

*Журнал «Научное обозрение. Технические науки» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-57440 выдано 27.03.2014. ISSN 2500-0799*

**Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,695**  
**Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,319**

*Учредитель, издатель и редакция:*  
*ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*

*Почтовый адрес: 101000, г. Москва, а/я 47*  
*Адрес учредителя, издателя: 410056, г. Саратов,*  
*ул. им. Чапаева В.И., д. 56*  
*Адрес редакции: 410035, г. Саратов,*  
*ул. Мамонтовой, д. 5*

**Founder, publisher and edition:**  
**LLC SPC Academy of Natural History,**

**Post address: 101000, Moscow, p.o. box 47**  
**Founder's, publisher's address: 410056, Saratov,**  
**5 Chapaev V.I. str.**  
**Editorial address: 410035, Saratov,**  
**5 Mamontovoi str.**

*Подписано в печать 28.12.2024*  
*Дата выхода номера 31.01.2025*  
*Формат 60×90 1/8*

*Типография*  
*ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*  
*410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5*

**Signed in print 28.12.2024**  
**Release date 31.01.2025**  
**Format 60×90 8.1**

**Typography**  
**LLC SPC «Academy Of Natural History»**  
**410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.**

*Технический редактор Доронкина Е.Н.*  
*Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.*

*Распространяется по свободной цене*  
*Тираж 1000 экз. Заказ НО 2024/6*  
*Подписной индекс в электронном каталоге*  
*«Почта России»: ПА518*  
*© ООО НИЦ «Академия Естествознания»*

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

**Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.**



**М.М. Филиппов (M.M. Philippov)**

С 2014 года издание журнала возобновлено Академией Естествознания

**From 2014 edition of the journal resumed by Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов  
**Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov**

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)  
А.Н. Курзанов (**A.N. Kurzanov**)  
Н.Ю. Стукова (**N.Yu. Stukova**)  
М.Н. Бизенкова (**M.N. Bizenkova**)  
Н.Е. Старчикова (**N.E. Starchikova**)  
Т.В. Шнуровозова (**T.V. Shnurovozova**)

---

***НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ***

***SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES***

*www.science-education.ru*

*2024 г.*

---



***В журнале представлены научные обзоры,  
статьи проблемного  
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,  
problem and practical scientific articles***

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### Технические науки

#### СТАТЬИ

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДЛЯ SKIVING МЕТОДА <i>Шабает А.А., Крапивина А.И.</i> .....	5
ПЛАНИРОВАНИЕ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ <i>Ананьев Р.О.</i> .....	10
БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОРИЕНТАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ ПЛОВЦА <i>Лысова А.А., Паинин С.В.</i> .....	14
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТОВ С КОМПЬЮТЕРНЫМ ЗРЕНИЕМ И МАНИПУЛЯТОРОМ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ШКОЛЬНИКОВ СРЕДНЕГО ЗВЕНА <i>Лыткин С.Д., Лыткин Ф.С.</i> .....	19
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В MICROSOFT EXCEL И LIBREOFFICE CALC <i>Пепельшев Д.И., Воробьев Д.А.</i> .....	24

---

## CONTENTS

### Technical sciences

#### ARTICLE

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF SOME MODERN  
TECHNOLOGIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY  
OF GEAR PROCESSING FOR THE SKIVING METHOD

*Shabaev A.A., Krapivina A.I.* ..... 5

ROADMAPPING THE NEXT GENERATION OF SILICON  
PHOTONICS

*Ananov R.O.* ..... 10

A STRAPLESS INERTIAL NAVIGATION SYSTEM  
FOR REGISTERING THE ORIENTATION AND  
MOVEMENT OF A SWIMMER'S PROPULSION

*Lysova A.A., Pashnin S.V.* ..... 14

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ROBOTS  
WITH COMPUTER VISION AND MANIPULATOR  
FOR TEACHING MIDDLE SCHOOL STUDENTS

*Lytkin S.D., Lytkin F.S.* ..... 19

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION  
OF CORRELATION ANALYSIS IN MICROSOFT EXCEL  
AND LIBREOFFICE CALC

*Pepelyshev D.I., Vorobev D.A.* ..... 24

## СТАТЬИ

УДК 621.833

**АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДЛЯ SKIVING МЕТОДА****Шабаев А.А., Крапивина А.И.***Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Набережные Челны, e-mail: AAShabaev@kpfu.ru*

Цель работы – анализ возможности повышения производительности и качества процесса нарезания зубчатых венцов Skiving методом за счет применения современных технологий повышения эффективности зубообработки за счет применения триботехнологий, технологий моделирования и повышения стойкости на основе применения покрытий. Согласно рассмотренным источникам, Skiving метод имеет ряд преимуществ. Он позволяет совмещать черновую и чистовую обработку, что значительно сокращает время и повышает производительность, обеспечивая высокую точность и качество обработки, что, в свою очередь, снижает уровень шума и вибраций в зубчатых передачах. При этом учитываются и отрицательные элементы: внедрение Skiving требует значительных финансовых затрат, этап производства требует точной настройки оборудования, а к инструменту предъявляются повышенные требования. Для снижения влияния рассмотренных факторов делается предположение о необходимости дополнительно шлифовать режущие инструменты и применять износостойкие покрытия, особенно после переточки, что увеличит срок службы инструмента и снизит износ. Применение азотирования режущих кромок может улучшить эксплуатационные характеристики инструмента и оптимизировать процесс обработки, а использование материалов с самосмазывающимися свойствами достаточно перспективно. В конечном итоге показано, что Skiving метод демонстрирует высокую производительность, точность и качество обработки. Он наиболее оптимален для серийного и массового производства. Однако следует учитывать высокую стоимость оборудования при внедрении в производство и необходимость точной настройки. Применение износостойких покрытий и компьютерного моделирования может значительно повысить эффективность и качество обработки зубчатых колес, а Skiving метод представляет собой перспективное направление, способное существенно повысить скорость и качество производственных процессов.

**Ключевые слова:** зубчатые колеса, Skiving метод, обработка металлов, точность обработки, износостойкость инструментов, моделирование

**ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF SOME MODERN  
TECHNOLOGIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY  
OF GEAR PROCESSING FOR THE SKIVING METHOD****Shabaev A.A., Krapivina A.I.***Naberezhnye Chelny institute, branch of the Kazan (Volga region) Federal University,  
Naberezhnye Chelny, e-mail: AAShabaev@kpfu.ru*

The article examines in detail the features of using the SKIVING method of cutting gear wheels, based on the mutual movement of the tool and the workpiece. The purpose of this work is to analyze the possibility of increasing the productivity and quality of the process of cutting gear rims by the SKIVING method through the use of modern technologies, increasing the efficiency of gear processing through the use of tribotechnologies, modeling technologies and increasing durability based on the use of coatings. According to the sources considered, the Skiving method has a number of advantages. It allows you to combine roughing and finishing, which significantly reduces time and increases productivity, ensuring high accuracy and quality of processing, which, in turn, reduces the level of noise and vibration in gears. At the same time, negative elements are also taken into account, such as the introduction of Skiving requires significant financial costs, and the production stage requires fine-tuning of the equipment, and increased requirements imposed on the tool. To reduce the impact of the factors considered, an assumption is made about the need to additionally grind cutting tools and use wear-resistant coatings, especially after resharpening, which will increase the service life of the tool and reduce wear. The use of nitriding of cutting edges can improve the performance characteristics of the tool and optimize the processing process, and the use of materials with self-lubricating properties is quite promising. Ultimately, it is shown that the Skiving method demonstrates high productivity, accuracy and quality of processing. It is most optimal for serial and mass production. However, one should take into account the high cost of equipment when implementing it in production and the need for fine-tuning. The use of wear-resistant coatings and computer modeling can significantly improve the efficiency and quality of gear processing, and the Skiving method is a promising direction that can significantly increase the speed and quality of production processes.

**Keywords:** gears, Skiving method, metalworking, precision machining, tool wear resistance, modeling

**Введение**

Несмотря на изменяющееся направление развития общества зубчатые колеса имеют также большое значение в совре-

менных устройствах. Сама форма зубчатых колес накладывает определенные ограничения и сложности при их получении. Сегодня условно можно выделить три класса

производства зубчатых колес: классические методы, прогрессивные методы и перспективные методы [1].

К классическим методам можно отнести долбление, где процесс включает в себя последовательное вырезание зубьев с использованием долбежного станка и метод обкатки (hobbing), где используется специальная фреза, которая постепенно формирует профиль зуба. Также сюда можно отнести и шевингование (shaving), где поверхность зубьев формируется специальными инструментами – шеверами, а также метод электроэрозионной обработки (EDM), где материал удаляется с помощью электрических разрядов.

К прогрессивным методам можно отнести: метод обкатывания (rolling), где зуб формируется путем пластической деформации материала; метод лазерной резки (laser cutting), где используется лазер для формирования профиля зубьев; метод Skiving, где синхронное перемещение инструмента и заготовки дают не только повышенную производительность и точность, но и позволяют совмещать черновую и чистовую обработку.

К перспективным методам можно отнести: метод аддитивного производства (3D printing), где основой является послойное наращивание материала для создания профиля зуба, и различные современные методы термообработки и химико-термической обработки, которые позволяют не только формировать зуб, но и улучшать его механические свойства. Конечно, разделение чисто условное, и методы, отнесенные к перспективным или прогрессивным, обусловлены текущим уровнем развития техники и технологии.

Сам процесс получения зубчатых колес до сих пор сталкивается с рядом проблем, связанных с требованием качества производительности и экономичности. Перечислим основные из них.

Первый ряд проблем связан с материалом зубчатых колес. Сам принцип работы зубчатых колес связан с трением и усилиями, приходящимися на каждое зубчатое колесо по отдельности. В связи с этим накладываются определенные требования к материалу зубчатых колес, такие как прочность износостойкость. К тому же зубчатое колесо постоянно подвергается изгибающим нагрузкам. Увеличенная твердость современных сплавов усложняет их механическую обработку и требует применения специализированных технологий. Применение термических воздействий изменяет геометрические параметры зубьев.

Во-вторых, стоит обратить внимание на режущий инструмент. Основной современ-

ной проблемой является повышение производительности, как следствие, это приводит к повышенным температурам в зоне обработки, которые влияют на геометрию инструмента и ухудшение его режущих свойств и стойкости. На точность профиля и качество обработки также значительно влияет износ инструмента. Это требует частой замены или восстановления инструментов, что увеличивает затраты и время простоя.

Стоит выделить точность и качество обработки, причем малейшие отклонения от требуемого профиля зуба приводят к проблемам в работе зубчатых передач – вызывают шумы, вибрации и, как следствие, повышенный износ. Все это сказывается на дальнейшей эксплуатации зубчатых колес.

Отдельно стоит выделить такую характеристику, как производительность: длительное время цикла обработки снижает общую производительность производства. Сложность профиля создает проблемы с автоматизацией и интеграцией искусственного интеллекта в производственный процесс на текущем уровне развития технологий. Сюда же можно добавить экономические аспекты, такие как затраты на более производительное и сложное оборудование. Стоит также отметить экологические требования, которые не будем выводить в отдельный пункт.

На основе представленного краткого анализа методов обработки зубчатых колес можно выделить на сегодняшний день Skiving метод как наиболее оптимальную технологию. Ее и будем далее рассматривать.

**Цель данной работы** – анализ возможности повышения производительности и качества процесса нарезания зубчатых венцов Skiving методом за счет применения современных технологий повышения эффективности зубообработки за счет применения триботехнологий, технологий моделирования и повышения стойкости на основе применения покрытий.

### **Материалы и методы исследования**

В первую очередь Skiving метод позволяет совмещать черновую и чистовую обработку, что значительно сокращает время обработки и повышает производительность производства. При этом сам метод высокопроизводителен. Это особенно важно для серийного и массового производства зубчатых колес. Следует заметить, что только в этих типах производства Skiving и будет целесообразен. Кроме очевидных причин, таких как высокая производительность (в массовом производстве требуется обрабатывать большое количество зубчатых колес за короткое время), есть экономические



составляющие: снижение себестоимости, то есть каждая экономия на временных и ресурсных затратах масштабируется на большее количество изделий, что существенно снижает себестоимость продукции. Первоначальные инвестиции в оборудование при внедрении рассматриваемого метода требуют дорогостоящего специализированного оборудования, а в массовом производстве высокая производительность компенсирует эти первоначальные затраты. Важным фактором также является стабильное качество. В массовом производстве важно поддерживать стабильно высокое качество продукции.

Во-вторых, Skiving обеспечивает высокую точность и качество обработки поверхности зубьев. Сам метод подразумевает использование специализированных инструментов, и их низкое качество не позволит изготовить зубчатое колесо. Специализированный инструмент всегда учитывает особенности его использования. Это помогает минимизировать отклонения в профиле зубьев, чего трудно добиться при использовании стандартного инструмента, а основная задача по их компенсации перекладывается со стандартного инструмента на технологическое оборудование. Специальный инструмент обычно более устойчив к износу за счет оптимизации своей конструкции и выверенного использования износостойких покрытий (например, на основе нитридов или карбидов). Конструкция специализированного инструмента и его зажимного приспособления всегда подразумевает минимизацию трения и нагрева, а это позволяет избежать перегрева, деформаций и ухудшения качества поверхности формируемой поверхности колеса. Специализированные инструменты разрабатываются с учетом специфики процесса обработки, а это позволяет контролировать параметры резания, такие как глубина реза, скорость и подача, более точно, что обеспечивает стабильное высокое качество при серийном производстве.

