamics and performance. CNNs can interpret video footage from cricket matches to correctly track player motions and analyze their motion patterns over time [25; 26]. This data allows coaches and analysts to evaluate player fitness, workload, and positional techniques, resulting in more informed decisions about team selection and game tactics.

CNNs have emerged as useful tools for cricket performance monitoring, with applications spanning batting, bowling, fielding, and player tracking. Teams and sportsmen can gain a competitive advantage and improve their performance on the pitch by exploiting CNNs ability to analyze video data and extract relevant insights. As technology advances, the importance of CNNs in cricket analytics is projected to grow further, opening new avenues for understanding and improving performance in the sport.

### 4. Challenges and Potential Solutions

Cricket performance analysis, powered by Convolutional Neural Networks (CNNs) and other modern technologies, faces various hurdles that must be overcome in order to reach its full potential [29]. Furthermore, identifying future directions and developing trends is critical for advancing the discipline and meeting changing demands. This section looks at the obstacles, potential solutions, and future directions for CNN-based cricket performance analysis.

#### 4.1. Challenges

##### 4.1.1. Data Scarcity

Despite the quantity of cricket matches, gathering high-quality, labeled data for training CNNs remains difficult. Limited availability of annotated datasets impedes the development and validation of robust models.



### Summary of few papers which used CNN in cricket analytics

Paper	Main findings	Year	Methodology
[19]	Deep neural networks have yet to be explored in analyzing sports data. The proposed model, “Shot-Net,” demonstrated great accuracy while maintaining a low cross-entropy rate.	2018	The technique introduced and employed in the paper is a 13-layer convolutional neural network known as “Shot-Net.”
[23]	A comparison of three alternative convolutional neural network designs for predicting ball-by-ball outcomes in cricket videos. Reporting on the performance of each architecture and investigating their benefits and drawbacks for this area. The best model achieved an accuracy of about 80% on the validation set.	2016	Three distinct convolutional neural network architectures were used.
[24]	The concept of a method for recognizing bowlers from bowling action photographs, the potential benefit to broadcasters, scorers, and team managers, and the model's outstanding performance with a test set accuracy of 93.3% and an F1 score of 93.2%.	2019	The study's specific algorithm is the pre-trained VGG16 model, which has been altered by dropping its final layer and integrating three more dense layers as well as a classification output layer.
[27]	The use of neural networks to predict cricketers' future performance based on past performance, as well as the utility of neural networks in providing valuable decision support throughout the team selection process.	2009	The study used neural networks to predict cricketer performance and recommend players for the World Cup.
[28]	The proposed approaches for predicting cricket match outcomes based on team performance, which used player-category correlations and a shallow Convolutional Neural Network (CNN) architecture, outperformed baseline approaches significantly. The shallow CNN architecture outperformed the proposed feature encoding-based technique. — The outcome of a match can be predicted with greater than 70% accuracy.	2019	The study's specific techniques include the feature-encoding-based approach and the shallow Convolutional Neural Network (CNN) architecture.

Source: compiled by N.K. Ranasinghe

#### 4.1.2. Computational Complexity

Training and deploying CNN models can be computationally intensive, particularly when working with large-scale video collections [30]. This complexity poses issues in terms of infrastructure, time, and resource management.

#### 4.1.3. Interpretability Issues

CNNs are sometimes regarded as “black box” models, making it difficult to understand the reasoning behind their predictions [30]. Coaches, players, and stakeholders may be hesitant to trust and implement a system that is difficult to interpret.

### 4.2. Potential Solutions

#### 4.2.1. Data Augmentation

By creating more training examples, techniques like data synthesis and augmentation can help alleviate data scarcity difficulties [31].

This method improves model generalization and robustness without the use of large, annotated datasets.

#### 4.2.2. Parallelization and Optimization

Using parallel computing architectures and optimizing CNN algorithms can reduce computational complexity and speed up training and inference operations. Model pruning, quantization, and distributed training are all important techniques for improving efficiency.

#### 4.2.3. Explainable AI (XAI)

Combining explainable AI techniques with CNNs can improve interpretability by providing information about model predictions [32]. Attention mechanisms, saliency maps, and feature visualization are all useful tools for understanding how CNNs make decisions.

## 5. Future directions

### 5.1. Integration with Wearable Technology

Combining CNN-based analytics with wearable sensors provides real-time information about player performance indicators such as heart rate, movement patterns, and fatigue levels. This real-time analysis allows coaches to make data-driven judgments throughout games and training sessions.

### 5.2. Incorporation of Multimodal Data Sources

By combining video analysis with other data modalities such as sensor data (e.g., GPS, accelerometers) and physiological measurements, the analysis is enhanced and provides a more complete picture of player performance [6]. Integrating multiple data sources improves the granularity and accuracy of performance assessments.

### 5.3. Exploration of Transfer Learning and Domain Adaptation

Transfer learning approaches allow knowledge to be transferred from pre-trained CNN models to cricket-specific tasks, minimizing the requirement for large amounts of labeled data. Domain adaptation approaches help models adjust to different cricketing circumstances and playing styles, improving model robustness and generalization.

### 5.4. Ethical Considerations

As CNN-based analytics become more prevalent in cricket, ethical concerns about player privacy, data security, and fairness become critical. Establishing norms and regulations for data gathering, utilization, and distribution ensures ethical practices while also protecting player rights and welfare.

## Conclusion

In conclusion, this literature study has shed light on the significance of CNNs in developing cricket performance analysis. Several major discoveries have emerged from a review of the

literature, emphasizing the importance of CNNs and recommending future research avenues in this field.

CNNs have developed as strong tools for cricket performance analysis, with applications spanning batting, bowling, fielding, and player tracking. The evolution of sports analytics, together with advances in machine learning and deep learning techniques, has cleared the road for the incorporation of CNNs into cricket statistics. Data scarcity, processing complexity, and interpretability concerns all pose challenges to the mainstream use of CNN-based cricket performance analysis.

However, future solutions like data augmentation, parallelization, explainable AI, and ethical considerations provide opportunities to overcome these issues and advance the area.

The value of CNNs in improving cricket performance analysis cannot be emphasized. Coaches, players, and sports analysts can obtain a better understanding of the game by harnessing CNNs ability to analyze video footage, extract actionable insights, and improve decision-making processes. CNNs enable stakeholders to unlock new dimensions of cricket performance excellence by refining batting skills and evaluating bowling actions, as well as optimizing fielding strategies and tracking player movements.

The application of CNNs to cricket performance analysis marks a paradigm shift in how the sport is understood, analyzed, and optimized. By embracing technology developments, tackling difficulties, and setting future research routes, the field is on track to usher in a new era of data-driven cricket brilliance.

## References

1. Awan MJ, Gilani SAH, Ramzan H, et al. Cricket Match Analytics Using the Big Data Approach. *Electronics (Basel)*. 2021;10(19). <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10192350>
2. Kapadia K, Abdel-Jaber H, Thabtah F, Hadi W. Sport analytics for cricket game results using machine learning: An experimental study. *Applied Computing and Informatics*. 2022;18(3–4):256–266. <https://doi.org/10.1016/J.ACI.2019.11.006/FULL/PDF>
3. Sharma R, Bashir S, Tiwary VN, Kumar S. Exploring the Potential of Convolution Neural Network

- Based Image Classification. *2023 1st DMIHER International Conference on Artificial Intelligence in Education and Industry 40 (IDICAIEI)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/IDICAIEI58380.2023.10406528>
4. Jiang S, Zavala V. Convolutional Neural Nets: Foundations, Computations, and New Applications. *arXiv.org*. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.04869>
  5. Athiwaratkun B, Kang K. Feature Representation in Convolutional Neural Networks. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1507.02313>
  6. Alaka S, Sreekumar R, Shalu H. Efficient Feature Representations for Cricket Data Analysis using Deep Learning based Multi-Modal Fusion Model. *arXiv.org*. 2021.
  7. Al Islam MN, Hassan T Bin, Khan SK. A CNN-based approach to classify cricket bowlers based on their bowling actions. *2019 IEEE International Conference on Signal Processing, Information, Communication & Systems*. 2019:130–134. <https://doi.org/10.1109/SPICSCON48833.2019.9065090>
  8. Kamath U, Liu JC, Whitaker J. Convolutional Neural Networks. *Deep Learning for NLP and Speech Recognition*. 2019:263–314. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14596-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14596-5_6)
  9. Chityala R, Pudipeddi S. Convolutional Neural Network. *Programming with TensorFlow*. 2020:265–273. <https://doi.org/10.1201/9780429243370-12>
  10. Defferrard M, Bresson X, Vandergheynst P. Convolutional Neural Networks on Graphs with Fast Localized Spectral Filtering. *Neural Information Processing Systems*. 2016.
  11. Liu Y, Shao HJ, Bai B. A Novel Convolutional Neural Network Architecture with a Continuous Symmetry. *CAAI International Conference on Artificial Intelligence*. 2023. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2308.01621>
  12. Szegedy C, Liu W, Jia Y, et al. Going deeper with convolutions. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Boston, MA, USA, 2015; p. 1–9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
  13. Huang X. Convolutional Neural Networks. In: *Convolution*. *arXiv.org*. 2018.
  14. Gama F, Marques AG, Leus G, Ribeiro A. Convolutional Neural Network Architectures for Signals Supported on Graphs. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018;67(4):1034–1049. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2887403>
  15. Coleman S, Kerr D, Zhang Y. Image Sensing and Processing with Convolutional Neural Networks. *Italian National Conference on Sensors*. 2022;22(10). <https://doi.org/10.3390/S22103612>
  16. Karmaker D, Chowdhury AZME, Miah MSU, Imran MA, Rahman MH. Cricket shot classification using motion vector. *2015 Second International Conference on Computing Technology and Information Management (ICCTIM)*. 2015:125–129. <https://doi.org/10.1109/ICCTIM.2015.7224605>
  17. Hidalgo DP. *Convolutional neural networks for image processing*. Universitat autònoma DE Barcelona (UAB); 2018. p. 1–7.
  18. Chai J, Zeng H, Li A, Ngai EWT. Deep learning in computer vision: A critical review of emerging techniques and application scenarios. *Machine Learning with Applications*. 2021;6:100134. <https://doi.org/10.1016/J.MLWA.2021.100134>
  19. Foyosal MFA, Islam MS, Karim A, Neehal N. Shot-Net: A Convolutional Neural Network for Classifying Different Cricket Shots. *International Conference on Recent Trends in Image Processing and Pattern Recognition*. 2018;1035:111–120. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9181-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9181-1_10)
  20. Ramesh M, Mahesh K. A Performance Analysis of Pre-trained Neural Network and Design of CNN for Sports Video Classification. *International Conference on Cryptography, Security and Privacy*. 2020:213–216. <https://doi.org/10.1109/ICCSP48568.2020.9182113>
  21. Radhakrishnan G, Parasuraman T, Harigaran D, Ramakrishnan R, Krishnakumar R, Ramesh KA. Machine Learning Techniques for Analyzing Athletic Performance in Sports using GWO-CNN Model. *2022 6th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology*. 2022:925–931. <https://doi.org/10.1109/ICECA55336.2022.10009065>
  22. Zeeshan Khan M, Hassan MA, Farooq A, Ghanni Khan MU. Deep CNN Based Data-Driven Recognition of Cricket Batting Shots. *International Conference on Advanced Energy Materials*. 2018:67–71. <https://doi.org/10.1109/ICAEM.2018.8536277>
  23. Dixit K, Balakrishnan A. *Deep Learning using CNNs for Ball-by-Ball Outcome Classification in Sports*. 2016.
  24. Al Islam MN, Hassan T Bin, Khan SK. A CNN-based approach to classify cricket bowlers based on their bowling actions. *2019 IEEE International Conference on Signal Processing, Information, Communication & Systems (SPICSCON)*. 2019:130–134. <https://doi.org/10.1109/SPICSCON48833.2019.9065090>
  25. Lindsay C, Spratford W. Bowling action and ball flight kinematics of conventional swing bowling in pathway and high-performance bowlers. *Journal sport science*. 2020;38(14):1650–1659. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1754717>
  26. Batra N, Gupta H, Yadav N, Gupta A, Yadav A. Implementation of augmented reality in cricket for ball tracking and automated decision making for no ball. *International Conference on Advances in Computing*,