Несмотря на заявленные преимущества, Skiving метод сталкивается с рядом проблем, которые необходимо учитывать при его внедрении на производство. Первая и главная проблема связана с точностью настройки оборудования и инструмента. Поскольку Skiving метод требует взаимного синхронного перемещения относительно друг друга заготовки и режущего инструмента, даже незначительные отклонения в настройке приводят к значительным дефектам в профиль зубьев. Для достижения необходимой точности требуются значительное время и усилия на настройку

оборудования и инструмента. Это приводит к увеличению начальных затрат на производство. Требуется более квалифицированный персонал для выполнения этих операций, а значит, и высокооплачиваемый. Неправильная или неточная настройка оборудования приводит к производству бракованных изделий, а увеличение брака не только увеличивает затраты на материалы и инструменты, но и замедляет производственный процесс, что, в свою очередь, дополнительно увеличивает общие затраты на производство. Высокая точность требует регулярного обслуживания и калибровки оборудования, что приводит к более частым остановкам на техническое обслуживание, а это снижает общую производительность. Использование специализированных инструментов требует дополнительных инвестиций в специализированное оборудование хранения и доставки, что повышает общую стоимость производства. Кроме того, такие инструменты имеют более короткий срок службы при недостаточном уходе. Высокая точность настройки, как отмечалось выше, требует квалифицированного персонала, что дополнительно приводит к дополнительным затратам, связанным с повышением квалификации и удержанием специалистов, а недостаточная квалификация персонала приводит к ошибкам.

Второй важной проблемой является быстрый износ инструмента. Сам метод обработки подразумевает высокие механические и тепловые нагрузки. Это приводит к повышенному износу режущих кромок инструмента. Высокие нагрузки могут приводить к возникновению микротрещин деформации инструмента, что приводит к непрогнозируемому выходу инструмента из строя, а это также негативно влияет на производительность [2].

Термомеханические воздействия, возникающие при обработке, представляют собой еще одну проблему. Высокие температуры, возникающие в процессе резания, могут вызывать термическое расширение и деформации как обрабатываемой детали, так и инструмента [3]. Это требует стабильной системы охлаждения и повышенные требования к СОЖ.

Стоит обратить внимание, что Skiving метод достаточно легко внедряется в автоматизированное производство. Skiving метод позволяет и требует точно контролировать параметры обработки, такие как скорость, подача, и глубина резания, а также взаимное перемещение заготовки и инструмента. Станки, формирующие зубчатый профиль, включают сенсоры и датчики, которые контролируют параметры процесса в реальном

времени. Это позволяет оперативно реагировать на изменения в работе оборудования, предотвращать возможные сбои и увеличивать надежность процесса. Использование программируемых логических контроллеров (PLC) и компьютерных систем управления (CNC) позволяет снимать, контролировать и учитывать параметры обработки, такие как скорость, подача и глубина резания. Автоматизированные системы проектирования и системы компьютерного управления производством позволяют легко внедрять программное обеспечение, необходимое для использования Skiving. Инженеры могут использовать цифровые модели зубчатых колес, которые затем автоматически переводятся в программы для станков [4]. Использование искусственного интеллекта и машинного обучения легко интегрируется в системы Skiving. Алгоритмы способны анализировать данные о производственном процессе и реализуют оптимизацию обработки. Автоматическое производство всегда использует автоматические системы загрузки и выгрузки заготовок и инструмента. А производство подразумевает использование магистральной подачи охлаждения и смазки.

Несмотря на то, что ранее было заявлено, что Skiving метод замечательно автоматизируется, следует отметить, что происходит автоматизация целой станочной системы, а автоматизировать отдельные процессы крайне сложно. Как было сказано выше, стабильность обработки не всегда прогнозируема, а это значительно усложняет автоматизацию процессов целом для остальных участников автоматизированной цепочки [5].

Экономические аспекты также можно отнести и к отрицательным факторам. Высокая стоимость специализированного оборудования может стать серьезным барьером для его широкого применения, особенно для малых предприятий. Постоянные настройки и калибровка оборудования требуют высококвалифицированных специалистов [5]. Экономические аспекты также играют важную роль. Высокая стоимость специализированного оборудования и инструмента для Skiving может стать серьезным барьером для его широкого применения, особенно в небольших производствах. Кроме того, необходимость регулярного технического обслуживания и калибровки оборудования увеличивает эксплуатационные расходы.

Таким образом, несмотря на все преимущества, метод Skiving требует тщательного подхода к внедрению, настройке и контролю параметров обработки, а также значительных инвестиций в специализированное оборудование и инструменты.

### Результаты исследования и их обсуждение

Skiving метод является эффективным методом получения зубчатых колес. Как было показано, точность качества обработки в значительной степени зависит от состояния инструмента и предварительных настроек оборудования. Для повышения качества обработки предлагается шлифовать режущие инструменты. Шлифование обеспечивает высокую геометрическую точность режущего инструмента. Это минимизирует трение и износ во время процесса резания, и откладывает микроразрушение режущих зубьев, а также улучшает качество обработки зубчатого колеса на микроуровне.

Статье [6] предлагается повышать стойкость инструмента за счет износостойких покрытий зуба режущего инструмента. Это должно оказать значительное влияние на сроки использования инструмента и качества полученной поверхности изделия. Износостойкие покрытия на современном инструменте играют ключевую роль в повышении эффективности обработки. Они применяются для улучшения твердости и снижения трения режущего инструмента во время работы. Такие покрытия чаще всего состоят из твердых материалов на основе нитридов или карбидов металлов. Покрытия наносятся методами физического или химического осаждения из паровой фазы состояния вещества [7].

В статье [8] рассматриваются примеры азотирования режущего инструмента. Сам процесс азотирования представляет собой проникновение атомов азота в поверхностный слой материала детали, что приводит к формированию азотированного слоя, повышающего твердость. Еще один полезный эффект от азотирования – это хорошая адгезия азотированного слоя со смазочными материалами. Азотирование обычно повышает твердость, но инструмент испытывает ударные нагрузки, и добиться желаемого эффекта без снижения основных эксплуатационных характеристик крайне сложно.

Один из возможных способов добиться желаемого эффекта – возможность применения моделирования. Использование компьютерных моделей позволяет учитывать различные факторы, влияющие на процесс резания, начиная от расчета параметров режимов резания и выбора оптимальных технологических решений до оценки влияния геометрических параметров и материалов на конечные характеристики выпускаемого продукта [9]. Возможно, ключевым преимуществом моделирования является возможность проведения множе-



ства виртуальных экспериментов без необходимости физического изготовления и испытаний прототипов. Это сокращает время и затраты на разработку новых технологий и улучшение существующих процессов обработки зубчатых колес, повышению качества производства, снижению брака [10].

Skiving обработка – достаточно сложный процесс, требующий значительных затрат на подготовку производства, контроль производственных параметров. Как было сказано выше, Skiving метод требует качественной доставки смазочно-охлаждающих материалов в зону обработки, и при этом ключевой проблемой является неожиданный выход инструмента из строя. Одним из вариантов решения сложившейся проблемы авторы видят возможность самосмазывающих включений в материал [11]. Такие материалы должны обладать способностью самостоятельно смазываться в процессе обработки и задерживать на себе смазочные вещества. Свойства, которые должны закладываться к применяемому материалу с эффектом самосмазывания, должны учитывать специфику эксплуатационных условий, химическую совместимость, устойчивость к высоким температурам и агрессивным средам. Интеграция свойств самосмазывания должна быть осуществлена как в заготовку зубчатого колеса, так и в обрабатываемый инструмент [12]. Интеграция самосмазывающихся материалов не только в заготовки зубчатых колес, но и в инструмент, как нам кажется, представляет собой перспективное направление, которое может значительно улучшить их эксплуатационные характеристики и эффективность процесса производства.

### Заключение

В данной статье проведен анализ современных методов повышения эффективности обработки зубчатых колес, с особым акцентом на Skiving метод. Этот метод продемонстрировал высокую производительность, точность и качество обработки, что делает его оптимальным для серийного и массового производства. Однако его внедрение связано с определенными трудностями, такими как высокая стоимость оборудования и необходимость точной настройки. Применение износостойких покрытий и компьютерного моделирования может значительно повысить эффективность и качество обработки зубчатых колес. В целом Skiving метод представляет собой перспективное направление, способное су-

щественно повысить качество производственных процессов.

### Список литературы

1. Хусаинов Р.М., Паренкина Е.В. Оценка показателей точности нарезаемого колеса с учетом погрешностей технологической системы // Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института. 2013. № 1. С. 216–220.
2. Gilman V.N., Balabanov I.P., Fashutdinov A.I. Improving the efficiency of shaving through the use of wear-resistant coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Казань, 05–07 декабря 2018 г.). Vol. 570. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012024.
3. Gilman V.N., Fashutdinov A.I., Balabanov I.P. Increase effectiveness of shaving by using wear-resistant coatings and preliminary modeling cutting // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 839–844. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.839.
4. Khusainov R.M., Khaziev R.R. Mathematical Model for Assessing the Accuracy of Processed Gears on Gear Shaping Machines // Procedia Engineering Vol. 206. 2017. P. 1087–1092. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.599.
5. Gilman V.N., Fashutdinov A.I., Balabanov I.P. Experience in the application of nitriding in a glow discharge to increase the efficiency of gear processing by the method of grinding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Казань, 04–06 декабря 2019 г.). Kazan, 2020. P. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012014.
6. Wang W., Arif A.F.M., Veldhuis S.C. [et al.] Effects on tool performance of cutting edge prepared by pressurized air wet abrasive jet machining (PAWAJM) // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 277. P. 116456. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116456.
7. Garcia J., Pitonak R., Weissenbacher R., and Kopf A. Production and characterization of wear resistant Ti (C, N) coatings manufactured by modified chemical vapor deposition process // Surface & Coatings Technology. 2010. № 205. P. 2322–2327.
8. Гильман В.Н., Фасхутдинов А.И., Балабанов И.П. Опыт применения азотирования в тлеющем разряде для повышения эффективности обработки шестерни методом зуботочения // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019 (МНТК «ИМТОМ – 2019»): материалы X Международной научно-технической конференции (Казань, 05–06 декабря 2019 г.). Т. 2. Казань: Акционерное общество «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий», 2019. С. 226–229.
9. Balabanov I.P., Balabanova Yu., Agayev A. Development of a Parametric Model for Calculating Cutting Forces in External Cylindrical Turning of 16MnCr5 Steel // Key Engineering Materials. 2024. Vol. 979. P. 11–18. DOI: 10.4028/p-4xsctu.
10. Балабанов И.П., Балабанова О.Н., Гильман В.Н. Разработка параметрической модели расчета сил резания при наружном цилиндрическом точении стали 20crmnti // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019 (МНТК «ИМТОМ – 2019»): материалы X Международной научно-технической конференции (Казань, 05–06 декабря 2019 г.). Т. 2. Казань: АО «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий», 2019. С. 7–11.
11. Балабанов И.П. Обзор триботехнических самосмазывающихся материалов на основе полимеров // Молодой ученый. 2015. № 12–1 (92). С. 9–12.
12. Leushin I.O., Leushina L.I., Balabanov I.P., Savin I.A. Production of moulding cores and waterglass mixtures using “dry ice” for steel and iron casting // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 21. P. 34–37. DOI: 10.17580/cisirs.2021.01.05.

## ПЛАНИРОВАНИЕ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ

Ананьев Р.О.

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
Москва, e-mail: 2005roma.roman@mail.ru*

Работа посвящена исследованию достижений и перспектив развития кремниевой фотоники, а также ее роли в интеграции оптических и электронных технологий для создания высокоскоростных и энергоэффективных систем. Цель статьи заключается в анализе текущего состояния кремниевой фотоники, ее возможных применений и роли в решении задач передачи данных, а также в интеграции с микроэлектронными схемами для улучшения характеристик обработки информации. В статье рассмотрены основные компоненты кремниевой фотоники, такие как модуляторы, лазеры, фотодетекторы и усилители, а также методы их интеграции в фотонные интегральные схемы. Обсуждается, как кремниевая фотоника может улучшить существующие системы передачи данных за счет низкой потери сигнала на больших расстояниях, а также за счет использования многоканальных и гибких архитектур. В работе описаны результаты применения этих технологий в системах связи, сенсорах и квантовых вычислениях. В основе исследования лежит изучение научных публикаций, посвященных тематике кремниевой фотоники. В работе применяются ключевые методологические подходы, включающие анализ достижений в данной области и сопоставление эффективности различных систем. В заключение подчеркивается важность дальнейшего развития кремниевой фотоники для решения задач масштабируемости и улучшения производительности в различных областях, включая информационные технологии и научные исследования.

**Ключевые слова:** кремниевая фотоника, интегральные фотонные схемы, электронные интегральные схемы, модуляторы, усилители, детекторы

## ROADMAPPING THE NEXT GENERATION OF SILICON PHOTONICS

Ananayev R.O.

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: 2005roma.roman@mail.ru*

The work is devoted to the study of the achievements and prospects of silicon photonics, as well as its role in the integration of optical and electronic technologies for the creation of high-speed and energy-efficient systems. The aim of the article is to analyze the current state of silicon photonics, its potential applications, and its role in addressing data transmission challenges, as well as its integration with microelectronic circuits to enhance information processing capabilities. The article examines the main components of silicon photonics, such as modulators, lasers, photodetectors, and amplifiers, as well as methods for their integration into photonic integrated circuits. It discusses how silicon photonics can improve existing data transmission systems through reduced signal loss over long distances and the use of multichannel and flexible architectures. The study highlights the results of applying these technologies in communication systems, sensors, and quantum computing. The research is based on the analysis of scientific publications on the subject of silicon photonics. Key methodological approaches employed in the work include the analysis of advancements in this field and the comparison of the efficiency of various systems. The conclusion emphasizes the importance of further development of silicon photonics to address scalability and performance challenges in various fields, including information technology and scientific research.

**Keywords:** silicon photonics, photonic integrated circuits, electronic integrated circuits, modulators, amplifiers, detectors

### Введение

Кремниевая фотоника развилась в основную технологию, движимую достижениями в области оптических коммуникаций. Текущая генерация привела к массовому распространению интегрированных фотонных устройств от тысяч до миллионов, в основном в виде трансиверов для передачи данных в центрах обработки данных. Продукты для множества захватывающих приложений, таких как сенсоры и вычисления, уже на горизонте [1]. Что нужно, чтобы увеличить распространение кремниевой фотоники с миллионов до миллиардов произведенных устройств? Как будет выглядеть следующая генерация кремниевой фотони-

ки? Какие общие проблемы в интеграции и производственных узких местах стоят перед приложениями кремниевой фотоники и какие новые технологии могут их решить? В статье прослеживаются тенденции развития технологии кремниевой фотоники, проводятся параллели с поколенческими определениями технологии элементарной структуры металл-оксид-полупроводника (КМОП). Выделяются ключевые проблемы, которые необходимо решить, чтобы сделать гигантские шаги в создании устройств, схем, интеграции и упаковки, совместимых с КМОП-производствами. Также определяются проблемы, критические для следующего поколения систем и прило-

жений – в области связи, обработки сигналов и сенсорики. Выявляя и обобщая такие проблемы и возможности, можно стимулировать дальнейшие исследования в области устройств, схем и систем для экосистемы кремниевой фотоники.

**Целью исследования** является определение вызовов, критически важных для следующего поколения систем и приложений в области коммуникаций, обработки сигналов и сенсирования, исследование тенденций в развитии технологий кремниевой фотоники, а также выявление ключевых проблем, решение которых необходимо для достижения значительных успехов в создании совместимых с КМОП устройств, схем.

#### **Материалы и методы исследования**

Исследование выполнено на основе библиографического поиска и детального изучения научных публикаций, посвященных кремниевой фотонике и интеграции оптических и электронных технологий. В работе использованы материалы, доступные в открытых интернет-источниках, а также данные из научных баз РИНЦ, Web of Science и Scopus. В качестве ключевых методологических подходов применены анализ достижений и динамики развития в данной области, а также сравнительный анализ эффективности различных систем.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

На протяжении поколений разработки процессов КМОП к кремнию добавлялись различные материалы для снижения энергопотребления, улучшения производительности и уменьшения площади. К добавленным материалам относятся Al и Cu для металлических проводников, Ge для создания напряжений и реализации гетеропереходных биполярных транзисторов, а также нитрид кремния (SiN) для пассивации и диффузионных барьеров. Помимо r/n легирования для высокоскоростной модуляции, высокоскоростные фотодетекторы на основе Ge и SiN позволяют использовать более высокую оптическую мощность и поддерживает волноводы с меньшими потерями и лучшим фазовым контролем в интерферометрических устройствах.

Для радиочастотных (РЧ) устройств расстояния между активными элементами – которые имеют критические размеры в микронах – часто составляют сотни микрон, чтобы избежать РЧ-помех. Сокращение этих “пустых пространств” требует очень детального системного моделирования и многопараметрического моделирования, что будет в центре внимания для соз-

дания более компактных, дешевых и высокоплотных чипов. Пассивные компоненты в целом ограничены в сокращении размера контрастом показателя преломления и рабочей длиной волны в 1–2 мкм. Волновод не может значительно уменьшиться ниже ширины 400–500 нм. Тем не менее значительное масштабирование все еще возможно в оптических и высокоскоростных модуляторах. Техники упаковки с пассивной настройкой, такие как фотонная проволоочная сварка (ФПС) [2], предлагают альтернативу. С помощью компьютерного зрения и автоматизации ФПС могут быть изготовлены в полимерной фотопленке через двухфотонное поглощение между двумя соединительными точками, что позволяет смещения до 30 мкм. Применяются простые маркеры для выравнивания соединительных точек, и они не требуют строгих расстояний или больших площадей, что обеспечивает пассивное выравнивание, низкие потери и масштабируемое количество портов.

Часто используемый показатель эффективности модуляторов на основе волноводов – это  $\alpha V\pi L$ . Для микрорезонаторных модуляторов (МРМ), которые являются очень компактными, потери становятся менее критичными [3]. Потребляемая мощность драйвера зависит от импеданса модулятора, который воспринимается драйвером. Резистивный импеданс потребляет статическую динамическую мощность, в то время как высокий импеданс потребляет в основном динамическую мощность. Электроабсорбционные модуляторы (ЭАМ) на основе GeSi, использующие эффект Франца – Келдыша, могут работать в С-диапазоне и L-диапазоне. Однако они не являются оптически широкополосными, так как используют модуляцию на краю зоны для абсорбции. Фазовращатели для настройки и переключения. Многие фотонные приложения требуют фазовращателей, которые потребляют мало или совсем не потребляют энергии и имеют низкий показатель  $\alpha V\pi L$  для конфигурации, настройки и переключения. Для некоторых приложений эти фазовращатели должны быть быстрыми, но полоса пропускания Е/О в десятки ГГц не требуется. В то время как в большинстве схем свет проходит только через один высокоскоростной модулятор, ему приходится проходить через множество низкоскоростных фазовращателей для настройки и переключения, что увеличивает общие потери мощности и  $\alpha V\pi L$ . Улучшение тепловой изоляции позволяет снизить энергопотребление более чем в 10 раз, но за счет еще большего увеличения времени отклика. Возможен даже >100-крат-

ный прирост за счет удлинения волноводов для увеличения взаимодействия с металлическими нагревателями, но это ведет к увеличению потерь.

Кремний с его косвенной зонной структурой не может эффективно генерировать оптическое усиление, необходимое для создания лазера на кремниевой фотонной интегральной схеме (ФТС). Это ограничение требует использования альтернативных материалов или методов для введения источников света на кремниевом чипе, и за последние десятилетия были разработаны различные решения. Традиционный подход предполагает соединение лазера и изолятора с помощью волокна. Однако более масштабируемые решения интегрируют материалы с усилением на основе III–V полупроводников с ФТС без необходимости использования волокон. Если лазер не переносит отражений, все равно требуется изолятор. Внешние изоляторы хорошо работают, но они громоздкие и усложняют упаковку, увеличивая стоимость. Часто удается спроектировать чипы и упаковки таким образом, чтобы обратные отражения не являлись проблемой: высокие потери в пути передачи обеспечивают барьер между внешней средой и источником света [4]. Альтернативные подходы, направленные на устранение необходимости в громоздких изоляторах, включают тщательное проектирование фотонных компонентов для уменьшения отражений до приемлемого уровня, использование активных лазеров с малым коэффициентом усиления линии, монолитную интеграцию магнитно-оптических материалов, модуляторы пространственно-временного домена или активные схемы компенсации отражений. Гибридная интеграция представляет собой практическое решение, при котором несколько чипов из различных материалов объединяются в один пакет. Технолоия 2.5D интеграции, которая стала коммерчески успешной, использует лазеры, известные своей высокой производительностью, которые упаковываются вместе с кремниевой фотонной микросхемой с использованием эпоксидного клея, линз и изоляторов. Другие 2.5D техники включают в себя использование торцевого сопряжения [5] или фотонной проволоочной связи [6] для ослабления требований к выравниванию. Гибридные технологии 3D позволяют уменьшить размер сборки, хотя и требуют высокой точности размещения и соединения. Монолитная интеграция с использованием прямого роста эпитаксиального материала на кремниевой пластине, особенно квантово-точечных лазеров, является долгосрочной целью. Квантовые

точки обеспечивают низкую ширину линии и меньшую чувствительность к отражениям. Эта техника также может уменьшить пороговую плотность тока и устранить потребность в подложках из материалов III–V.

Многие приложения кремниевой фотоники требуют задержек длительностью от сотен пикосекунд до наносекунд. Примеры включают микроволновую фотонику, оптические фазовые петли (ОФП), частотные дискриминаторы, схемы уменьшения ширины спектра лазера, оптические фазированные антенны (ОФА), оптическую когерентную томографию (ОКТ) и гироскопы. Многие из этих приложений также требуют настройки с точностью до десятков пикосекунд и широкополосной работы [7].

Использование неглубоко вытравленных волноводов или ультратонких волноводов, которые могли бы решить некоторые из этих проблем, часто несовместимо со стандартными технологическими процессами с толщиной 220 нм. Это делает модификацию производственных процессов без ухудшения характеристик других фотонных компонентов сложной задачей [8].

Для улучшения энергоэффективности IMDD трансиверов и масштабирования на более высокие скорости передачи данных необходимо улучшение  $-3$  дБ Е/О ширины полосы пропускания до 100 ГГц. Улучшение эффективности использования энергии (ЭИЭ) лазеров критически важно для большинства приложений, особенно для связи и вычислений. Также необходимы эффективные многоволновые источники света с достаточной мощностью в каждом диапазоне длины волны. Фотодиоды с низким уровнем шума и большой полосой усиления в диапазонах О/Л/С могут улучшить отношение сигнал/шум без значительного увеличения потребления мощности, но исторически их полоса пропускания, линейность, шум и характеристики обработки мощности препятствовали их использованию на самых высоких частотах. Усиление сигналов ФД с использованием высокоэффективных и низкошумных трансимпедансных усилителей (НТУ) остается важной задачей.

Фотонные спектрометры для биосенсоров часто требуют рабочей длины волны, несовместимой с С/Л/О диапазонами. Это становится самым значительным узким местом, так как необходимо разрабатывать, тестировать и характеризовать новые волноводы и другие фотонные компоненты. Лазеры также являются проблемой, и необходимость широкой настройки длины волны или многоволновых лазеров на этих нестандартных длинах волн представляет собой серьезные трудности. Наконец, ста-



бильность и воспроизводимость измерений имеют решающее значение для биосенсоров, и производительность фотонных интегральных схем (ФИС) и лазера должна поддерживаться, несмотря на изменения окружающей среды.

### Заключение

Можно предположить, что в следующем десятилетии можно будет наблюдать достижение следующих этапов:

– Интегрированные лазеры и полупроводниковые оптические усилители на кремниевой фотонике начнут развиваться. Будут поддерживаться как многоволновые, так и настраиваемые лазеры.

– Дизайн, моделирование, симуляция, бесфабричное производство, упаковка и тестирование экосистемы начнут развиваться, привлекая новую группу инженеров и увеличивая доступность. Более короткие сроки изготовления будут способствовать ускорению НИОКР.

– Множество слоев SiN и Si будут поддерживаться в коммерческих фабриках, и высокоэффективные пассивные компоненты будут оптимизированы для этих слоев SiN.

– Ожидается, что тенденция развития методов инверсного дизайна приведет к созданию более компактных, высокоэффективных и надежных волноводных блоков, которые станут ключевыми компонентами для разработки технологических процессов. Эти же подходы будут способствовать повышению характеристик метаматериалов и метаповерхностей. Улучшение полосы пропускания и уменьшение площади, занимаемой связью между оптоволоконном и фотонно-интегральными схемами (ФИС), продолжится.

Активность в этой области возрастет, что сделает технологии кремниевой фотоники доступными для более широкой аудитории. Интеграция потоков проектирова-

ния фотонных схем в среду автоматизации проектирования электроники уже началась, и по мере того, как схемы становятся более сложными, совместный дизайн фотоники и электроники станет все более важным. Сочетание масштабирования фотонных схем с их интеграцией в электронные системы повысит их программируемость и возможность конфигурирования. Это упростит разработку новых систем, использующих свойства света для реализации инновационных приложений.