*Communications and Informatics*. 2014:316–321. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2014.6968378>

27. Iyer SR, Sharda R. Prediction of athletes performance using neural networks: An application in cricket team selection. *Expert Syst Appl*. 2009;36(3): 5510–5522. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2008.06.088>

28. Manivannan S, Kausik M. Convolutional Neural Network and Feature Encoding for Predicting the Outcome of Cricket Matches. *International Conference on Industrial and Information Systems*. 2019:344–349. <https://doi.org/10.1109/ICIIS47346.2019.9063316>

29. Vidisha, Bhatia V. A review of Machine Learning based Recommendation approaches for cricket. *2020 Sixth International Conference on Parallel, Distributed and*

*Grid Computing (PDGC)*. 2020:421–427. <https://doi.org/10.1109/PDGC50313.2020.9315320>

30. Gregorio PD. *Interpretability of deep learning models*. 2019.

31. Magooda A, Litman D. Mitigating Data Scarceness through Data Synthesis, Augmentation and Curriculum for Abstractive Summarization. *Findings of the Association for Computational Linguistics, Findings of ACL: EMNLP 2021*. 2021:2043–2052. <https://doi.org/10.18653/V1/2021.FINDINGS-EMNLP.175>

32. Ibrahim R, Omair Shafiq M. Explainable Convolutional Neural Networks: A Taxonomy, Review, and Future Directions. *ACM Comput Surv*. 2022;55(10). <https://doi.org/10.1145/3563691>

#### About the authors

**Naduni K. Ranasinghe**, Master student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0008-1193-4681; E-mail: 1032225220@rudn.ru

**Larisa V. Kruglova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-8824-1241, eLIBRARY SPIN-code: 2920-9463; E-mail: kruglova-lv@rudn.ru

#### Сведения об авторах

**Ранасингхе Надуни Кешани**, магистрант департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0008-1193-4681; E-mail: 1032225220@rudn.ru

**Круглова Лариса Владимировна**, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-8824-1241, eLIBRARY SPIN-код: 2920-9463; E-mail: kruglova-lv@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-173-185

UDC 004

EDN: TOKJKL

Research article / Научная статья

## The Dual Aspects of Legal Reasoning in the Era of Artificial Intelligence — Defeasible Reasoning and Argumentation Scheme

Ze Li<sup>a</sup>, Feiping Lei<sup>a</sup>, Dmitry N. Ermakov<sup>b</sup>, Nina V. Symaniuk<sup>c</sup>, Ilya V. Poletaev<sup>b</sup>,  
Naofal M.H. Aziz<sup>b</sup>, Ahmed Obaid<sup>b</sup>, Pavel I. Ivanov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Shanghai University of Political Science and Law, *Shanghai, China*

<sup>b</sup> RUDN University, *Moscow, Russia*

<sup>b</sup> Ural Federal University, *Ekaterinburg, Russia*

✉ ermakov-dn@rudn.ru

### Article history

Received: January 11, 2024

Revised: April 2, 2024

Accepted: April 12, 2024

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The age of artificial intelligence emphasises the possibility of justification and the dialectical aspects of legal reasoning. The need for validity in legal reasoning mainly stems from the existence of exceptions to rules and conflicts between rules. Formal logic may well account for exceptions to rules and thus characterise cancellable reasoning. The presented article focuses on legal issues related to Artificial Intelligence (AI) that are being discussed in the scientific community because of their importance for understanding the mechanisms of law realisation. Some of the most pressing issues in the application of artificial intelligence include: transparency of algorithms, cybersecurity vulnerabilities, unfairness, bias and discrimination, lack of adversariality, legal personality issues, intellectual property issues, adverse effects on employees, privacy and data protection issues, liability for damages and lack of liability. Recognising the importance of artificial intelligence in the field of law, and acknowledging that the field requires constant reassessment and flexibility, this article develops a discussion that is important given the seriousness of the impact of artificial intelligence technologies on legal actors.

**Keywords:** artificial intelligence defeasibility, the dual aspects of legal reasoning

### For citation

Li Z, Lei F, Ermakov DN, Symaniuk NV, Poletaev IV, Aziz NMH, Obaid A, Ivanov PI. The dual aspects of legal reasoning in the era of artificial intelligence — defeasible reasoning and argumentation scheme. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):173–185. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-173-185>



## Множественные аспекты юридического правоприменения в эпоху искусственного интеллекта — формирование обоснованности правовой аргументации

Ц. Ли<sup>a</sup>, Лей Ф.<sup>b</sup>, Д.Н. Ермаков<sup>b</sup>✉, Н.В. Сыманюк<sup>c</sup>, И.В. Полетаев<sup>b</sup>  
Н.М.Х. Азиз<sup>b</sup>, А. Обейд<sup>b</sup>, П.И. Иванов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Шанхайский университет политических наук и права, *Шанхай, Китай*

<sup>b</sup> Российский университет дружбы народов, *Москва, Россия*

<sup>c</sup> Уральский федеральный университет, *Екатеринбург, Россия*

✉ ermakov-dn@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 11 января 2024 г.

Доработана: 2 апреля 2024 г.

Принята к публикации: 12 апреля 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Эпоха искусственного интеллекта подчеркивает возможность обоснования и диалектические аспекты юридических рассуждений. Необходимость обоснованности правовой аргументации главным образом проистекает из существования исключений из правил и конфликтов между правилами. Формальная логика вполне может учитывать исключения из правил и, таким образом, характеризовать отменяемые рассуждения. В представленном исследовании основное внимание уделяется юридическим вопросам, связанным с искусственным интеллектом (ИИ), которые обсуждаются в научном сообществе, по причине их важности для понимания механизмов реализации права. К наиболее насущным проблемам применения искусственного интеллекта относятся прозрачность алгоритмов, уязвимости кибербезопасности, несправедливость, предвзятость и дискриминация, отсутствие состязательности, проблемы правосубъектности, проблемы интеллектуальной собственности, неблагоприятные последствия для работников, вопросы конфиденциальности и защиты данных, ответственность за ущерб и отсутствие ответственности. Признавая важность искусственного интеллекта в области права и отмечая, что данная область требует постоянной переоценки и гибкого подхода, представленное исследование развивает дискуссию, которая важна, учитывая серьезность воздействия технологий искусственного интеллекта на субъектов права.

**Ключевые слова:** применимость искусственного интеллекта в праве, схемы аргументации юридических рассуждений

### Для цитирования:

Li Z., Lei F., Ermakov D.N., Symaniuk N.V., Poletaev I.V., Aziz N.M.H., Obaid A., Ivanov P.I. The dual aspects of legal reasoning in the era of artificial intelligence — defeasible reasoning and argumentation scheme // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 173–185. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-173-185>

### Introduction

The application of artificial intelligence technology in the legal field is not a new issue. As early as 1970, Bruce G. Buchanan and Thomas E. Headrick published the article “An Examination

of Some Speculations about Artificial Intelligence and Legal Reasoning” on *Stanford Law Review* [1], attempts to apply computer technology in legal reasoning. From its inception, legal artificial intelligence has been burdened with a common expectation, that is, to improve the quantity, quality

and availability of judicial services through technology.

Rules are general, so exceptions often need to be created in specific cases. Taking the punishment of murderers as an example, there are many exceptions to this rule, such as justifiable defense and emergency measures. Only if these exceptions do not apply can the conclusion of the general rule be tentatively deduced. If an exception is applicable, the previous preliminary conclusion should not be deduced. This phenomenon can be described as defeasibility of legal reasoning. Defeasibility means that if additional information is taken into account, the original conclusion may change. Based on the added facts, rules and other information, a justified conclusion may become an unjustified conclusion, a preliminary conclusion is thus defeated by this additional information [2]. In this situation, as a monotonous and monological reasoning, traditional deductive logic can only provide an inclusive way to classify the facts of the case under legal rules and infer the judgment conclusion. It cannot explain the defeasible nature of legal reasoning. Defeasibility basically arises for two reasons: exceptions to rules and conflicting rules. Exceptions to rules appear in many forms. A norm itself may contain exceptions, exceptions may also be located in different norms of the same statutory law, exceptions may also be located in different statutory laws, etc. The conflicts of rules mainly come from conflicts within the legal system, such as conflicts between special laws and general laws, etc.

Since the mid-to-late 20th century, with the progress of research in many fields, such as epistemology, artificial intelligence, and argumentation theory, various new logical tools for dealing with defeasible reasoning have emerged in an endless stream. Compared with classical logic, these new logical tools can better Portrays legal reasoning [3], but still has shortcomings. Most of these logical tools are based on non-monotonic logic, which starting point is to describe reasoning based on insufficient information. When people have insufficient information, they make reason-

able guesses and then withdraw them when they encounter counterexamples. Nonmonotonic logic can handle exceptions to the rules well. However, non-monotonic logic limits defeasibility to a single argument, which makes it difficult to reason with inconsistent information, that is, when faced with conflicts of rules, because once conflicts occur between rules, it emphasizes the comparison between multiple arguments rather than the withdrawal of a single argument. This article introduces argumentation logics to describe the conflict, defeat, and recovery relationships between different arguments, and combines non-monotonic logic with argumentative logic to describe defeasible reasoning. This adjustment will make the legal reasoning under the artificial intelligence system closer to the real human thinking process.

This article first explains the specific aspects of legal reasoning in the era of artificial intelligence (Part 2), namely defeasibility and dialectics; secondly, the defeasibility of legal reasoning requires some kind of logic that can handle defeasibility (Part 3); again, the dialectical nature of legal reasoning determines that legal reasoning must be shaped in an open dialogue process model (Part 4); finally, we'll give a brief summary of the full text (Part 5).

## 1. The Nature of Legal Reasoning in the Era of Artificial Intelligence

Legal reasoning is the process of deriving unknown legal propositions (conclusions) from known legal propositions or factual propositions. There are many differences in understanding in the academic community regarding the nature of legal reasoning. However, what is certain is that the rise of legal artificial intelligence has not created a kind of legal reasoning that is very different in nature from traditional law. It has only highlighted the original specific aspects of legal reasoning — defeasibility and dialectics. However, in characterizing these aspects requires more logical and symbolic processing so that intelligent systems can learn and repeat.

### **Nature of Legal Reasoning I: Defeasibility**

Defeasibility is everywhere in the law. Lawmakers do not know everything and therefore cannot reliably foresee what the future will hold. Thus, legal rules, if taken literally or faithfully, sometimes produce outcomes that are absurd, unfair, inefficient, or in some other way sub-optimal. When absurd conclusions arise as an inevitable consequence of the under- and over-inclusiveness of rules, a sound legal system will usually provide a mechanism to correct them, which relies on defeasible reasoning.