### Список литературы

1. Shekhar S., Bogaerts W., Chrostowski L., Bowers J.E., Hochberg M., Soref R., Shastri B.J. Roadmapping the Next Generation of Silicon Photonics // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, Is. 1. P. 751. DOI: 10.1038/s41467-024-44750-0.
2. Blaicher M., Billah M.R., Kemal J., Hoose T., Marin-Palomo P., Hofmann A., Kutuvantavida Y., Kieninger C., Dietrich P., Laueremann M., Wolf S., Troppenz U., Moehrl M., Merget F., Skacel S., Witzens J., Randel S., Koos W. Hybrid multi-chip assembly of optical communication engines by in situ 3D nano-lithography // *Light: Science & Applications*. 2020. Vol. 9, Is. 71. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41377-020-0272-5.
3. Sun J., Kumar R., Sakib M., Driscoll J., Jayatileka H., Rong H. A 128 Gb/s PAM4 silicon microring modulator with integrated thermo-optic resonance tuning // *Journal of Lightwave Technology*. 2019. Vol. 37, Is. 1. P. 110–115. DOI: 10.1109/JLT.2018.2878327.
4. Ананьев Р.О. Гидрогели для активной фотоники // *Научное обозрение. Технические науки*. 2024. № 4. С. 5–8. DOI: 10.17513/srts.1476.
5. Jin W., Yang Q., Chang L., Shen B., Wang H., Mark A., Wu L., Gao M., Feshali A., Panaccia M., Vahala K. Hertz-line-width semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators // *Nature Photonics*. 2021. Vol. 15, Is. 1. P. 346–353. DOI: 10.1038/s41566-021-00761-7.
6. Billah M.R., Blaicher M., Hoose T., Dietrich P., Marin-Palomo P., Lindenmann N., Nestic A., Hofmann A., Troppenz U., Moehrl M., Randel S., Freude W., Koos C. Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding // *Optica*. 2018. Vol. 5, Is. 7. P. 876–883. DOI: 10.1364/OPTICA.5.000876.
7. Ji X., Yao X., Gan Y., Mohanty A., Tadayon M.A., Hendon C.P., Lipson M. On-chip tunable photonic delay line // *APL Photonics*. 2019. Vol. 4, Is. 9. P. 1–8. DOI: 10.1063/1.5111164.
8. Xiang C., Jin W., Terra O., Dong B., Wang H., Wu L., Guo J., Morin T.J., Hughes E., Peters J., Ji Q., Feshali A., Panaccia M., Vahala K.J., Bowers J.E. 3D integration enables ultralow-noise isolator-free lasers in silicon photonics // *Nature*. 2023. Vol. 620, Is. 1. P. 78–85. DOI: 10.1038/s41586-023-06251-w.



## БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОРИЕНТАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ ПЛОВЦА

Лысова А.А., Пашнин С.В.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»,

Челябинск, e-mail: lysovaaa@susu.ru, pashninsv@susu.ru

Цель исследования – моделирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы для регистрации перемещений движителя пловца, направленной на улучшение алгоритмов обработки показаний чувствительных элементов, компенсации ошибок и оценки погрешностей. Данная система служит частью большого проекта разработки комплексного устройства по регистрации места положения движителя пловца в пространстве, хранению и обработке информации, визуальному отображению траектории движителя и др. Конечным выходом всей работы является предоставление достоверной информации тренеру о траектории движения движителя пловца. Для данной работы выходными критериями представляются способность системы регистрировать ориентацию движителя пловца в автономном режиме с записью данных на карту памяти и дальнейшая обработка этих данных. Предложена бесплатформенная инерциальная навигационная система на микромеханических гироскопах и акселерометрах. Проведены расчеты влияния ошибок на работу системы и частичный анализ погрешностей системы. Подобраны инерциальные чувствительные элементы. Смоделирована бесплатформенная инерциальная навигационная система, моделирующая поведение движителя пловца, с помощью которой можно отслеживать движение пловца и анализировать поведение движителя пловца при различных ориентациях, обеспечена заданная погрешность определения ориентации движителя пловца.

**Ключевые слова:** бесплатформенная инерциальная навигационная система, погрешности, ориентация движителя пловца

## A STRAPLESS INERTIAL NAVIGATION SYSTEM FOR REGISTERING THE ORIENTATION AND MOVEMENT OF A SWIMMER'S PROPULSION

Lysova A.A., Pashnin S.V

South Ural State University (National Research University),  
Chelyabinsk, e-mail: lysovaaa@susu.ru, pashninsv@susu.ru

The purpose of the study is to model a strapless inertial navigation system for registering the movements of a swimmer's propulsion system aimed at improving algorithms for processing readings of sensitive elements, error compensation and error estimation. This system is part of a large project to develop an integrated device for registering the position of the propulsor in space, storing and processing information, visually displaying the trajectory of the propulsor, etc. The end result of all the work is to provide reliable information to the coach about the trajectory of the swimmer's propulsion. For this work, the output criterion is the ability of the system to register the swimmer's orientation in offline mode with data recording on a memory card and further processing of this data. A free-form inertial navigation system based on micromechanical gyroscopes and accelerometers is proposed. Calculations of the effect of errors on the operation of the system have been carried out and a partial analysis of the errors of the system has been carried out. Inertial sensing elements have been selected. A free-form inertial navigation system has been modeled that simulates the behavior of a swimmer's propulsor, with which it is possible to track the movement of a swimmer and analyze the behavior of a swimmer's propulsor at various orientations, a given error in determining the orientation of a swimmer's propulsor is provided.

**Keywords:** strapless inertial navigation system, errors, orientation of the swimmer's propulsion

### Введение

В современном плавании одной из важнейших составляющих является техника спортивного плавания. Десятилетиями тренеры экспериментировали в поисках ответа на два основных вопроса: как снизить встречное гидродинамическое сопротивление телу пловца при его продвижении вперед с высокой скоростью и как увеличить мощность и эффективность гребков, продвигающих пловца вперед. Выявлялись

и проходили проверку временем наиболее эффективные элементы движений и их согласования. Уточнялись взгляды на технику плавания с учетом закономерностей биомеханики. Так постепенно сложились общие требования к рациональной технике плавания. Суть методики сводится к следующему: тренер делает надводную или подводную видеозапись спортивной техники пловца в условиях тренировки или соревнований; анализирует технику по фазам

цикла, сравнивая движения пловца с требованиями педагогической модели техники; делает выводы. С учетом выводов тренер вносит необходимые коррективы в процесс спортивной подготовки, подбирает необходимые технические упражнения, обсуждает проблему с пловцом и вводит новые методические установки и наглядные ориентиры [1, 2].

**Цель работы** – разработка модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) для регистрации перемещений движителя пловца, направленной на улучшение алгоритмов обработки показаний чувствительных элементов, компенсации ошибок и оценки погрешностей.

### Материалы и методы исследования

Технические требования:

- диапазон температур окружающей среды  $+5^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$ ;
- давление окружающей воздушной среды меняется в диапазоне от 700 до 800 мм рт. ст.;
- глубина погружения пловца не более 6 м;
- погрешность определения ориентации движителя пловца не более 1 градуса за 1 секунду;
- погрешность определения положения связанной с движителем пловца системы координат не более 1 мм за 1 секунду.

Из постановки задачи и анализа основных требований следует выделить несколько групп требований, имеющих определяющее значение с точки зрения принятия технических решений и принципов построения, а именно: требуемые точности определения ориентации и положения; определенный состав чувствительных элементов. Требования по температуре и давлению окружающей воздушной среды отводятся на второй план, тем не менее, в работе они учитываются.

БИНС построим на микромеханических гироскопах и акселерометрах [3]. Алгоритмы БИНС можно разделить на следующие блоки: алгоритм ориентации, блок пересчета, навигационный алгоритм [4, с. 128]. Если речь идет о навигации и, в частности, об операции определения пространственной ориентации объекта или, в данном случае, движителя пловца, то пловца можно сравнить с этим самым объектом [5, с. 43]. Проплывая из пункта А в пункт Б, пловец должен решить задачу навигации, т.е. реализовать программу траекторного движения, что включает в себя: определение фактического состояния движения объекта, предписание движения и задание движения объекта.

В данной работе решается первая задача – задача ориентации [6, 7]. Она может быть решена аналитически на основе измерений отдельных угловых параметров движения руки при последующем преобразовании полученных сигналов или их интегрировании. Алгоритм ориентации является одним из ответственных блоков БИНС, так как от него зависит точность выработки параметров ориентации, и, кроме того, по информации этого блока осуществляется пересчет вектора кажущегося ускорения из связанной системы координат в географическую [4, с. 123; 8, с. 141–145].

Для данной частной модели вводятся допущения. Первое: при формировании абсолютной угловой скорости географического трехгранника  $\omega$  не учитывается переносная угловая скорость, обусловленная вращением Земли вокруг своей оси,  $-\omega_{\text{пер}}$ . В результате этого в алгоритме меняется блок выработки составляющих угловой скорости  $\omega$ . Второе: при формировании абсолютной угловой скорости не учитывается составляющая относительного ускорения, вызванная изменением движения объекта вдоль сферической поверхности Земли с относительной угловой скоростью  $\omega_{\text{отн}}$  [4, с. 141].

Так как бассейн представляет собой прямоугольную ванну, жестко связанную с Землей, и пловец плывет вдоль одной из дорожек бассейна (т.е. всегда параллельно продольной стенке ванны), можно сделать вывод, что пловец плывет с постоянным курсом, а значит, по локсодромии. Локсодромия представляет собой логарифмическую спираль – линию двоякой кривизны, которая асимптотически стремится к полюсу [9]. Азимут движения пловца от начала дорожки бассейна до конца может быть произвольным, в зависимости от того, как ориентировано здание бассейна по отношению к северу, однако для наглядности результатов работы модели БИНС сделаем азимут нулевым, то есть дорожка направлена на север. Его движитель (кисть руки) при движении будет совершать сложное движение. Однако для отработки алгоритма регрессионной обработки результатов интегрирования показаний чувствительных элементов (ЧЭ) целесообразно задать приближенную, максимально простую модель движения руки: результат будет наглядным при сохранении общности методов обработки. Итак, кисть руки движется по окружности (рис. 1), совершая гармонические колебания по всем трем параметрам ориентации около нулевого положения (положения, при котором совпадают связанные и относительные оси OXYZ).

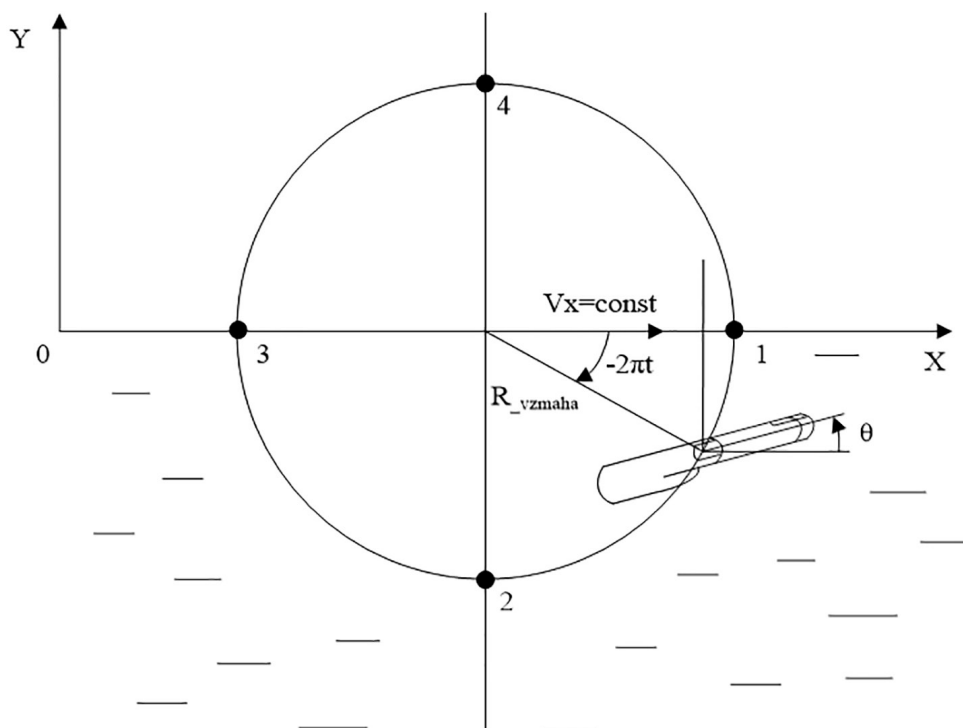


Рис. 1. Модель траектории движителя пловца

Параметры движения руки были выбраны из общих представлений о пловцах:

- период полного оборота (одного гребка) пловца принят равным  $T = 1$  с. Из этого следует, что частота вращения составляет  $2\pi$  рад/с;

- длина руки (радиус окружности, по которой совершает движение кисть) принята равной  $R_{vzmaha} = 0,8$  м;

- кисть руки движется равномерно по окружности, следовательно, акселерометры будут показывать только проекции центростремительного ускорения на связанные оси:

$$n_{xii} = -a_{ii} \cos(-2\pi t) = -a_{ii} \cos(2\pi t);$$

$$n_{yui} = -a_{ui} \sin(-2\pi t) = a_{ui} \sin(2\pi t);$$

$$a_{ii} = \frac{\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2}{R};$$

- углы ориентации задаются меняющимися по следующим законам:

$$W_{x_{otnosit}} = \frac{\pi}{6} \sin(2\pi t);$$

$$W_{y_{otnosit}} = 1,3 \cdot \frac{\pi}{6} \sin(2\pi t);$$

$$W_{z_{otnosit}} = 1,4 \cdot \frac{\pi}{6} \sin(2\pi t);$$

- проекции скорости руки в начальный момент времени должны быть нулевыми для корректной работы алгоритма автономного определения начальной ориентации. Поэтому для того, чтобы задать поступательную равномерную скорость (в ожидании пронаблюдать линейный в первом приближении рост координат поступательного движения на север – широты и относительной координаты  $\bar{X}$ ), на первой секунде симуляции задается линейно нарастающий сигнал по проекции кажущегося ускорения, направленного вдоль линии движения пловца. Затем (после первой секунды) акселерометры измеряют только центростремительное ускорение, действующее на руку при равномерном движении по окружности радиуса  $R_{vzmaha}$ .

#### Результаты исследования и их обсуждение

Построенная модель представляет собой систему, состоящую из двух связанных алгоритмов БИНС. Первая БИНС, построенная на углах Эйлера–Крылова [10], выполняет функцию идеального моделирования поведения руки пловца, выдавая «чистые» сигналы ЧЭ, обусловленные эволюциями,

совершаемыми рукой. Входом первого блока БИНС является модель траектории движителя пловца, описанная выше.

Далее сигналы ЧЭ проходят через блок добавления ошибок, в котором к «чистым» сигналам примешиваются ошибки ЧЭ: от рассогласования связанных осей и осей чувствительности ЧЭ (ошибка установки ЧЭ на плату), аддитивная (смещение нуля) и мультипликативная (изменение чувствительности) температурные погрешности, ограничение диапазона измерения, белый шум. Величины этих ошибок могут быть вычислены при известных показа-

ниях встроенного в гироскоп термометра, а также полученных в ходе стендовых испытаний углов рассогласования связанных и чувствительных осей ЧЭ, и затем вычтены из «реальных» показаний ЧЭ (показаний с ошибками).

Далее показания ЧЭ (включая температуру, давление и время) могут быть записаны в файл с моделированием записи на флэш-носителе. Однако при идеальной работе аппарата записи-считывания этот пункт можно опустить и обработать «реальные» сигналы ЧЭ в одном цикле с их созданием во втором блоке БИНС.

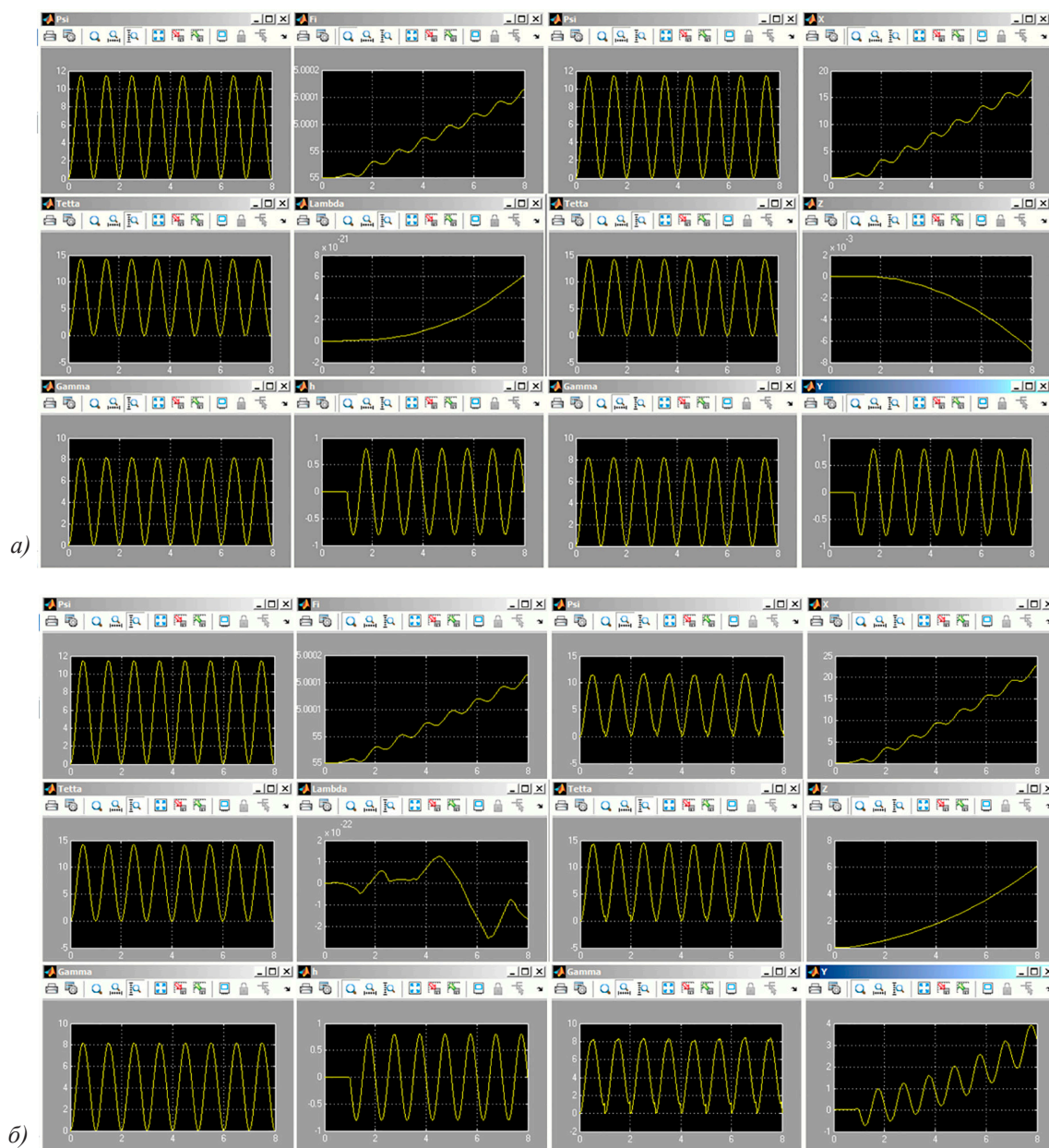


Рис. 2. Результаты моделирования: а) идеальная БИНС; б) БИНС с учетом ошибок



Второй блок, построенный по упрощенной схеме решения кинематического уравнения в кватернионах, является моделью алгоритма обработки (интегрирования) сигналов ЧЭ: предполагается сначала проинтегрировать показания, следуя алгоритму БИНС во втором блоке, а затем обработать получившиеся интегралы методами регрессионного анализа. На выходе второго блока БИНС углы ориентации руки по отношению к относительной системе координат (в данном случае совпадающей с географическим трехгранником с точностью до скорости и радиуса кривизны Земли на исследуемом участке пути) и навигационные параметры в относительных координатах.

Последовательность ввода ошибок выбрана следующая:

- ошибка от неточности установки ЧЭ на плате;
- мультипликативная составляющая ошибки от изменения чувствительности в зависимости от температуры;
- аддитивная составляющая ошибки от зоны нелинейности (нечувствительности) и смещения нуля в зависимости от температуры;
- ограничение выходного сигнала диапазоном измерения ЧЭ;
- дополнительное смещение нуля сигналов;
- белый шум.

Результат работы системы (графики координат местоположения объекта  $\varphi$  (широта),  $\lambda$  (долгота) и  $h$  (высота над уровнем моря) и параметров ориентации  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\gamma$ ) показаны на рисунке 2.

Генератор импульсов моделирует сигналы датчика давления: первую половину периода сигнал большой (рука в воде, единица), вторую половину периода сигнал маленький (рука в воздухе, ноль). Если предположить, что рука пересекает воду с нулевыми углами ориентации, то система будет работать лучше без дополнительной обработки, что демонстрирует рисунок 2б.

### Заключение

В данной работе получена система, моделирующая поведение движителя пловца, а также моделирующая работу БИНС, отслеживающей это движение. Смоделировано поведение выходных параметров БИНС при обработке сигналов ЧЭ, сформированных в результате решения кинематической задачи; создан алгоритм компенсации температурных погрешностей и погрешностей установки ЧЭ на плату; отработаны методы регрессионного анализа, позволяющие устранить влияние некомпенсированных погрешностей ЧЭ.

Выбраны чувствительные элементы системы. Этим требованиям среди датчиков

угловой скорости наиболее полно отвечают микромеханические гироскопы, среди приборов, измеряющих линейные ускорения, – микромеханические акселерометры.

Как уже было сказано выше, в данной работе реализован алгоритм ориентации – один из ответственных блоков БИНС. Это служит хорошим базисом для дальнейшего решения навигационных задач движителя пловца.

Предполагается, что после внедрения таких систем будут составлены некие карты соответствия экспериментальной кривой траектории движителя идеальной траектории, с учетом всех биометрических особенностей спортсмена. Следовательно, в финальной стадии развития этого направления можно будет для каждого пловца с известными биометрическими данными (рост, вес, объемы мышц, длина рук и пр.) выдать необходимые рекомендации в целях улучшения техники автоматически, пользуясь точными формулировками, оперируя точными числами в описании гребка: на какой стадии гребка как повел себя движитель, достаточное/недостаточное усилие развил и пр.

### Список литературы

1. Рябчук В.В. Кинематико-динамические индикаторы техники плавания юных пловцов-брассистов // Теория и практика физической культуры. 2022. № 1. С. 95-97.
2. Красильников В.Л., Ведерникова О.Б., Комельков С.А., Шевцов А.В. Исследование особенностей внешних динамических характеристик гребка пловцов-дельфинистов с последующей коррекцией рационального расположения сегментов движителей в коридоре модельных параметров // Человек. Спорт. Медицина. 2018. Т. 8, № 4. С. 80-87.
3. Шукалов А.В. Повышение точности резервной бесплатформенной системы ориентации на отечественных чувствительных элементах, изготовленных с применением MEMS-технологий // Фундаментальные проблемы техники и технологии. 2014. № 4 (306). С. 149-153.
4. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2009. 280 с.
5. Черников С.А., Щеглова Н.Н. Высокоточные системы навигации. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2018. 65 с.
6. Матвеев В.В., Погорелов М.Г., Лихошерст В.В., Каликанов А.В., Кирсанов М.Д., Стрельцов Д.С., Колесникова А.Г. Реализация алгоритмов ориентации бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 12. С. 85-91.
7. Матвеев В. В., Колесникова А.Г., Стрельцов Д.С. Задача ориентации в бесплатформенной инерциальной навигационной системе // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года. Минск: БНТУ, 2022. С. 49-51.
8. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы. Тула: ТулГУ, 2012. 199 с.
9. Распопов В.А. Бесплатформенная система ориентации для пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов // Приборостроение – 2014: 7-я Международная научно-техническая конференция. 2014. С. 128-129.
10. Белочкин П.Е., Кацай Д.А. Особенности моделирования бесплатформенной системы ориентации по уравнениям Эйлера в среде Matlab и Mathcad // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5. С. 18-20.



УДК 004.8/9:372.862

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТОВ С КОМПЬЮТЕРНЫМ ЗРЕНИЕМ И МАНИПУЛЯТОРОМ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ШКОЛЬНИКОВ СРЕДНЕГО ЗВЕНА

Лыткин С.Д., Лыткин Ф.С.

*ФГАОУ «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,  
Якутск, e-mail: slytkin@bk.ru*

Цель исследования – разработка эффективных образовательных инструментов для обучения школьников основам робототехники, программирования и алгоритмического мышления. Авторы в рамках школьных проектов создали серию роботизированных манипуляторов, оснащенных машинным зрением. В статье представлены результаты сравнительного анализа различных типов манипуляторов (декартовых, шарнирно-сочлененных двухзвенных и трехзвенных, дельта-роботов) с компьютерным зрением и их применения в образовательных целях. Особое внимание уделяется разработке дельта-роботов, отличающихся высокой скоростью, точностью и относительной простотой сборки и управления. Обоснована целесообразность разработки и применения именно дельта-роботов с компьютерным зрением, как с точки зрения гибкости обучения, так и с точки зрения реализуемости в школьных условиях. Результаты исследования демонстрируют высокий потенциал использования робототехники для развития у школьников инженерных навыков, алгоритмического мышления, навыков коллективной работы и творчества. Разработанные инструменты могут быть полезны для модернизации школьного образования и подготовки учащихся к будущей профессиональной деятельности. Полученные результаты вносят вклад в развитие теории и практики образовательной робототехники и могут быть использованы для создания новых образовательных программ и методических материалов.

**Ключевые слова:** дельта-робот, манипуляторы, компьютерное зрение, образование, робототехника

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ROBOTS WITH COMPUTER VISION AND MANIPULATOR FOR TEACHING MIDDLE SCHOOL STUDENTS

Lytkin S.D., Lytkin F.S.

*North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov,  
Yakutsk, e-mail: slytkin@bk.ru*

The purpose of the article is to develop effective educational tools for teaching students the basics of robotics, programming and algorithmic thinking. As part of school projects, the authors have created a series of robotic manipulators equipped with machine vision. The article presents the results of a comparative analysis of various types of manipulators (Cartesian, articulated two- and three-link, delta robots) with computer vision and their use for educational purposes. Special attention is paid to the development of delta robots, characterized by high speed, accuracy and relative ease of assembly and control. The expediency of developing and using delta robots with computer vision is substantiated, both from the point of view of learning flexibility and from the point of view of feasibility in school settings. The results of the study demonstrate the high potential of using robotics to develop students' engineering skills, algorithmic thinking, teamwork and creativity skills. The developed tools can be useful for modernizing school education and preparing students for future professional activities. The results obtained contribute to the development of the theory and practice of educational robotics and can be used to create new educational programs and methodological materials.

**Keywords:** delta robot, manipulators, computer vision, education, robotics

### Введение

Современное образование постоянно сталкивается с вызовами, связанными с технологическим прогрессом. Это требует от педагогов новых компетенций и постоянного профессионального развития. Включение робототехники и компьютерного зрения в образовательные программы становится неотъемлемой частью подготовки школьников к будущей жизни в мире высоких технологий [1, с. 209; 2].

Робототехника представляет собой междисциплинарную область, которая объединяет знания из различных предметов: мате-

матики, физики, информатики. Интеграция робототехники в образовательный процесс не только углубляет знания по базовым дисциплинам, но и способствует развитию критического мышления, логики и креативности. Это позволяет школьникам формировать целостное представление о сложных технических системах, развивая навыки решения инженерных задач и работы с автоматизированными устройствами [2; 3].