Corresponding to artificial intelligence algorithms, we need to re-understand the nature of refereeing in judicial activities. Judicial adjudication can be seen as a process in which the judge compares and analyzes the statements, arguments, reasons, and assumptions put forward by the parties, and then chooses the best solution. If these statements, arguments, reasons, and assumptions are regarded as information or knowledge in a broad sense, judicial adjudication is then a selection process based on legal and factual information. This requires “complete justification”, which means that the judge must not only explain the reasons to support the chosen option, but also must explain that there are no better alternatives, so as to prove that the judge’s final decision is the relatively best one [4], otherwise it cannot be called “complete justification”, and this is very demanding and difficult for judges. However, from the perspective of artificial intelligence, a comprehensive capture of legal rules and factual information makes “complete justification” possible. In this way, judicial decisions can and should be understood as based on multiple possible normative assumptions [5]. The process of selecting among the obligation of the court is to choose one of them as the best decision based on the context of the case [6], which can greatly increase the persuasiveness of judicial decisions. The nature of defeasible reasoning matches the conditions of artificial intelligence. In traditional judicial reasoning, which is based on monotonic logic, the conclusion of the reasoning will not introduce new infor-

mation because all necessary information is already included in the premises. In defeasible reasoning, however, the conclusion can contain more than the information provided by the premises. In particular, the combination of Big Data and artificial intelligence has greatly increased the possibility of discovering normative conflicts and exceptions of rules in the same legal system. In traditional artificial environments, the ability to detect these conflicts and exceptions is relatively limited. The application of artificial intelligence technology has brought new opportunities to the legal field, allowing legal reasoning to deal with complex situations more comprehensively.

### **2. Nature of Legal Reasoning II: Dialecticality**

Compared with general legal reasoning, legal reasoning in the context of legal artificial intelligence should be more dialectical. Of course, this does not mean that traditional legal reasoning does not have this characteristic, but it just means that this characteristic will be more prominent in the context of legal artificial intelligence. Dialectics refers to the fact that legal reasoning remains open to skeptical viewpoints, opposing viewpoints, which in turn leads to the uncertainty or probability characteristics of legal reasoning. In most court trials, both parties present different hypotheses during the proceedings in preparation for the final judgment. This process can be understood as a debate on which both parties are engaged in to win the support of the judge. Virtually every version of the case advanced by one party is inherently in conflict with the versions advanced by the other parties. In order to make a decision, the court must re-examine the dialogue between the parties, carefully compare and evaluate the arguments of both sides, and weigh the different opinions in order to choose the most credible answer to the facts and legal issues of the case, and ensure that the final verdict was reasonable and just.

From the perspective of artificial intelligence legal reasoning, on the whole, this dialecticality is mainly reflected in three aspects: First, the ontological level of dialectics reflected in the



defeasibility of law, such as Jaap Hage, a representative figure in legal artificial intelligence, analyzes related issues from the ontology [7]. The second is the dialectical nature of the epistemology level due to problems such as the open structure of legal concepts. There is a sharp contradiction between the generality of conceptual expression and the particularity of application practice, which makes this dialectic exist both in legal theory and in legal practice. The third is the dialectical nature reflected in the logical expression of legal rules and legal principles. For example, rules often have exceptions, and conflicts and oppositions may arise between different rules. In this case, a dialectical approach is needed to determine which rule is ultimately applicable rule.

### **3. Expansion of Defeasible Reasoning Based on Nonmonotonic Logic**

The defeasibility of legal reasoning requires a certain kind of special logic. Obviously, monotonic logic with a linear structure cannot solve the exceptions and conflicting rules of the rules. Non-monotonic logic that can accommodate exceptions becomes the best choice. Using non-monotone logic can also improve logic. The steps of reasoning are formalized and symbolized.

#### **3.1. Transition from Monotonic Logic to Nonmonotonic Logic**

In monotonic logic, legal rules are mainly expressed in the form of conditional sentences, that is, there is a substantial implication relationship between the logical antecedent and the logical consequent, so the legal conclusion is bound to be contained in its antecedent. Logical reasoning following this linear structure will reflect its monotonicity. It can ensure that the contamination of the conclusion by newly added information is eliminated, and the final conclusion can be obtained without exhausting all knowledge. However, one cannot be sure that newly added information will not shake the final conclusion, nor can one ensure that a conclusion declared without exhausting the knowledge search will be true. Monotonic logic cannot solve the following

three aspects: First, it cannot accommodate exceptions to reasoning in the structure, nor can it clearly determine the extent of the impact that exceptions will have on the original rules. Second, over-reliance on substantive reasoning and modifications such as interest measurement and value judgment to determine the open structure of legal concepts makes it difficult to complete one of the core tasks of research on artificial intelligence and law, which is to symbolize and logic the open structure of legal concepts. Third, the inability to handle inconsistent information reasoning, that is, the inability to handle rule conflicts in an orderly manner (for example, newly enacted law and previously enacted law, superordinate law and subordinate law, the special law and the general law), and it is impossible to achieve an open-structured argumentation form on the law. At this time, the function of non-monotonic logic comes to the fore. On the one hand, it can accommodate exceptions so that the originally obtained conclusions are invalidated by the addition of other information. On the other hand, it can also analyze every point in logical reasoning and legal argumentation, every step is formalized and symbolized.

The application of artificial intelligence in law plays an extremely important role in advancing the normative and logical research on the concept of defeasibility. It requires the use of logical operation symbols to algorithmize legal arguments as daily logic. In logic, John L. Pollock has a classic discussion of defeasibility: “*P* prima facie justifies *S*” means “the view must be true: if *S* believes or will believe *P*, and *S* has no reason to think *P* is false, then *S* is or will be justified by believing *P*.” [8] Pollock went on to call these reasons that justify the thesis “logically good reasons”, which are different from “conclusive reasons” that guarantee the truth of the conclusion. This kind of “logically good reason” can be further divided into “prima facie reasons”: “A prima facie reason is a reason that is itself a good reason for trusting something and that will *A* warrant justifies something, but when combined with some other belief it may no longer be a good reason.” Here, defeasibility means that the “apparently valid reason” is no longer valid due to “some other

belief". These negative beliefs are called "defeaters": "If  $P$  is a logical reason for  $S$  to believe  $Q$ , then  $R$  is a logical reason for  $S$  to believe  $Q$  if and only if the combination of  $P$  and  $R$  is not a logical reason for  $S$  to believe  $Q$ .  $R$  is the reason to defeat  $P$ ." Pollock also distinguished between rebutting defeaters and undercutting defeaters: the former targets the belief (or claim) itself, while the latter targets the connection between the belief and its supporting reasons. If we have concluded  $C$  on the basis of a particular foundation  $G$ , then the rebuttal nullifier provides a reason for us to believe  $C$ , while the undercut nullifier provides a reason for believing that  $G$  is not a foundation for  $C$  [9].

### **3.2. Whether Feasibility Must Rely on Nonmonotonic Logic to Deal With**

It remains questionable whether exceptions to the rule must rely on defeasible reasoning. Alchourron's famous claim is that defeasibility problems can be dealt with through deductive reasoning plus belief revision, so there is no need to use non-monotonic reasoning [10]. Alexy believes that the way of substantive implication can also shape the defeasibility of legal arguments [11]. The following will argue with concrete examples to demonstrate why using non-monotonic reasoning to deal with exceptions to the rule is better than belief revision and substantive entailment.

For example, under normal circumstances, starting from the legal rule "Whoever intentionally injures others shall be sentenced to a fixed-term imprisonment" and the fact that satisfies its antecedent "A intentionally injures others", one can conclude that "A should be sentenced to a fixed-term imprisonment". The following reasoning is established:

(P1) Anyone who intentionally harms others shall be sentenced to fixed-term imprisonment;

(P2)  $A$  intentionally harms others;

(Q)  $A$  should be sentenced to fixed-term imprisonment.

But when  $A$ 's behavior is legitimate defense, this reasoning is no longer valid. Although there is still this rule and this fact, considering the

behavioral attributes of legitimate defense, the conclusion cannot be drawn from this rule and the facts. As we can see, in a legal syllogism, people can withdraw the conclusion without withdrawing any premise, but this is not consistent with the logic of deductive reasoning. In a fidelity deductive reasoning, if you want to withdraw the conclusion, you must withdraw at least one premise because the truth of the conclusion is implied by the conjunction of the premises.

The method of belief modification means that when the above behavior of  $A$  is legitimate defense, people realize that the rule in the above reasoning is wrong, at least inaccurate, and should be revised to "Those who intentionally harm others should be sentenced to fixed-term imprisonment, unless it is legitimate defense." In this sense, legal rules are not defeasible, but merely amendable. When exceptions occur, it is not that the antecedents of the rule are satisfied and the conclusion does not follow, but that the rule is not satisfied at all. However, if we adopt this understanding, how should we view the reasoning starting from the rules under normal circumstances? If the premise of the reasoning is still the original rule, it will become reasoning starting from wrong or inaccurate premises, and thus it is not worthy of trust. If the premise of reasoning is considered to be the revised rules, then the factual premises outside the rules include not only "A intentionally harms others" but also "A's behavior does not constitute legitimate defense." The problem is that this understanding is inconsistent with the actual reasoning process. Under normal circumstances, people will not consider whether  $A$ 's behavior is legitimate defense, but directly draw a conclusion based on the premise "intentional harm to others". In addition, for the rule that "those who intentionally harm others shall be sentenced to fixed-term imprisonment", there are not only exceptions for legitimate defense, but also emergency avoidance, official behavior, victim's consent, incapacity, etc. A complete refactoring must include all exceptions. This reconstruction is unlikely to be complete, since the exceptions to the rule cannot in principle be enumerated exhaustively. In fact,

even if the exceptions are limited and can be listed in advance, they are subject to limited resources such as time and energy. In many cases, people can only rely on rules that do not list all exceptions.

The method of substantive implication means reinterpreting the rules and reconstructing the rules and rule-based reasoning in another way. It does not place every exception into the rules, but reinterprets the rules as having “normality” situation in them. For example, regarding the rules and facts in the above example, under normal circumstances, people can make such an inference that when *A*'s behavior is legitimate defense, the conclusion is withdrawn, but this is because the premise *P* is withdrawn, because legitimate defense does not have the proper meaning of social harm that intentional harm has, so it does not conflict with the fidelity requirements of deductive reasoning. The question is, in such a reasoning process, is *P* assumed to be true or proven to be true? If premise *P* is proved to be true, then all exceptions still need to be considered, whether there is legitimate defense, emergency avoidance, etc. Such an understanding simply puts some of the reasoning behind the scenes, obscuring the complexity of the scheme. If the premise *P* is assumed to be true, then, since there is no link to eliminate the assumption in this reasoning process, the conclusion *Q* must also be assumed to be true. The reason why people want to reconstruct legal reasoning into deductively valid truth-preserving reasoning is precisely to be able to determine that the conclusion is true when the premises are established, so that the entire reasoning is reliable. However, the result of pursuing deductive fidelity will inevitably make it impossible to determine whether a certain premise is true, so the reliability of legal reasoning will be completely out of reach, and this kind of deductive reconstruction will be meaningless.

Faced with the limitations of monotonic reasoning methods such as belief modification and substantive implication, legal practice shows that it is an effective solution to treat rule-based legal reasoning as a non-monotonic reasoning or defeasible reasoning. The essence is that the

expansion of the premise set can lead to a change in conclusion, and this expansion is permitted by the open structure of the law. In the process of constructing legal arguments, as the legal interpretations applied to the case are updated, the rules are constantly revised, and as new evidence is added, the legal facts of the case will also change, thus making the original legal conclusion verdicts were changed and even rebutted.

### **3.3. Construction of Defeasible Reasoning Model**

Through the previous analysis, we can see that legal arguments based on legal reasoning are defeasible and can be defeated by stronger arguments, that is, through the refutation of premises, conclusions or inference relationships, and the continuous introduction of new counter-arguments. This invalidates the original argument. When reconstructing the form of the judicial reasoning model, the general construction process is as follows:

Suppose there is such a legal rule:

**A1:** A person who reaches the age of 18 has full capacity for civil conduct.

Then add an exception to the rule:

**A2:** People who are unable to identify their own behavior are not considered to have full capacity for civil conduct.

Rules and its exceptions can be combined to create new rules:

**A3:** People who have reached the age of 18 and are not unable to identify their own behavior have full capacity for civil conduct.

For a norm with clear rules and few exceptions, we can create a final rule that accommodates all exceptions by incorporating exceptions into the initial rule a limited number of times.

Go ahead and create another exception to the above rule:

**A4:** Minors over the age of 16 who rely on their own labor income as their main source of living are regarded as persons with full capacity for civil conduct.

Then the new rules can be derived as follows:

**A5:** A person who has reached the age of 18 and is not unable to identify his own behavior, or a minor who is over the age of 16 and whose main source of livelihood is his own labor income, is a person with full capacity for civil conduct.

As the simple situation shown, one can quickly draw conclusions as to whether someone has full civil capacity. Of course, this is not a complete formalization. If new exceptions to the rules are subsequently obtained, new judgment branches will need to be added to the original complete rules. Finally, a legal rule that accommodates all exceptions will be obtained.

In simple cases, this model of reasoning with revised premises is not problematic. But even if it is a simple application situation for judgment, it still requires a lot of energy to shape the rules. If the form of defeasibility reasoning is adopted, and the premise does not need to be true, the above related rules can be organized in the form of a set:

**A1:** Once you reach the age of 18, you have full capacity for civil conduct;

And it does not satisfy  $B_n = \{B_1, B_2, B_3\}$

**B1:** People with mental illness are not considered to have full capacity for civil conduct.

**B2:** Minors over the age of 16 who rely on their own labor income as their main source of living are regarded as persons with full capacity for civil conduct.

**B3:** Adults who are unable to identify their own behavior are not considered persons with full capacity for civil conduct.

At the level of argumentation, rules of type  $A_1$  are elements to be proved, while rule cases such as  $B_n$  that represent exceptions are elements not to be refuted [12]. If the constitutive requirements in  $A_1$  are met at the same time, but the conditions in the exception set are not sufficient to activate the refutation requirements, a conclusion can be drawn that supports the premise. Since we do not need to enter the complete rule that ultimately applies, we only need to list the set of exceptions to the rule separately for judgment.

It can be seen from the above argument that the characteristic of the defeasibility argument is that

the addition of exceptions results in the original inference result no longer being logically deductible. Compared with the application of complete rules, this argument mode does not determine in advance that the unique conclusion can be deduced after bringing in each element, but emphasizes the confrontational relationship between the elements to be proved and the elements that have not been refuted. If the subsequent argument is supported by better reasons, the conclusion of the previous argument no longer receives equal support.

In order to achieve this hierarchical legal reasoning model, it is necessary to introduce the corresponding argumentation schema. At the level of argumentation level  $L_0$ , the existence of premise  $P$  supports our conclusion  $Q$ ; At the level of  $L_1$ , the introduction of exceptions denies the argumentation at level  $L_0$ ; Subsequently, the introduction of second-order exceptions may cause the argumentation at level  $L_1$  to be denied, and then restore the conclusion of the  $L_0$  level argument, and so on. In other words, during the operation of the defeasible model, temporary validity vetoes may occur, but the negation of the previous conclusion does not mean the end of the argument. Negating the argument results of the previous stage may also be used in subsequent argumentation reasons. After being defeated in the comparison process, until the final argument conclusion is reached, all previous judgment nodes need to be open to truth judgments that may be right or wrong. Confrontation must be allowed between each level of argumentation. Once a level of argumentation is “sealed”, it may lead to working backward from the final level of argumentation, then deleting all previous objections, and finally arriving at an argument with only supporting reasons.

#### 4. Construction of Argumentation Format Based on Dialectics

Defeasibility needs to be demonstrated through reasoning and dialogue, which requires the participation of multiple subjects in the argument rather than just the monologue of the arguer. The

final argument is completed when intersubjective agreement is reached on the basis of the rebuttal's withdrawal of the challenge or the arguer's revision of his argument.

#### **4.1. Dialectical Manifestation of Legal Reasoning Modeling**

The entire judicial adjudication process is not a process in which a subject unilaterally states his or her views, but a process in which two or more parties to the case argue. Legal reasoning in the traditional sense is only regarded as reasoning from premises to conclusion, but this is only a part of the legal argumentation process. It's just a certain stage. In addition, this process also includes the refutation of the argument made by the arguer, the arguer's response to the refutation, the arguer's improvement of the initial argument, the refutation of the argument's further questioning, etc, it can be seen that legal argumentation is not a monotonous process, but a reasoning process in which information is constantly increasing and inferences are constantly revised. Research on non-unitary legal reasoning systems is full of hope. They can fully embody the spirit of legal discourse theory, but there are still many problems here. The first thing that needs to be solved is how to deal with the balance between different arguments and draw the conclusion which argument is the best. Some scholars believe that a non-unitary legal reasoning system can ultimately weigh the correctness of different viewpoints and make choices among them. In fact, however, this is a very difficult goal to achieve. When rules conflict with rules or arguments with arguments, higher-level non-rule standards such as policies, principles, and basic values should be resorted to. At this time, dialectical logic should be added to defeasible reasoning to balance different arguments in an open and dialogic debate system.

From the perspective of artificial intelligence legal reasoning modeling, dialecticality is mainly reflected in the following aspects: First, from the perspective of the modeling process, dialecticality is mainly reflected in the non-monotonicity of its expression logic, rather than the main source

of monotony. It is the dialectical relationship between new facts or information about the context of the dispute and the existing premises on which normative conclusions are based [13]. Second, from the perspective of the logic of modeling, this dialecticality is mainly reflected in the defeasibility of its reasoning, that is, using a dialectical approach to deal with the defeasibility of reason logic. Third, from the perspective of debate in modeling, it is mainly reflected as a kind of debateability and defeasibility that needs to be realized through a dialogue model, and is presented as two (or more) participants — due to different debate roles (Supporters or opponents) — Argument games surrounding different propositions [14].

#### **4.2. General Structure of Argumentation Scheme**

To put it simply, argumentation schemes are a reasoning pattern that is solidified in daily language debates. It is a reasoning method that is neither deductive nor inductive. Although the argumentation scheme appears to be in the form of affirming the antecedent, it is essentially different from the affirmative antecedent of classical logic. The aforementioned treatment of non-monotonic logic in Part 3, which treats all types of defeasibility within the same argument, does not really correspond to the real situation of legal reasoning. In legal practice, people often arrive at conclusions on the basis of comparing the strength of competing conclusions, and the foregoing assumptions cannot characterize this thought process. For a rule of law, its exceptions always outweigh it, whereas the rule that conflicts with it does not; on the other hand, the rule that conflicts with it can generally be used to reach the opposite conclusion, but its exceptions do not. Non-monotonic logic handles exceptions at the logical level, and argumentation styles can handle conflicts between rules at the argumentation level, so that the correct understanding of these relevant rules can be properly characterized.

We will describe the general structure of argumentation schemes from a logical perspective.

Generally speaking, an argumentation scheme consists of a conclusion, a set of premises, a set of conditions for the use of the type, and a set of exceptions that prevent the use of the type. So its general structure is:

**Conclusion**

*Premise:*

Premise 1, Premise 2... Premise  $n$

*Conditions:*

Condition 1, Condition 2... Condition  $k$

*Exceptions:*

Exception 1, Exception 2... Exception  $i$

This logically oriented approach deviates from the concept of traditional logic in some aspects because it is a concrete, dialectical logical approach. “Concrete” means that instances of the pattern may belong to specific debate situations and are not necessarily universally applicable and context-independent; “dialectical” means that the pattern may encounter counter-argument, that is, there may be situations in which the type does not lead to its conclusion even if it obtains its premises. The following will sort out the argument structure of some scholars, and establish the argument form of this article based on the views of these scholars.

The argument structure described by Joel Katzav and Chris Reed is [15]:

- (1) The form of the argument premise(s)
- (2) Form of guarantee for argumentation
- (3) conclusion

Typically, a guarantee is expressed in the form of a conditional. The antecedent of this conditional form corresponds to the premise given in the form, and the consequent corresponds to one or more facts being transmitted. For example, an argument from cause to effect:

- (1)  $A$
  - (2) If  $A$ , then  $A$  causes  $B$
- So,  $B$

Of course, one might be inclined to use the form “ $A$  causes  $B$ ” to characterize guarantees in a cause-to-effect argument, rather than the conditional form used in (2). But a proposition consistent with “ $A$  causes  $B$ ” would deduce the premises given by the form “ $A$ ”, thus making (1) redundant. To

avoid this, it is common to use the conditional form to represent guarantees in argumentation schemes.

Examples of prominent argumentation schemes that are defeasible affirmative antecedent rules can be described as:

- (1)  $P$
  - (2) If  $P$ , then usually  $Q$
- Therefore (hypothetically),  $Q$

The form represented by this structure can be attacked by arguing that there are exceptions to the rule (e.g.,  $P$  and  $R$  and if  $P$  and  $R$ , then usually not  $Q$ ). Each form has its own typical method of critical examination, so it is worthwhile to use them to supplement the study of abstract inferential forms alone [16].

Giovanni Sartor believes that the general structure of reasoning schemata is [17]:

- $A_1; \dots; \text{and } A_n$   
— It is  $B_1; \dots$  and the reason for  $B_m$ .

Such reasons may be reasons for drawing a final conclusion or reasons for drawing a defeasible conclusion.

If the characteristics of argumentation schemes as defeasible reasoning patterns are highlighted, the general pattern that can include almost all argumentation schemes is [18]:

- Major premise:  $\alpha \Rightarrow \beta$ ;  
Minor premise:  $\alpha$ ;  
Conclusion:  $\beta$ ;

The connective “ $\Rightarrow$ ” represents a defeasible implication, and the major premise means “if  $\alpha$ , then hypothetically  $\beta$ ”. This means that the conclusion  $\beta$  is valid only if there are no exceptions and no prevailing reasons for the opposite conclusion (rebuttal),  $\beta$  is derived from  $\alpha$ . The argumentation scheme can be recast into a defeasible affirmative antecedent form, in which the antecedent of the major premise of the conditional sentence is the conjunction of statements, and each statement represents a prerequisite of the initial argumentation scheme. For example, the form of appeal to expert opinion is:

- Major premise: ( $E$  is an expert and  $E$  said  $A$ )  
 $\Rightarrow A$ ;  
Minor premise:  $E$  is an expert and  $E$  said  $A$ ;  
Conclusion:  $A$  is true.

Critical questions can be reformulated as counterevidence that weakens (no longer applies) the relevant pattern or disproves (refutes) its premise. For example, a critical question about the unreliability of experts could be rephrased as this weakener:

$E$  is unreliable  $\Rightarrow \neg[(E \text{ is an expert and } E \text{ said } A) \Rightarrow A \text{ is true}]$ .

No matter how you characterize the general structure of an argumentation scheme, you need to capture two elements (premise, argument or reason and conclusion, argument or claim) and a defeasible inference rule. Specific argumentation schemes are all developed on this basis and are the embodiment of premises, conclusions and inference rules. In fact, a formula proposed by Robert C. Pinto best reflects the essence of the argumentation scheme:  $(s) (t) (x)$  If  $s$  thinks (expectation, affirmation, assumption, etc.) at  $t$  that “ $x$  is  $F$ ”, then, in the absence of weakening or overturning evidence at  $t$ , it is reasonable for  $s$  to believe (expect, affirm, assume, etc.) that “ $x$  is  $G$ ” at  $t$  [19].

In this way, argument evaluation shifts from a truth-preserving norm to an entitlement-preserving norm. The former means that when the premises of a valid argument are true, the conclusion cannot be false; the latter means that, according to the argument, when the premises are acceptable (reasonable), people have the right to draw a defeasible conclusion. We can propose a simplified general structure of the argumentation scheme [20].