Использование робототехники в образовании действительно становится важным фактором для развития у учащихся современных навыков. Вот несколько причин,

почему это направление приобретает все большее значение:

– Искусственный интеллект, автоматизация и робототехника активно развиваются, и навыки работы с этими технологиями становятся ключевыми для успешной карьеры. Образование, включающее робототехнику, помогает учащимся быстрее адаптироваться к этим изменениям, что важно как для профессиональной, так и для личной безопасности в мире, где технологии играют все большую роль.

– Использование роботов и компьютерного зрения часто вызывает больший интерес у учеников по сравнению с традиционными методами обучения. Это связано с тем, что такие технологии предоставляют возможности для интерактивного обучения, где учащиеся могут видеть результаты своих действий в реальном времени [3].

– Включение роботов с машинным зрением и манипулятором в учебный процесс способствует развитию навыков программирования, анализа данных и проектирования. Это важно для выполнения сложных междисциплинарных проектов и системного мышления, что становится особенно востребованным на современных рынках труда [4].

– Роботы с функцией компьютерного зрения помогают обучающимся визуализировать свои действия и результаты, что делает обучение более наглядным и понятным. Это способствует лучшему пониманию теоретических концепций и развитию критического мышления у обучающихся.

Таким образом, внедрение робототехники и компьютерного зрения в учебный процесс не только актуально, но и необходимо для подготовки учеников к будущей жизни в высокотехнологичном мире. Это повышает их конкурентоспособность на рынке труда, а также развивает важные навыки, такие как критическое мышление, аналитические способности и креативность [4].

Данное исследование направлено на заполнение существующего пробела в области образовательной робототехники путем разработки и апробации методики обучения основам робототехники с использованием манипуляторов различной категории.

**Цель исследования** – разработка эффективных образовательных инструментов для обучения школьников основам робототехники, программирования и алгоритмического мышления.

#### **Материалы и методы исследования**

Материалом исследования является разработка роботов-манипуляторов с компьютерным зрением в рамках школьных проектов.

Авторы с 2018 по 2023 г. разработали серию интерактивных образовательных проектов на основе роботов-манипуляторов с машинным зрением. Целью проектов являлось развитие у школьников навыков программирования, механики и алгоритмического мышления. Список разработанных для проектов устройств:

1. Робототехническое устройство в проекте «Робот-пианист»:

– является декартовым манипулятором;  
– выполнен в виде линейного актуатора на базе каретки от струйного принтера для передвижения кисти, использует сервоприводы LEGO® Mindstorms® EV3 (детский робототехнический конструктор) для управления пальцами;

– распознает ноты на нотном стане с использованием видеокамеры, управляет движением кисти и пальцев для игры на пианино.

2. Робототехническое устройство в проекте «Робот-музыкант»:

– является двухзвенным шарнирным манипулятором, работающим в одной плоскости;

– выполнен в виде вращающегося плеча и вращающейся кисти на базе сервоприводов и деталей Pitsco TETRIX® Max, использует компактные сервоприводы из набора «Амперка» (робототехнический конструктор с платой Arduino) для управления пальцами;

– распознает ноты на нотном стане с использованием видеокамеры, управляет движением плеча, кисти и пальцев для игры на пианино.

3. Робототехническое устройство в проекте «Робот с видеозрением и одной рукой»:

– является трехзвенным шарнирным манипулятором, работающим во всех трех измерениях;

– выполнен в виде трехзвенного шарнирного манипулятора с мощными сервоприводами на базе деталей Pitsco TETRIX® Max, содержит исполнительный механизм в виде клешневого захвата для стаканов;

– распознает прозрачные стеклянные стаканы на любом фоне с использованием видеокамеры, определяет наличие содержимого в стаканах, переливает жидкости из стакана в стакан.

4. Робототехническое устройство в проекте «Дельта-робот»:

– является параллельным манипулятором, работающим во всех трех измерениях;

– выполнен в виде дельта-робота на базе деталей и сервоприводов LEGO® Mindstorms® EV3;

– автоматически сортирует поступающие по конвейерной линии цветные кубики с использованием датчика цвета.

5. Робототехническое устройство в проекте «Дельта-робот с видеозрением»:

- является параллельным манипулятором, работающим во всех трех измерениях;
- выполнен в виде дельта-робота на базе деталей и сервоприводов LEGO® Mindstorms® EV3;
- автоматически сортирует по цвету разбросанные на площадке цветные кубики с использованием видеокамеры, имеет возможность ручного управления и записи перемещений.

Категории и координатные системы манипуляторов определены авторами, чтобы более точно описать разработанные устройства, исходя из особенностей каждого проекта. Общепринятой классификации роботов-манипуляторов не существует, так как конструкций и задач манипуляторов можно представить великое множество, и промышленные манипуляторы тоже весьма разнообразны [5].

Первые два проекта преимущественно направлены на развитие у школьника навыков работы с механикой и электроникой. Ограниченное количество степеней свободы подвижных частей руки и кисти не требует сложных математических расчетов. Школьника обучали на языке Java алгоритмам компьютерного зрения в процессе разработки программы распознавания нот. Для распознавания нот на нотном стане использовалась библиотека компьютерного зрения OpenCV, применялись алгоритмы обнаружения контуров и сегментации для выделения нотных линеек и отдельных нот. Именно поиск оптимальных решений для распознавания нот оказался наиболее увлекательным для школьника этапом проекта.

«Робот-музыкант» способен распознавать музыкальные ноты на изображениях нотного листа, полученных с помощью видеокамеры, и записывать их в текстовый файл в американской системе нотации. Робот умеет играть на клавишном синтезаторе, имитируя движения человеческой руки: перемещая кисть вдоль клавиатуры и нажимая клавиши четырьмя пальцами. Он может играть как с нотных листов, которые он видит видеокамерой, так и из текстового файла, где ноты записаны в американской системе нотации.

Простота управления предыдущими манипуляторами несколько снижает вариативность обучения, оставляя возможность углубления в область распознавания образов и глубокого машинного обучения, что может быть рановато для школьников среднего звена. Зато им можно предложить сменить музыкальный инструмент, допустим, на флейту или гусли.

В третьем проекте манипулятор сконструирован так, чтобы моделировать основные движения человеческой руки со стаканами. Один из способов управления трехзвенным шарнирно-сочлененным манипулятором требует решения обратной задачи кинематики, что вряд ли сможет выполнить каждый школьник [6]. Было принято решение упростить требуемые расчеты, и после долгих размышлений ограничились зоной, где манипулятор может хватать стаканы. Стаканы могут располагаться только около одной вертикальной плоскости, которая находится на известном расстоянии от основания руки. Благодаря этому, сложная математическая задача, связанная с расчетом движения всех суставов руки, была упрощена до решения обычной геометрической задачи: найти углы в двух треугольниках [6].

Для задачи обнаружения прозрачных стаканов сначала рассматривались методы глубокого обучения. Однако, учитывая сложность, длительность обучения и требования к вычислительной мощности, было принято решение использовать традиционные методы компьютерного зрения. Анализ изображений показал, что наличие двойных бликов является характерной особенностью изображений стеклянных цилиндрических объектов. Для обнаружения этих бликов был разработан алгоритм, основанный на применении операторов обнаружения границ необходимых цветов из библиотеки OpenCV. В качестве основных признаков для классификации областей, соответствующих стаканам, были белый цвет пикселей внутри бликов и нахождения рядом двух характерных областей белого цвета [6].

Сложная задача точного распознавания прозрачных объектов и манипулирования стаканами была успешно решена. Разработанный манипулятор продемонстрировал высокую точность и надежность при выполнении поставленных задач, включая определение уровня наполнения стаканов и переливание жидкости. Школьники научились свободно писать на языке Java и составлять собственные алгоритмы на базе функций OpenCV. Школьники завоевали множество наград, в том числе стали финалистами международного конкурса ROST-ISEF-2019 [6].

К сожалению, в связи с характерным материальным оснащением реализация третьего проекта в школе определяет низкую динамичность и хрупкость разработанных трехзвенных шарнирно-сочлененных манипуляторов. Проект был бы идеален для студентов технических специальностей, которые помимо классического решения обратной задачи кинематики могут исследовать

и другие методы управления трехзвенным манипулятором, такие как методы численного приближения, глубокое обучение, обучение с подкреплением и пр.

В четвертом проекте авторы предложили школьнику разработать быстрый и точный дельта-робот, сортирующий по цвету объекты, поступающие по конвейерной ленте.

Дельта-робот состоит из трех рычагов, соединенных с основанием при помощи шарнирных соединений. Каждый рычаг представляет собой параллелограмм, что обеспечивает постоянную ориентацию исполнительного механизма. Верхние точки рычагов соединены с платформой, на которой закреплен исполнительный орган робота. Такая конструкция позволяет роботу достигать высокой скорости и точности перемещения в ограниченном рабочем пространстве [7]. В процессе сборки робота школьник изучил особенности параллельных манипуляторов и управления ими.

В пятом проекте автор предложил школьнику разработать многофункциональный дельта-робот, способный выполнять задачи сортировки разбросанных на площадке объектов по цвету с помощью видеокамеры, а также записывать и воспроизводить сложные траектории движения. Школьник научился использовать в программе списки и словари.

Компьютерное зрение открывает новые возможности для применения дельта-роботов в различных отраслях промышленности. Благодаря этой технологии роботы становятся более интеллектуальными и универсальными, способными решать широкий круг задач:

– Дельта-роботы с компьютерным зрением могут с легкостью переключаться между различными типами деталей, определяя их положение и ориентацию в пространстве в режиме реального времени. Это значительно повышает гибкость производственных линий.

– Компьютерное зрение позволяет роботу проводить визуальный контроль качества деталей на лету, отбраковывая бракованные изделия и обеспечивая высокую степень однородности продукции.

– Если конвейерная лента остановилась или изменилось расположение деталей, робот с компьютерным зрением может самостоятельно скорректировать свою траекторию и продолжить работу, минимизируя простои.

– Работа с неструктурированной средой: Компьютерное зрение позволяет роботу работать в условиях неопределенности, например, с хаотично разбросанными деталями. Алгоритмы компьютерного зрения

помогают роботу находить и захватывать нужные объекты даже в сложных условиях.

– Благодаря компьютерному зрению дельта-робот может безопасно взаимодействовать с человеком, распознавая его движения и избегая столкновений. Это открывает новые возможности для совместной работы человека и робота.

Алгоритмы распознавания объектов были разработаны на языке Java с использованием открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV 2.4.11, предоставляющей набор инструментов для обработки изображений и видео.

Для точного позиционирования эффектора манипулятора над обнаруженным кубиком необходимо решить обратную задачу кинематики – определить требуемые углы трех сервоприводов. Хотя в сети доступны готовые решения для дельта-манипуляторов, основанные на стереометрии и планиметрии, они могут быть сложны для понимания школьниками среднего звена [7]. Для них авторы предлагают упрощенный дискретный метод расчета углов. Этот метод позволяет табличным (алгоритмическим) способом определить необходимые значения, не требуя глубоких математических знаний, и сосредоточиться на реализации проекта.

Поскольку рабочая зона дельта-робота довольно ограничена и кубики имеют довольно крупный размер, предположено, что манипулятор может захватить кубики из 48 положений внутри прямоугольной рабочей зоны. Вручную выставляя манипулятор в углах, в середине ребер и в центре прямоугольника, записываем углы трех сервоприводов для этих девяти положений. Далее, экспериментально выбрав круговую зависимость для интерполяции остальных углов, соответствующих 48 координатам, составляем словарь <координата, массив из трех углов> (или таблицу) из 48 элементов для алгоритма управления сервоприводами манипулятора.

Дополнительно школьником на языке Scratch в MIT App Inventor был успешно разработан дистанционный пульт на смартфоне Android, который расширяет возможности дельта-робота.

Функциональные возможности разработанного школьником дельта-робота:

– Автоматическая сортировка роботом предметов с помощью видеокамеры (робот автоматически определяет местонахождение цветных кубиков и перетаскивает их в соответствующие цвету кубика контейнеры).

– Дистанционное управление манипулятором через Bluetooth с пульта, реализованного в смартфоне Android.



– Функция ручного программирования перемещений исполнительного механизма с дистанционного пульта (робот может в ускоренном темпе повторять перемещения, совершенные человеком, например, для автономной работы в производстве.

– Для этого школьника сначала учили работать в визуальной среде Scratch, потом в MIT App Inventor, разрабатывать программу для удаленного управления контроллером EV3.

### Результаты исследования и их обсуждение

Приведено краткое сравнение роботов-манипуляторов с точки зрения обучения:

– Декартов манипулятор был выбран для начального обучения механике и программированию, так как его конструкция очевидна, а управление интуитивно понятно.

– Двухзвенный шарнирно-сочлененный манипулятор позволил немного усложнить алгоритмы управления. Такие манипуляторы тоже нетрудно собрать на школьных наборах робототехники.

– Трехзвенный шарнирный манипулятор имеет очень широкую сферу применения, но требует освоения более сложных математических расчетов и алгоритмов управления, и труднее разработать качественный прототип.