Usually, those who meet the condition  $P$  can be considered (expectation, affirmation, assumption, etc.)  $C$ .

In the here and now, exceptions (evidence that weakens or subverts  $C$ ) have been ruled out.

Therefore, it is reasonable to think (expect, affirm, assume, etc.) that conclusion  $C$  is exclusive (albeit fallible) [21].

To sum up, due to limited abilities, we can only construct a very rough and simple argumentation scheme so far, and more detailed characterization can only wait for in-depth research in the future. But from another perspective, such

a simple model may be more suitable for artificial intelligence technology [22].

The process of defeasible legal reasoning is a demonstration of the argumentative process regarding the strength and weakness of reasons. As long as the rules can be analyzed correspondingly at the level of reasons, they can enter the judgment logic of the intelligent system. However, in the judicial context, adjudication must not only pursue substantive justice, but also pay attention to the appearance of justice, that is, to substantiate the argument results. The arguer's conclusion is derived from the support of premises and reasons. The legitimacy of the premises or reasons becomes the focus of argumentation disputes. A single defeasible reasoning can only reflect one level of the argument presented by the arguer, so it needs to be done in dialectics. Conduct further discussions on the argumentation disputes at different levels to complete the confirmation of the legitimacy of the premises or reasons [23]. The explicitness of argumentative rationality imposes an obligation on the arguer to respond to criticism at the dialectical level, and if they are ignored the argument will appear unreasonable. Therefore, the argumentation process also pays attention to the attack and defense of the argument, which can be related to the critical issues of the argumentation scheme and is closely related to the evaluation of the argument.

In addition, judging from the current technological development, there are still technical difficulties in converting legal language into computer language flawlessly [24].

## Conclusion

More importantly, intelligent systems are also unable to make value judgments like human beings, and it is still doubtful whether many propositions that are not yet conclusive in terms of human ethical knowledge can be left to machines that analyze the probability of a case's verdict from past materials, and they also run into a series of problems related to value and dignity, and the subjective status of human beings.

It is worth mentioning that the limits of artificial intelligence's application of defeasible reasoning deserve our vigilance. Defeasible reasoning can only provide “guarantee” at best and cannot provide “confirmation” like deductive reasoning. The more difficult part is that artificial intelligence algorithms are generally not public. In this case, the combination of non-public algorithms, closed systems and plausibility conclusions will not only increase the difficulty of accountability for wrong conclusions, and will also shake the credibility of the content of judicial judgments.

## References

1. Buchanan BG, Headrick TE. *Some Speculation about Artificial Intelligence and Legal Reasoning*. Stanford Law Review; 1970.
2. Lodder AR. *Dialaw: On Legal Justification and Dialogical Models of Argumentation*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publ.; 1999.
3. Reiter R. A logic for default reasoning. *Artificial Intelligence*. 1980;13(1–2):81–132.
4. Prakken H, Sartor G. Modeling Reasoning with Precedents in a Formal Dialogue Game. *Artificial Intelligence and Law*. 1998;6(2). <https://doi.org/10.1023/A:1008278309945>
5. Gardner A. von der L. *An Artificial Intelligence Approach to Legal Reasoning*. MIT Press; 1987. Available from: <https://archive.org/details/artificialintell00vond> (accessed: 14.09.2023).
6. Taruffo M. Judicial Decisions and Artificial Intelligence. *Artificial Intelligence and Law*. 2004;6:311–324. <https://doi.org/10.1023/A:1008230426783>
7. Hage J. *Studies in legal logic*. Springer; 2005.
8. Pollock JL. *Knowledge and Justification*. Princeton University Press; 1972.
9. Pollock JL. *Knowledge and Justification*. Princeton University Press; 1974.
10. Alchourron C, Gardenfors P, Makinsn D. On the Logic of Theory Change: Partial Meet Contraction and Revision Functions. *Journal of Symbolic Logic*. 1985;50(2): 510–530. <https://doi.org/10.2307/2274239>
11. Alexy R. Book Review of Logical Tools for Modelling legal Argument. *Argumentation*. 2000;14:66–72.
12. Sartor G. Defeasibility in Legal Reasoning. In: Bankowski Z, White I, Hahn U (eds.) *Informatics and the Foundations of Legal Reasoning. Law and Philosophy Library*, (vol. 21). Dordrecht: Springer. 1995. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8531-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8531-6_4)
13. Swet AS. *The judicial construction of Europe*. Oxford University Press; 2004.
14. De Mat E, Winkels R, Van Engers T. *Automated detection of reference structures in law*. IOS Press; 2006.
15. Katzav J, Reed C. *A Classification System for Arguments*. University of Dundee, Scotland UK, 2010.
16. Prakken H, AI & Law. Logic and Argument Schemes. *Argumentation*. 2005;19:303–320. <https://doi.org/10.1007/s10503-005-4418-7>
17. Sartor G. *Legal Reasoning: A Cognitive Approach to the Law*. Heidelberg: Springer; 2005.
18. Walton D, Sartor G. Teleological Justification of Argumentation Schemes. *Argumentation*. 2003;27:111–142. <https://doi.org/10.1007/s10503-012-9262-y>
19. Pinto RC. Evaluating Inferences: The Nature and Role of Warrants. *Arguing on the Toulmin Model*. Hitchcock D., Verheij B. (eds.) Dordrech: Springer Publ.; 2006;10:115–143. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4938-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4938-5_9)
20. Garcia A.J., Simari G.R. Defeasible logic programming: an argumentative approach. *Theory and practice of logic programming*. 2004. p. 95–136.
21. Sovrano F, Sapienza S, Palmirani M, Vitali F. Metrics, Explainability and the European AI Act Proposal. *J — Multidisciplinary Scientific Journal*. 2022;5(1):126–138. <https://doi.org/10.3390/j5010010>
22. Pagallo U, Durante M. The Good, the Bad, and the Invisible with Its Opportunity Costs: Introduction to the ‘J’ Special Issue on “the Impact of Artificial Intelligence on Law”. *J — Multidisciplinary Scientific Journal*. 2022;5(1):139–149. <https://doi.org/10.3390/j5010011>
23. Casanovas P, de Koker L, Hashmi M. Law, Socio-Legal Governance, the Internet of Things, and Industry 4.0: A Middle-Out/Inside-Out Approach. *J — Multidisciplinary Scientific Journal*. 2022;5(1):64–91. <https://doi.org/10.3390/j5010005>
24. Bentzen B, Liao B, Liga D, Markovich R, Wei B, Xiong M, Xu T (eds.) Logics for AI and Law. *Joint Proceedings of the Third International Workshop on Logics for New-Generation Artificial Intelligence and the International Workshop on Logic, AI and Law. September 8–9 and 11–12, 2023*. Hangzhou: College Publications Publ.; 2023.

## About the authors

**Ze Li**, Doctor of Law, Associate Professor of the School of Law, Shanghai University of Political Science and Law, Shanghai, China; ORCID: 0000-0002-0815-8537; E-mail: strawberry7576@hotmail.com

**Feiping Lei**, PhD student of Shanghai University of Political Science and Law, Shanghai, China; ORCID: 0009-0005-3934-0605; E-mail: leifeiping1997@163.com



**Dmitry N. Ermakov**, Doctor of Economics, Doctor of Political Sciences, Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6835-3155, ORCID: 0000-0002-0811-0058; E-mail: ermakov-dn@rudn.ru

**Nina V. Symaniuk**, Associate Professor, Department of Public Law, Graduate School of Economics and Management, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6130-5695, ORCID: 0000-0002-8446-857X; E-mail: n.v.symaniuk@urfu.ru

**Илья В. Поletaев**, PhD student of the Department of Innovation Management and Foreign Economic Activity in Industry, Graduate School of Industrial Policy and Entrepreneurship, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1110-4456, ORCID: 0000-0002-3767-6659; E-mail: 1142220172@rudn.ru

**Naofal M.H. Aziz**, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries of the Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0004-5014-6195; E-mail: 1042208064@rudn.ru

**Ahmed Obaid**, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries of the Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0001-1556-6985; E-mail: 1042218171@rudn.university

**Pavel I. Ivanov**, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries of the Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0002-5456-6934; E-mail: 1142220389@rudn.ru

### Сведения об авторах

**Ли Цзэ**, доктор юридических наук, доцент юридического факультета, Шанхайский университет политических наук и права, Шанхай, Китай; ORCID: 0000-0002-0815-8537; E-mail: Strawberry7576@hotmail.com

**Лей Фейпин**, аспирант юридического факультета, Шанхайский университет политических наук и права, Шанхай, Китай; ORCID: 0009-0005-3934-0605; E-mail: leifeiping1997@163.com

**Ермаков Дмитрий Николаевич**, доктор экономических наук, доктор политических наук, профессор кафедры инновационного менеджмента в промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6835-3155, ORCID: 0000-0002-0811-0058; E-mail: ermakov-dn@rudn.ru

**Сыманюк Нина Васильевна**, кандидат юридических наук, доцент кафедры публичного права, Институт экономики и управления, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6130-5695, ORCID: 0000-0002-8446-857X; E-mail: n.v.symaniuk@urfu.ru

**Поletaев Илья Владимирович**, аспирант кафедры инновационного менеджмента и внешнеэкономической деятельности в промышленности Высшей школы промышленной политики и предпринимательства, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1110-4456, ORCID: 0000-0002-3767-6659; E-mail: 1142220172@rudn.ru

**Азиз Наофал Мохамед Хассин**, аспирант кафедры инновационного менеджмента в промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0004-5014-6195; E-mail: 1042208064@rudn.ru

**Обейд Ахмед**, аспирант кафедры инновационного менеджмента в промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0001-1556-6985; E-mail: 1042218171@rudn.university

**Иванов Павел Ильич**, аспирант кафедры инновационного менеджмента на производствах, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0002-5456-6934; E-mail: 1142220389@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-186-196  
UDC 629.79  
EDN: TOLN JL

Research article / Научная статья

## Improving the Capacity of the Carriageway of the City Streets of Karbala

Hayder S. Khudhair<sup>a</sup>, Hamid A.E. Al-Jameel<sup>b</sup>, Vladimir N. Konoplev<sup>a</sup>, Artur R. Asoyan<sup>a</sup>

<sup>a</sup>RUDN University, Moscow, Russia

<sup>b</sup>University of Kufa, Kufa, Iraq

✉ konoplev-vn@rudn.ru

### Article history

Received: February 2, 2024  
Revised: April 12, 2024  
Accepted: April 20, 2024

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The religious and economic importance of the city of Karbala led to an increase in the number of daily trips and an increase in the flow of traffic, therefore it was necessary to know the city's road network. This study deals with the evaluation of the traffic performance of urban streets of the study area. The survey was conducted for several days, in the morning and the evening. The data obtained for the selected roads at a distance of 200 m are engineering data, traffic data, and side friction data. The results showed that the values of side friction occurred during the morning and evening rush hours, which affect the decrease in the average speed by 51% because of the side friction was very high.

**Keywords:** average speed, level of Service, highway capacity






### Acknowledgements:

Authors want to thank the civil department in the College of Engineering at Al Kufa university and RUDN University for its contribution in supporting this research and assisting in its implementation.

### For citation

Khudhair HS, Al-Jameel HAE, Konoplev VN, Asoyan AR. Improving the capacity of the carriageway of the city streets of Karbala. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):186–196. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-186-196>

## Повышение пропускной способности проезжей части городских улиц Кербелы

Х.С. Худхаир<sup>a</sup> , Х.А.Э. Аль-Джамиль<sup>b</sup> , В.Н. Коноплев<sup>a</sup>  , А.Р. Асоян<sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>b</sup>Университет Куфы, Куфа, Ирак

✉ konoplev-vn@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 2 февраля 2024 г.

Доработана: 12 апреля 2024 г.

Принята к публикации: 20 апреля 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Изменение экономических и социальных факторов в городе Кербела привело к увеличению количества ежедневных поездок и увеличению интенсивности транспортного потока, что потребовало в целях обеспечения безопасности дорожного движения проведения исследований загруженности городских улиц. Регистрация дорожной обстановки (пропускная способность на участках длиной 200 м) осуществлялась с помощью камер видеонаблюдения утром и вечером. Данная информация накапливалась и обрабатывалась с использованием статистических методов обработки информации (статистические оценки и графическая аппроксимация). Результаты анализа показали, что сужение проезжей части дорог в утренние и вечерние часы пик за счет интенсивного использования правой полосы, прилегающей к тротуарам с обеих сторон проезжей части, для остановки и стоянки автотранспортных средств повлекло снижение средней скорости на 51 %.

**Ключевые слова:** средняя скорость, уровень обслуживания, пропускная способность шоссе

### Благодарности

Авторы выражают благодарность гражданскому факультету инженерного колледжа университета Аль-Куфа и РУДН за их вклад в поддержку этого исследования и за содействие в его реализации.

### Для цитирования

*Khudhair H.S., Al-Jameel H.A.E., Konoplev V.N., Asoyan A.R.* Improving the capacity of the carriageway of the city streets of Karbala // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 186–196. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-186-196>

### Introduction

Congestion on the roads in cities is one of the biggest transportation issues. Traffic congestion is a very intrusive activity for people and is brought on by high degrees of saturation of traffic flow. Due to the longer journey duration, congestion will have a detrimental effect on the driver or other road users. A population with a wide range of activities would have resulted in a mobility flow that needed suitable roadways to match [1; 2].

Jalan Raya Mandala, a major thoroughfare in metropolitan areas, frequently experiences saturation traffic flow at one specific location due to some form of pull traffic. Shopping centers are one type of high-traffic attraction. This is because the effectiveness of roads is significantly impacted by the impact of roadside barriers. Parking activity that uses the road is one type of side barrier that is frequently seen in the shopping district (on street parking). The width of the roadways utilized for park activities would result in a reduction in the

capacity of the roads to handle the flow of passing cars, or, to use another phrase, a reduction in the capacity of roadways [3; 4]. HCM has provided comprehensive instructions for estimating Based on speed and other factors, capacity, and level of service. Adjustment factors for evaluating the capacity for various parameters are provided if the HCM handbook does not include side friction parameters for determining capacity and level of service [5]. Munawar made a comparison between the numbers reported by IHCM (1997) and the values found in the field data collected in Indonesia. He concluded that, as suggested by IHCM, there had been a considerable shift at high side friction values in the capacity trend (1997) [6]. Chiguma conducted a thorough investigation to determine the side friction's impact on urban arterials in Dar-es-Salaam, Indonesia. The research examined how side friction affected section capacity and mean speed. The weighing variables of the side friction parts were quantified through the use of multiple linear regression analysis [7]. Using Indonesian Highway Capacity Guidance, or IHCG 2014<sup>1</sup>, the level of service for DI Panjaitan Street was evaluated, and the most important component impacting side friction was found using multiple linear regression analysis in SPSS. The study found that levels from *C* to *D* were experienced from Tuesday through Friday, while levels of *F* were experienced on Mondays from 7 AM to 9 AM and between 5 PM and 7 PM Equation (1) was used to determine the side friction's most important variable.

$$SF = 0.157 + 0.002 X_1 + 0.001 X_2 + 0.002 X_3. \quad (1)$$

The study demonstrates that a non-motorized vehicle park's stops, enters, and exits substantially match the degree of saturation with a correlation value (*R*) of 0.792 [8]. The goal of the study is to understand the various effects of side friction on the capacity of Yosodipuro Street, level of service

(LOS), and saturation level. The Indonesian Highway Capacity Manual (IHCM) 1993<sup>2</sup> is the basis for the analysis. The survey was conducted over the course of one day, primarily between 6 A.M. and 12 P.M., along three different sections of Yosodipuro Street, each of which is 200 meters long. Geometric, data on side friction and traffic counting were collected from the field. According to the data, Yosodipuro Street has a maximum hourly volume of 2058.83 pcu/hour. This circumstance occurs in Location 1 around 6:30–7:30, and this roadway can accommodate 2118.32 pcu each hour. Location 1, Location 2, and Location 3 each have a degree of saturation (DS) of 0.972, 0.638, and 0.632, respectively Each location's LOS is: Locations 1 and 3 are D-Level, and Locations 2 and 3 are C-Level, according to the degree of saturation (DS). This indicates that while Locations 2 and 3 are in good shape, Location 1 is getting close to capacity [9]. The total capacity and the LOS of the roadway are impacted by the impedance that various types of HVs create for other vehicles in mixed traffic [10]. The most crucial factor in traffic control is on-street parking management so that the degree of saturation of traffic can be reduced. Road speeds and levels of saturation determine the service level [11]<sup>3</sup>. The goal of the research was to evaluate how on-street parking is currently functioning. The analysis's findings showed that both locations' peak parking hours were in the late afternoon, notably after 4:00 PM, and that this was because of the concentration of activity at that time. The findings also revealed that, for both roads, most of the parked cars (80 percent) had wait periods of more than 30 minutes. They also stressed the fact that there was a lot of unlawful parking along the two streets they had inspected, both on the weekends and throughout the workweek [12].

Based on a combination of data and Greenshield's theory, the capacity value of arterials showed a 9 percent decrease in value when

<sup>1</sup> Indonesian Highway Capacity Guidance, or IHCG 2014.

<sup>2</sup> Indonesian Highway Capacity Manual (IHCM) 1993.

<sup>3</sup> Menteri Perhubungan Republik Indonesia 2015 Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor: PM 96 Tahun 2015 Tentang Pedoman Pelaksanaan Kegiatan Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas 1–45.

considering side friction and established that pedestrian activity, which is one of the events that cause side friction, has the greatest impact on the traffic stream's average speed across all study sections. Side friction levels ranged from very low to very high. 34 km/h was recorded as the average speed at low levels of side friction, and 19 km/h was recorded at higher levels. Therefore, the reduction was estimated at 51%, which is a significant amount [13]. The impact of side friction on an urban street's capacity that is not divided. Side friction is a composite variable that describes how much regular traffic flow interacts with other nearby activities. Side friction significantly reduces capacity, with reductions ranging from 11.05 to 60.73 percent [14]. In general, it can be said that the presence of different side friction elements along the sides of urban roads causes a decrease in capacity and speed. on-street parking, Bus stops, and pedestrians, vehicles' average speed significantly decreased by 21 percent, 27 percent, and 15 percent, respectively [15]. Founded effect of side friction on capacity, flow density, and free-flow speed in urban streets of Baghdad [16] On-street parking and non-motorized vehicles' effects on an urban road's performance as a side friction parameter on capacity have been implemented to overcome the randomness observed in capacity values [17]. average decrease due to roadside friction Stream speed can be observed in all study sections because of side friction. Bus stops and bus bays caused a stream speed reduction of 49–57%. While on-street parking decreased stream speed by 45–67%. Due to transient bottlenecks resulting from on-street parking, buses exiting and entering bus bays, and buses at the kerbside bus stop, roadside friction also reduced capacity. When using both kinds of PCUs, bus bays and bus stops reduce capacity by 10 to 53%. On-street parking reduced urban roads' capacity by 28–63%, which had an adverse effect on their usability [18]. Urban multilane highways' capacity and LOS for heterogeneous traffic may be evaluated based on

a study of the segment capacity and level of service. The LOS's of most of the segments are between *C* and *D*, and the segments' base capacities range from 1850 to 1900 pc/h/ln [19]. The presence of side friction impairs the overall performance of traffic parameters. Roadway capacity and traffic speed can be increased by making some adjustments. Heterogeneous traffic, which includes slow-moving vehicles and non-motorized vehicles, reduces the effective road width as a result of vehicle parking along the side of the road, among other parking and unparking operations. These events are typically seen at a nearby market or commercial area. The side frictional parameter has already been taken into account by IHCM when calculating speed and capacity. Generally, in Indian urban cities, there are heterogeneous traffic conditions [20]. The increase in side friction in many urban streets led to an decrease in the speed in road networks, The aims of this study to know the influence of side friction on speed by using the Indonesian Highway Capacity Manual (IHCM 1995)<sup>4</sup>.

### **Methodology**

This study uses the Indonesian Highway Capacity Manual (IHCM 1995) to calculate the side friction levels to determine the level of side friction. In this study, side friction data during peak hours between 7:30 and 9:30 in the morning and between 4 and 6 in the evening. Numerous actions on the road were recorded using the videography technique. Roadside activities were observed over a 200-meter section to determine the direction of the traffic under consideration. By observing the frequency of various activities, such as traffic flow rate, pedestrian movement, and parking, U-Turn movement and Entire-Exit operations. The SF data and traffic flow are extracted from the video film at 5-minute intervals. Results of a traffic survey and a side friction survey were processed using IHCM 1995 [22].

<sup>4</sup> Indonesian Highway Capacity Manual (IHCM) 1995.

### 1. Determine side friction

For measurement of side friction, procedure followed by Pal and Roy is used in present study [21]. This method uses the pedestrian influencing area as standard parameter to calculate equivalent pedestrian units for the events other than pedestrian. The stopped vehicles are converted into equivalent number of pedestrian units for standardizing the static side friction activity.

The frequency of all stopped vehicles was converted and added with frequency of pedestrians observed in the field. The equation (2) is used to estimate the Pedestrian equivalency unit (*PEU*) for converting all stopped vehicles into equivalent number of pedestrians. The *PEU* is multiplied with the frequency of events to convert the vehicles into pedestrian units. Projected area of pedestrians, vehicle type and *PEU* is shown in Table 1.

Table 1

Projected area and <i>PEU</i> for different mode		
Mode	Projected area, m <sup>2</sup>	<i>PEU</i>
Pedestrian	0.50	1.00
2W	1.2	2.5
3W	3.9	7.8
Car	7.3	14.5
Bus	31.2	62.4
LCV	5.4	10.7
Jeep/Van	9.3	18.6
Bicycle	1.1	2.2

Source:[21]

$$PEU_i = \frac{7.27}{0.5}; \tag{2}$$

$$PEU_i = 14.53, \tag{3}$$

where, *PEU<sub>i</sub>* is the pedestrian equivalency unit of the subject vehicle, *PA<sub>i</sub>* is the projected area of the subject vehicle and *PA<sub>p</sub>* is the projected area of the pedestrian. The number of pedestrian events and stopped vehicles are added to calculate total static side friction frequency in terms of *PSPU* (events/hr) which is estimated by using the equation (4).

$$N_{PSPU} = N_p + \sum(PEU_i \times N_i), \tag{4}$$

where, *N<sub>p</sub>* is the frequency of pedestrians, *PEU<sub>i</sub>* is the pedestrian equivalency unit of the subject