– Дельта-робот обеспечивает высокую скорость и точность движений, лучше всех подходит для обучения и проведения экспериментов с его участием среди школьников с 6 по 11 класс. Дальнейшие исследования могут быть направлены на создание более сложных алгоритмов управления, на применение машинного обучения, как для распознавания образов, так и для непосредственного управления манипулятором.

Функция программирования с пульта дистанционного управления перемещений дельта-робота оказалась даже эффективнее, чем казалась перед началом разработки.

Все рассмотренные проекты были разработаны с использованием языка Java, но их легко можно переделать на другие языки, прежде всего на Python.

Немаловажно, что школьник убедился в своей полной способности разработать в будущем собственный коммерческий дельта-робот.

### Заключение

Данное исследование впервые представило детальное сравнение различных типов манипуляторов для образовательных целей, с особым акцентом на дельта-роботах. Дельта-робот быстрее и точнее, проще и дешевле в изготовлении, чем шарнирно-

сочлененный трехзвенный манипулятор. Дельта-робот лучше всех манипуляторов подходит для школьников и по уровню математических задач, требуемых для управления им.

Выполнение планов по внедрению робототехники в образовательный процесс согласно ФГОС может сталкиваться с ограничениями материального обеспечения, и для решения проблемы данная статья предлагает разработку дельта-робота с компьютерным зрением как модуль образовательной программы. Предлагаемый модуль является инновационным и бюджетным решением для большинства школ. Он позволяет эффективно внедрить робототехнику в учебный процесс. Модуль может быть реализован и на любых уже имеющихся в школе манипуляторах при условии добавления компьютерного зрения.

Разработка роботов-манипуляторов не только способствует развитию технических навыков обучающихся, но и формирует у них системное мышление, креативность и умение работать в команде. Использование компьютерного зрения, машинного обучения и других современных технологий делает манипуляторы гибкими и адаптивными, способными решать широкий круг задач.

### Список литературы

1. Самылкина Н.Н., Босова Л.Л., Босова А.Ю., Салахова А.А., Павлов Д.И., Шилтова О. Актуальные вопросы методики обучения информатике в условиях цифровой трансформации образования. М.: МПГУ, 2024. 296 с. DOI: 10.31862/9785426313422.
2. Четина В.В. Особенности внедрения робототехники в образовательный процесс // Наука и перспективы. 2017. № 2. С. 80–89. URL: <https://nip.esrae.ru/ru/14> (дата обращения: 23.10.2024).
3. Игнатъева Э.А. Интеграция искусственного интеллекта в образовательные проекты по робототехнике // Ярославский педагогический вестник. 2024. № 5 (140). С. 93–101. DOI: 10.20323/1813-145X-2024-5-140-93.
4. Четина В.В. Образовательная робототехника: опыт, проблемы, перспективы // Наука и перспективы. 2019. № 1. С. 44–49. URL: <https://nip.esrae.ru/ru/21> (дата обращения: 23.10.2024).
5. Бахман В.А., Королева А.Н., Царегородцев Е.Л. Обзор видов и анализ современного состояния рынка промышленных роботов-манипуляторов // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 2 (128). URL: <https://research-journal.org/archive/2-128-2023-february> (дата обращения: 23.10.2024). DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.26.
6. Лыткин С.Д., Лыткин Ф.С. Из опыта применения компьютерного зрения и манипулятора в проектной деятельности школьника по робототехнике // Современные проблемы науки и образования. 2021. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31256> (дата обращения: 23.10.2024). DOI: 10.17513/spno.31256.
7. Кузнецов Е.А., Ульянов С.В. Разработка интеллектуальной системы управления многозвенным роботом-манипулятором // Системный анализ в науке и образовании. 2022. № 3. С. 161–179. URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/issue/view/67> (дата обращения: 18.10.2024).



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В MICROSOFT EXCEL И LIBREOFFICE CALC

Пепельшев Д.И., Воробьев Д.А.

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: dmitry.pepelyshev@urfu.ru*

Важность корреляционного анализа трудно переоценить. Он лежит в основе многих исследовательских работ, бизнес-аналитики и прогнозирования. Понимание взаимосвязей между переменными позволяет делать обоснованные выводы о влиянии одного фактора на другой, прогнозировать будущие значения и принимать эффективные решения. Данная работа посвящена сравнительному анализу реализации корреляционного анализа в двух популярных электронных процессорах: Microsoft Excel и LibreOffice Calc. Цель исследования – выявить сходства и различия в методах и результатах расчета корреляционных коэффициентов в обоих приложениях, сравнить точность встроенных методов, а также оценить удобство использования интерфейсов для выполнения анализа. В ходе исследования рассматривается самый популярный тип корреляционного коэффициента, коэффициент корреляции Пирсона, который может быть рассчитан с помощью встроенных функций в обеих программах. В качестве набора данных использовались исторические данные о погоде в Екатеринбурге за декабрь 2024 г. Результаты помогут пользователям выбрать наиболее подходящий инструмент для своих аналитических задач. В заключение кратко описываются преимущества и недостатки каждой из программ, а также даются рекомендации по выбору оптимальной программы.

**Ключевые слова:** Microsoft Excel, LibreOffice Calc, корреляционный анализ, анализ, аналитика

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF CORRELATION ANALYSIS IN MICROSOFT EXCEL AND LIBREOFFICE CALC

Pepelyshev D.I., Vorobev D.A.

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, e-mail: dmitry.pepelyshev@urfu.ru*

The importance of correlation analysis is difficult to overestimate. It underlies many research works, business analytics and forecasting. Understanding the relationships between variables allows you to make informed conclusions about the influence of one factor on another, predict future values and make effective decisions. This work is devoted to a comparative analysis of the implementation of correlation analysis in two popular electronic processors: Microsoft Excel and LibreOffice Calc. The purpose of the study is to identify similarities and differences in the methods and results of calculating correlation coefficients in both applications, compare the accuracy of the built-in methods, and evaluate the ease of use of interfaces for performing analysis. The study examines the most popular type of correlation coefficient, the Pearson correlation coefficient, which can be calculated using built-in functions in both programs. Historical weather data for the city of Yekaterinburg for December 2024 was used as a data set. The results will help users choose the most suitable tool for their analytical tasks. The conclusion briefly describes the advantages and disadvantages of each program and provides recommendations for choosing the optimal program.

**Keywords:** Microsoft Excel, LibreOffice Calc, correlation analysis, comparative analysis, analytics

### Введение

С ростом объемов данных, которые генерируются в различных сферах нашей жизни – от социальных сетей и Интернета вещей до промышленных приложений и научных исследований – становится критически важным использовать современные инструменты и технологии, способные эффективно обрабатывать и анализировать большие массивы информации [1, с. 44].

Проведение сравнительного анализа реализации корреляционного анализа в Libre Office Calc и Microsoft Excel становится актуальной задачей, поскольку выбор программного обеспечения может существенно повлиять на результаты исследования и работу пользователя.

Корреляционный анализ – это статистический метод, который используется для оценки и измерения степени взаимосвязи между двумя или более переменными. Он позволяет определить, насколько изменение одной переменной связано с изменением другой [2, с. 75].

Данный инструмент помогает выявить наличие и направление связи между переменными: положительная корреляция означает, что с увеличением одной переменной другая также увеличивается, в то время как отрицательная корреляция указывает на то, что увеличение одной переменной связано с уменьшением другой. Он часто применяется в различных областях, таких как экономика, психология,

социология и медицина, для выявления закономерностей и построения прогнозов [3, с. 100].

Основным показателем, используемым в корреляционном анализе, является коэффициент корреляции Пирсона (\*), который варьируется в диапазоне от -1 до +1. Коэффициент +1 указывает на идеальную положительную корреляцию, -1 – на идеальную отрицательную корреляцию, а 0 говорит о том, что между переменными нет линейной зависимости [4].

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (*)$$

**Цель исследования** – выявить сходства и различия в методах и результатах расчета корреляционных коэффициентов в обоих приложениях, сравнить точность встроенных методов, а также оценить удобство использования интерфейсов для выполнения анализа.

*Набор данных*

В качестве набора данных для сравнения использовался архив погоды в Екатеринбурге за промежуток с 3 по 9 декабря 2024 г. Данные были взяты с открытого источника – сайта метеоностей hmn.ru. Пример данных для анализа представлен в таблице.

Пример данных для анализа

Дата	Время	Температура, °C	Относительная влажность воздуха	Дата	Время	Температура, °C	Относительная влажность воздуха
03.12.24	02:00	-1	81	06.12.24	02:00	-5	70
	05:00	0	80		05:00	-6	71
	08:00	-1	84		08:00	-7	78
	11:00	0	83		11:00	-8	77
	14:00	0	82		14:00	-6	70
	17:00	0	83		17:00	-9	82
	20:00	0	84		20:00	-9	83
	23:00	0	86	23:00	-9	83	
04.12.24	02:00	-1	89	07.12.24	02:00	-9	83
	05:00	-2	88		05:00	-10	84
	08:00	-3	89		08:00	-10	83
	11:00	-3	89		11:00	-10	79
	14:00	-3	85		14:00	-9	67
	17:00	-3	89		17:00	-11	74
	20:00	-2	90		20:00	-12	80
	23:00	-3	88	23:00	-13	78	
05.12.24	02:00	-3	86	08.12.24	02:00	-13	80
	05:00	-3	85		05:00	-13	77
	08:00	-4	82		08:00	-13	77
	11:00	-3	83		11:00	-13	72
	14:00	-4	68		14:00	-12	69
	17:00	-4	74		17:00	-15	77
	20:00	-4	73		20:00	-15	82
	23:00	-4	71	23:00	-14	81	
09.12.24	02:00	-12	79	09.12.24	14:00	-6	42
	05:00	-10	70		17:00	-6	44
	08:00	-8	51		20:00	-6	66
	11:00	-7	53		23:00	-7	74

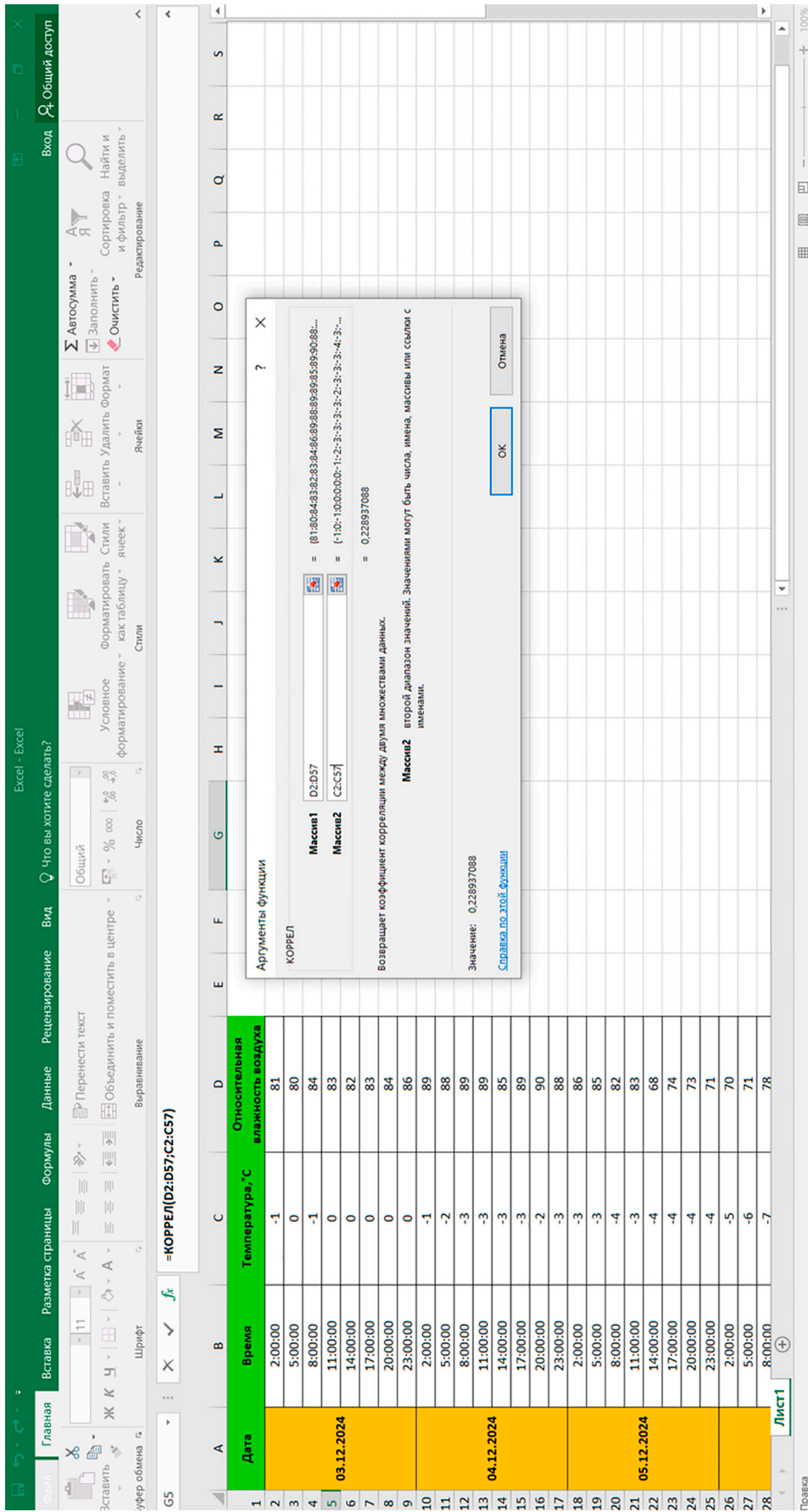


Рис. 1. Расчет коэффициента корреляции с помощью функции «КОРРЕЛ» в программе Microsoft Excel