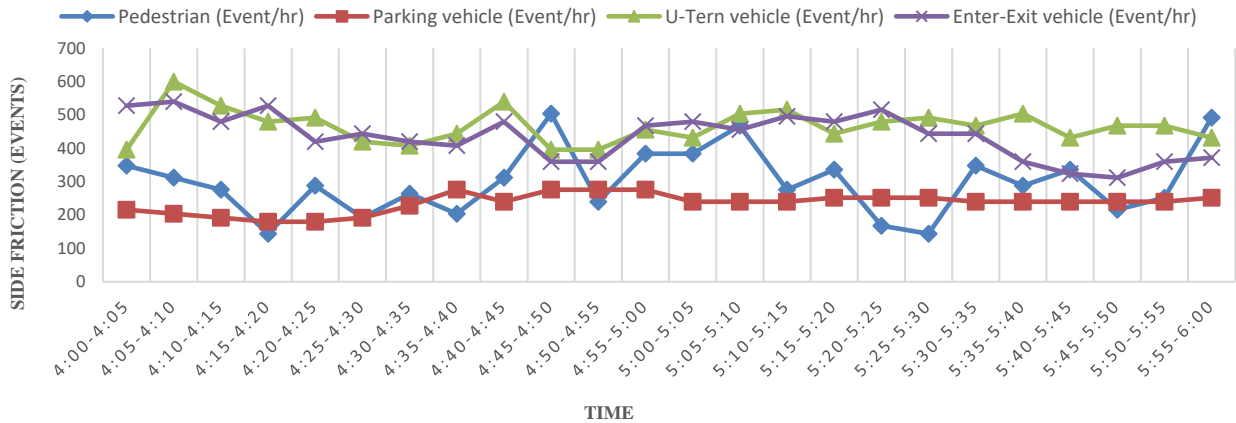
vehicle and *N<sub>i</sub>* is the frequency of the subject vehicle. Entry-exit vehicular movement and wrong movement of vehicles those are moving activities that contribute to side friction on the road. Side friction (*SF*) was calculated by estimating weighing factors of the events observed on the roadside. To estimate the weighing factor for each roadside activity, L. Chiguma [7] estimated the standardised coefficients and weighing factors using regression method by taking average stream speed as a performance measure variable. Similar methodology is adopted in the present study to find the relative weights of roadside activities. By taking stream speed as a performance measure, the relative weighting factors of each activity was estimated for determining *SF* (Events/hr) on the selected road sections. The *SF* (Events/hr) for each section was calculated by using the equation (5). *SF* is the side friction which is the sum product of roadside events frequency of different activities and their estimated weighing factors [7].

$$SF = (RW_1 \times N_{PSPU}) + (RW_2 \times N_{EE}) + (RW_3 \times N_{WM}), \tag{5}$$

where, *N<sub>PSPU</sub>* is the frequency of pedestrians and parked vehicles in equivalent pedestrian units, *N<sub>EE</sub>* is the frequency of entry-exit vehicles, *N<sub>WM</sub>* is the frequency of wrong movement vehicles and *RW* is the relative weights of each activity type.

#### 1.1. Fatima Al-Zahraa Street

Table 1 shows the frequency distribution of the side friction data for the second segment. It is noted that pedestrian activity increases significantly compared to the activity of parked vehicles. The highest value for pedestrian crossing is reached 504 (Event/hr), while parked vehicles are 276 (Event/hr), the U-Turn movement vehicle element's frequency peaked at 600 (Event/hr) and the Enter-Exit vehicle element's frequency peaked at 540 (Event/hr). We observed that the side friction components in this street do not have a zero value.



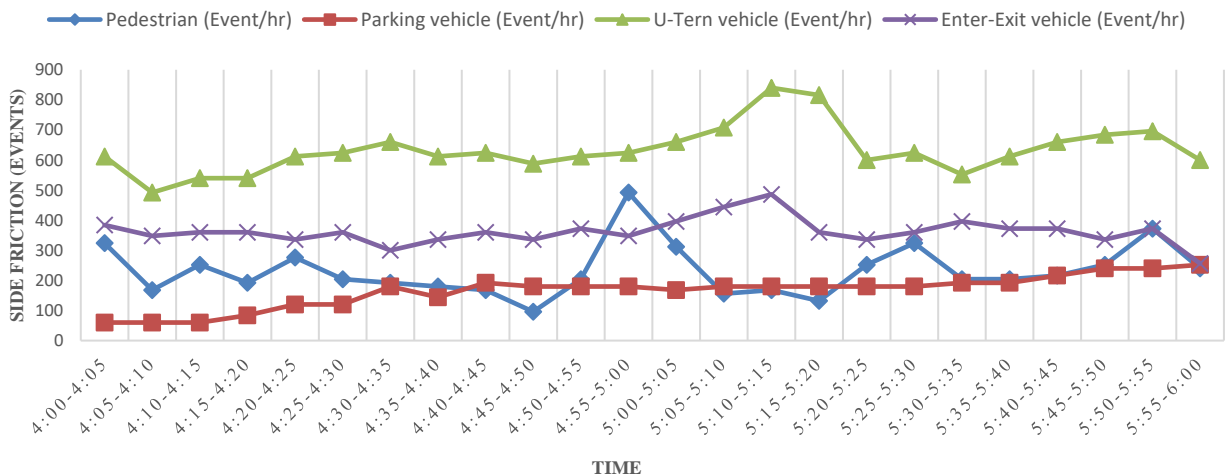
**Figure 1.** Variation of side friction events at road Fatima Al-Zahraa in the evening period  
 Source : made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev

**1.2. Al-Iskan Street**

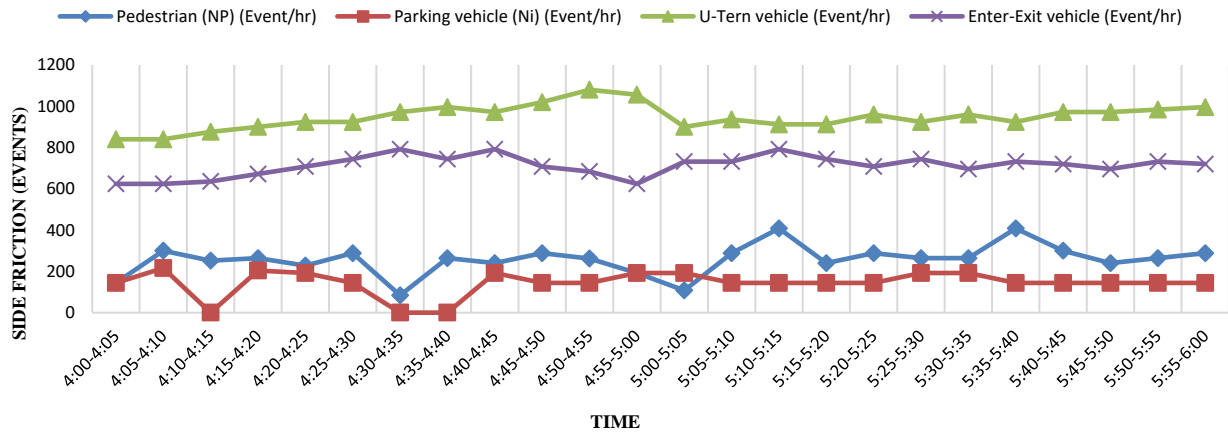
Figure 2 showed how often the side friction elements occur on Al-Iskan Street at its peak period. In the figure, it can be observed that the parked vehicle values for this segment are gradually rising as their values range between (60–252 (Event/hr)), whereas the pedestrian crossing element’s values are repeatedly high as they range between (96–492 (Event/hr)), the U-Turn movement element’s values are repeatedly high as they range between (492–840 (Event/hr)) and the Enter-Exit element’s values are repeatedly high as they range between (256–486 (Event/hr)).

**1.3. Ramadan Street**

Figure 3 Often showed the side friction elements occur on Ramadan Street at its peak period. In the figure, it can be observed that the parked vehicle values for this segment are gradually rising as their values range between (0–216 (Event/hr)), whereas the pedestrian crossing element’s values are repeatedly high as they range between (84–408 (Event/hr)), the U-Turn movement element’s values are repeatedly high as they range between (840–1080 (Event/hr)) and the Enter-Exit element’s values are repeatedly high as they range between (624–792 (Event/hr)).



**Figure 2.** Variation of side friction events at Al-Iskan Street in evening period  
 Source : made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev



**Figure 3.** Variation of side friction events Ramadan Street in evening period  
 Source : made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev

**1.4. Al-Tarbia street**

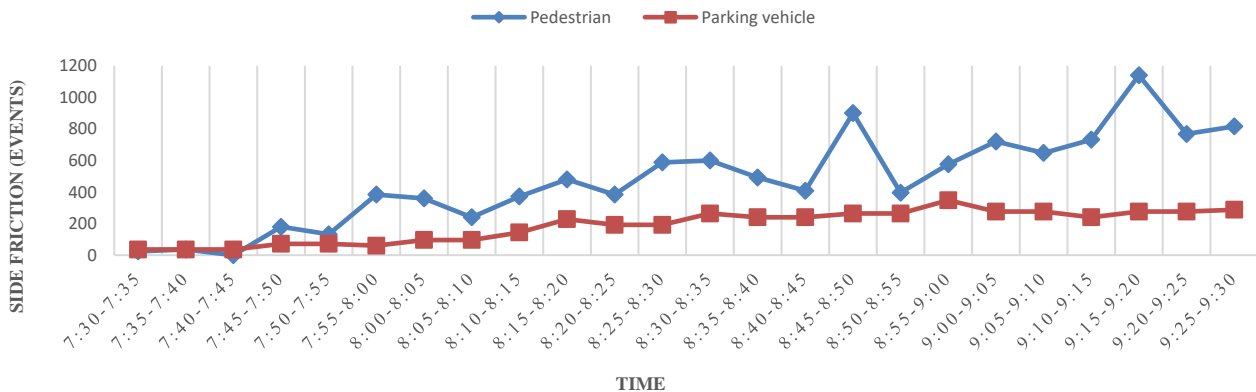
Figures 4–6 show that there is a clear difference in the values of the side friction elements for both segments of Al-Tarbia street during the morning and evening. During the morning period, the side friction values begin to increase and gradually decrease during the evening until they reach the lowest values.

The highest value of the pedestrian crossing component of the first segment during the morning period was 1140 (Event/hr) at the period between 9:15 am to 9:20 am, is higher than the vehicle parking component, which had the highest value of 348 (Event/hr) at the period between 8:55 am to 9:00 am. During the evening period, the highest value of pedestrian crossing reached 912 (Event/hr)

at the period between 12:55 pm to 1:01 pm. The highest value of parked vehicles reached 324 (Event/hr) at the period between 12:45 pm to 12:50 pm.

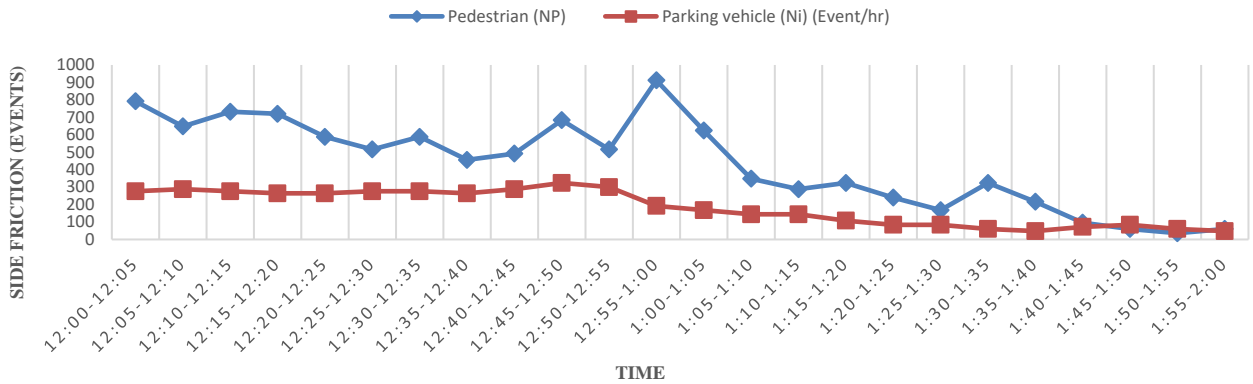


**Figure 4.** Site of Al-Tarbia Street  
 Source : photo by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev



**Figure 5.** Variation of side friction events Al-Tarbia street in the morning period  
 Source : made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev





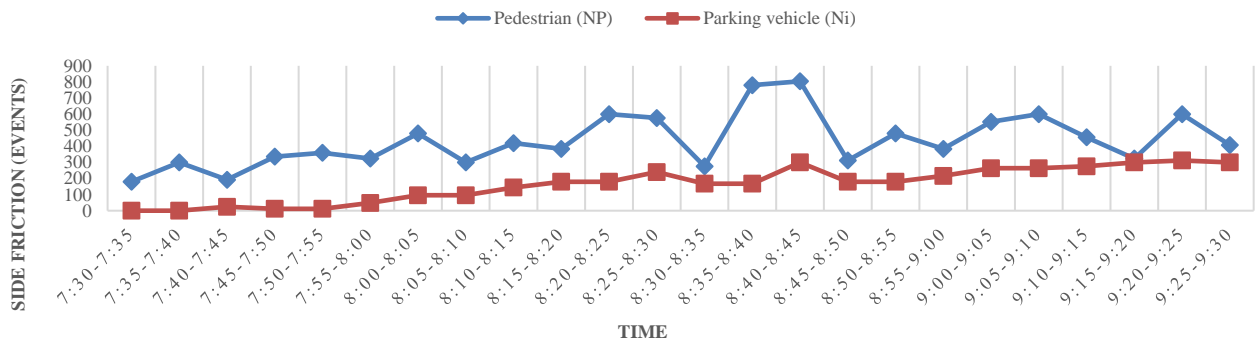
**Figure 6.** Variation of side friction events Al-Tarbia street in the evening period  
 Source: made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev

**1.5. Al-Abbas Street**

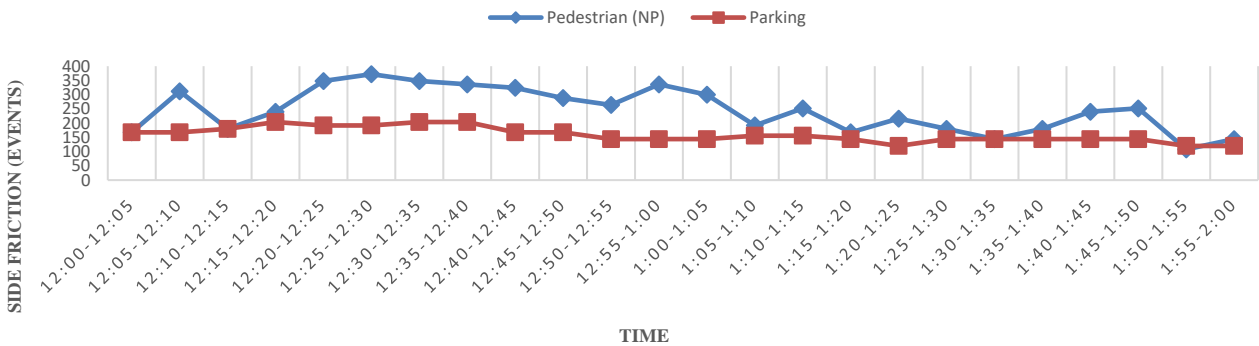
Figures 7, 8 show the recurring distribution during the morning and evening period for the first segment of Al-Abbas Street, where it was observed an increase in the parked vehicles component at the morning period. Its value ranges between 0–300 (Event/hr) and decreases in the

evening period, where the value of the parked vehicles ranges between 120–204 (Event/hr).

Through the figures, it can mention that the value of the pedestrian crossing element is higher than the element of parked vehicles, as it reaches the highest value during the morning 804 (Event/hr) and the evening 372 (Event/hr).



**Figure 7.** Variation of side friction events Al-Abbas Street in the morning period  
 Source: made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev



**Figure 8.** Variation of side friction events Al-Abbas Street at evening period  
 Source: made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev

## 2. Analysis of urban street side friction

Table 2

The IHCM has defined side friction levels as High and Low Levels since 1993. The IHCM lays out the roadside friction aspects that must be considered when calculating flow and capacity. The side friction was divided into four categories based on the fluctuation in the speed data in Table 2.

Tables 3–5 shows the effect of SF on all streets selected during the morning and evening periods was very high, which affected the capacity of the street and reduced the speed by about 51%.

SF, Events/hr	Level of SF
0–500	Low
500–1000	Medium
1000–2000	High
> 2000	Very high

Source: Indonesian Highway Capacity Manual (1997).  
Directorate General of Highways,  
Republic Indonesia, Jakarta

Table 3

Levels of side friction at different speeds

SF, Events/hr	Level of SF	Average stream speed, km/hr	Percentage reduction in average speed, %
0–500	Low	34	–
500–1000	Medium	31	20
1000–2000	High	24	38
> 2000	Very high	19	51

Source: [13]

Table 4

Level of SF in the evening period

Road Name	Max. SideFriction, Event/hr	Level of sidefriction	Percentage reduction in average speed, %
Fatima Al-Zahraa Street	3764	Very high	51
Al-Iskan Street	3164	Very high	
Ramadan Street	2498	Very high	
Al-Tarbiastreet	4792	Very high	
Al-AbbasStreet	3825	Very high	

Source: made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev

Table 5

Level of SF in the morning period

Road Name	Max. SideFriction, Event/hr	Level of sidefriction	Percentage reduction in average speed, %
Al-Tarbiastreet	4976	Very high	51
Al-AbbasStreet	4498	Very high	

Source: made by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev

## Conclusion

1. All the side friction values were very high for urban streets during the evening and morning peak periods as a result of the presence of schools

and government departments, therefore, it requires traffic engineering solutions.

2. The highest value of SF was 4976 (Event/hr) during the morning period of Al-Tarbia Street.

3. The highest value of SF was 4792 (Event/hr) during the evening period of also Al-Tarbia Street.

4. The study found that the percentage reduction in average speed is 51% because of the side friction was very high on all urban streets.

## References

1. Akbar M, Budianto E, Doloksaribu B. Penentuan Besarnya Tarif Angkutan Dalam Kota (Angkot) Dengan Metode BOK. *Musamus Journal of Civil Engineering*. 2019;1(2):12–15.

2. Mudiyo R, Anindyawati N. Analisis Kinerja Ruas Jalan Majapahit Kota Semarang (Studi Kasus: Segmen Jalan Depan Kantor Pegadaian Sampai Jembatan Tol Gayamsari). *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Dalam Pengembangan SmartCity*. 2017;1(1):345–354.

3. Akbar M, Utary C, Kakerissa Y, Asmal S. Priorities of road network development to support national food flows in Merauke District with SWOT and AHP methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;343. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/343/1/012185>

4. Akbar M, Jinca MY, Rahim J. Combination of the IPA-SWOT-AHP models for the formulation of the road network of development policy (A case study in Merauke Regency, Papua Indonesia). *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2018;18(3):28–34.

5. Highway Capacity Manual. HCM2D10. 2010. Available from: <https://trb.org/Main/Blurbs/164718.aspx> (accessed: 07.12.2023).

6. Munawar A. Speed and capacity for urban roads, Indonesian experience. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2011;16:382–387. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.459>

7. Chiguma L. *Analysis of side friction impacts on urban road links*. KTH School of Architecture and the Built Environment, Stockholm, Sweden; 2007.

8. Gosal FE, Tambunan E. Effect of side frictions on level of service of DI Panjaitan Street in Cawang-East Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;878(1):012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/878/1/012048>

9. Hidayati N, Sunarjono S, Saud A, Magfirona A. Different impact of side friction condition on traffic flow along Yosodipuro Street Surakarta. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2114(1):040011. <https://doi.org/10.1063/1.5112440>

10. Singh S, Shukla BK, Santhakumar SM. Infra-red sensor-based technology for collecting speed and headway data on highways under mixed traffic conditions. *7th International Conference on Signal Processing and*

*Integrated Networks (SPIN-2020)*. 2020. p. 607–611. <https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9070829>

11. Manual HC. *Highway capacity manual*. Washington, DC, 2000;2(1):26–27. <https://scholar.google.com/scholar>

12. Al-Jameel HAE, Muzhar RR. Characteristics of on-street parking on-street parking in Al-Najaf City urban streets. *Transportation Research Procedia*. 2020;45:612–620. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.050>

13. Gulivindala P, Mehar A. Analysis of side friction on urban arterials. *Transport and Telecommunication Journal*. 2018;19(1):21–30. <https://doi.org/10.2478/tj-2018-0003>

14. Biswas S, Chandra S, Ghosh I. Side friction parameters and their influences on capacity of Indian undivided urban streets. *International journal of transportation science and technology*. 2021;10(1):1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2020.03.007>

15. Salini S, Ashalatha R. Analysis of traffic characteristics of urban roads under the influence of roadside frictions. *Case studies on transport policy*. 2020;8(1):94–100. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.06.008>

16. Alkaissi ZA, Kamoona WA. Influence of roadside impedance on speed and capacity of urban streets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1090(1):012121. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1090/1/012121>

17. Chauhan R, Dhamaniya A, Arkatkar SS. et al. Effect of side friction parameter on urban road traffic: under mixed traffic scenario. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2019;13:314–330. <https://doi.org/10.11175/easts.13.314>

18. Rao AM, Velmurugan S, Lakshmi K. Evaluation of influence of roadside frictions on the capacity of roads in Delhi, India. *Transportation research procedia*. 2017;25:4771–4782. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.489>

19. Salam FM, Majid HM. Evaluation of Capacity and Level of Service for Heterogeneous Traffic of Urban Multi-Lane Highways. *Construction*. 2022;2(2):31–38. <https://doi.org/10.15282/construction.v2i2.8609>

20. Kanani M, Motwani RG, Dave HK. Review of influence of road side friction in urban area. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2017;3(2):1103–1106. <https://www.ijariit.com/manuscripts/v3i2/V3I2-1552.pdf>

21. Pal S, Roy SK. Impact of roadside friction on Travel Speed and LOS of rural highways in India. *Transportation in Developing Economies*. 2016;2(9):1–12. <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0011-z>

22. Bång K-L, Bergh T, Marler N, Mertasudira S. Indonesian Highway Capacity Manual. In Book: *Highway Capacity and Level of Service*. 2021. p. 35–40.

### **About the authors**

**Hayder S. Khudhair**, Postgraduate student of the Department of Engineering and Transport Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-6833-7780; E-mail: hyder.s@uokerbala.edu.iq

**Hamid Athab E. Al-Jameel**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kufa, Iraq; ORCID: 0000-0002-1367-4421; E-mail: hamid.aljameel@uokufa.edu.iq

**Vladimir N. Konoplev**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering and Transport Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 3876-1534, ORCID: 0000-0003-1662-6254; E-mail: konoplev-vn@rudn.ru

**Artur R. Asoyan**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; Professor of the Department of Operation of Road Transport and Car Service, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1020-5089, ORCID: 0000-0002-1976-9376; E-mail: asoyan-ar@rudn.ru

### **Сведения об авторах**

**Худхаир Хайдер Салман**, аспирант кафедры техники и технологий транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-6833-7780; E-mail: hyder.s@uokerbala.edu.iq

**Аль-Джамиль Хамид Адаб Идан**, доктор технических наук, профессор кафедры гражданского строительства, инженерный факультет, Университет Куфы, Ирак; ORCID: 0000-0002-1367-4421; E-mail: hamid.aljameel@uokufa.edu.iq

**Коноплев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологий транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 3876-1534, ORCID: 0000-0003-1662-6254; E-mail: konoplev-vn@rudn.ru

**Асоян Артур Рафикович**, доктор технических наук, профессор департамента транспорта инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1020-5089, ORCID: 0000-0002-1976-9376; E-mail: asoyan-ar@rudn.ru