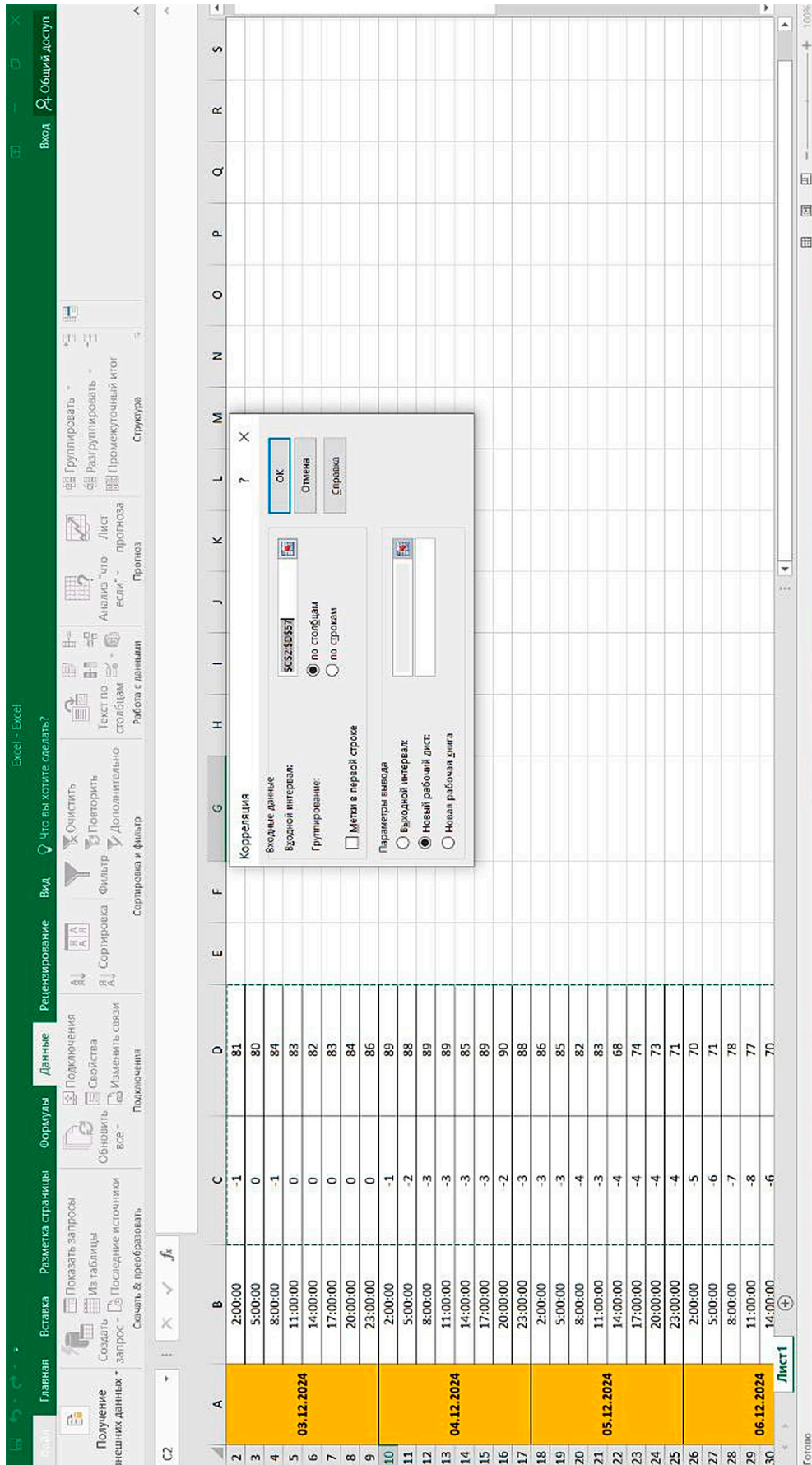


Рис. 2. Расчет коэффициента корреляции с помощью инструментов анализа в программе Microsoft Excel



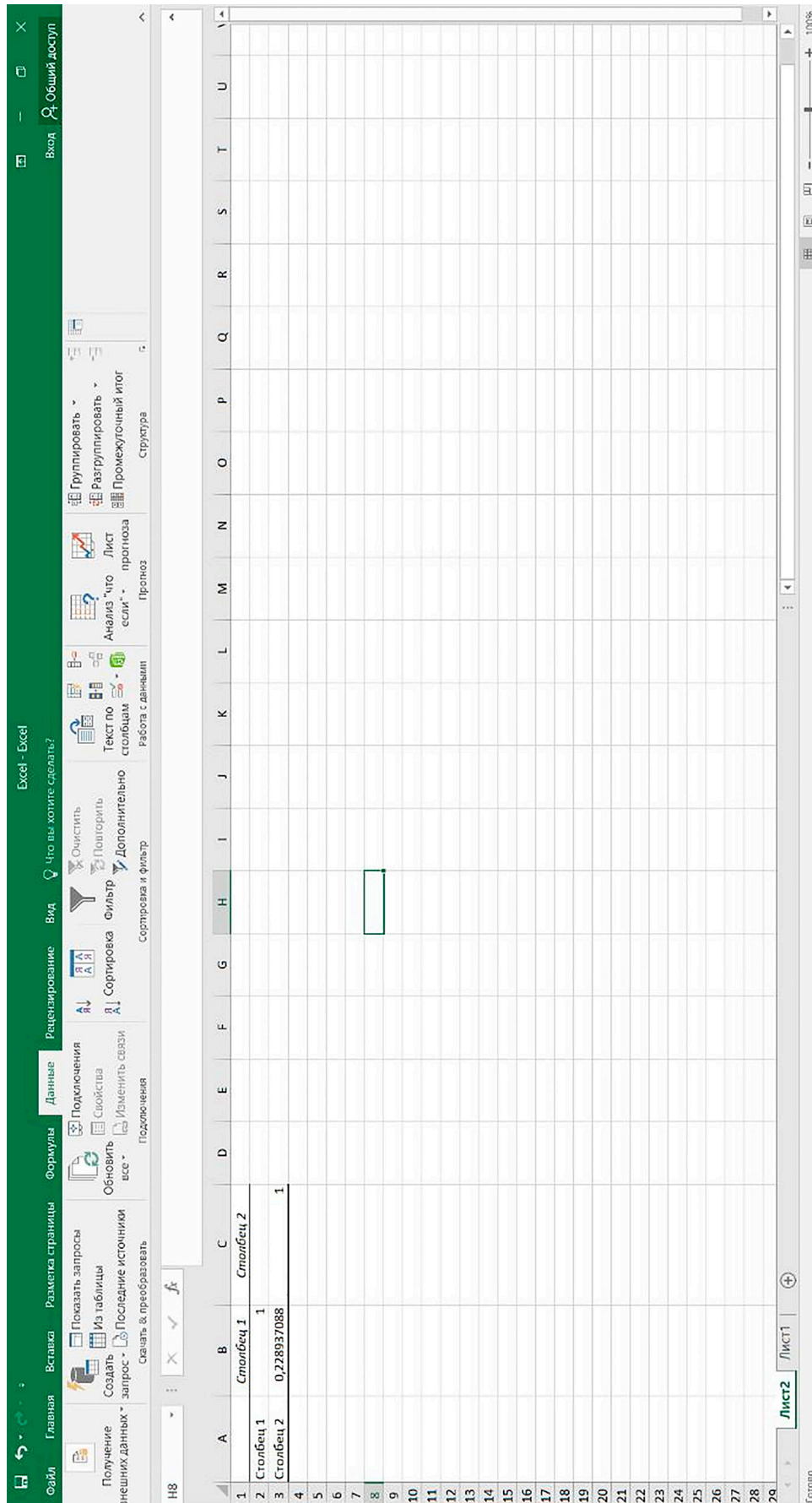


Рис. 3. Результат расчета в программе Microsoft Excel

LibreOffice Calc - LibreOffice Calc

Файл Правка Вид Вставка Формат Стили Лист Данные Сервис Окно Справка

Дата	Время	Температура, °C	Относительная влажность воздуха
	02:00:00	-1	81
	05:00:00	0	80
	08:00:00	-1	84
05.12.2024	11:00:00	0	83
	14:00:00	0	82
	17:00:00	0	83
	20:00:00	0	84
	23:00:00	0	86
	02:00:00	-1	89
	05:00:00	-2	88
	08:00:00	-3	89
04.12.2024	11:00:00	-3	89
	14:00:00	-3	85
	17:00:00	-3	89
	20:00:00	-2	90
	23:00:00	-3	88
	02:00:00	-3	86
	05:00:00	-3	85
	08:00:00	-4	82
05.12.2024	11:00:00	-3	83
	14:00:00	-4	68
	17:00:00	-4	74
	20:00:00	-4	73
	23:00:00	-4	71
	02:00:00	-5	70
	05:00:00	-6	71

Корреляция

Данные

Входной диапазон: \$Лист1.\$C\$2:\$D\$57

Результат в: \$F\$12

Группировать по  Столбцам  Строкам

Справка

OK Отменить

Рис. 4. Расчет коэффициента корреляции в программе Libreoffice Calc

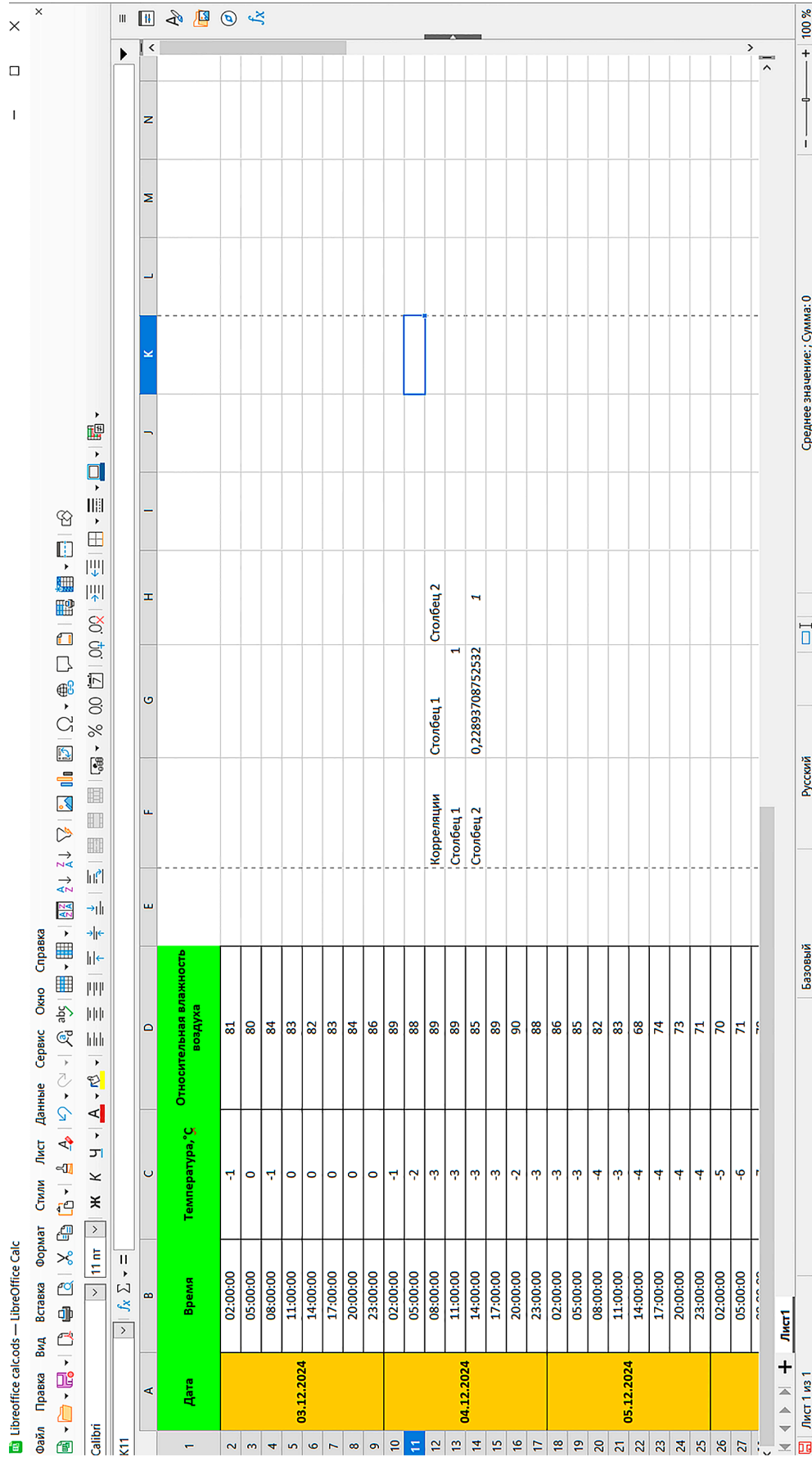


Рис. 5. Результат расчета в программе Libreoffice Calc

Для выявления взаимосвязи между анализируемыми данными были выбраны два самых значимых показателя – среднесуточная температура и относительная влажность воздуха.

#### *Реализация в Microsoft Excel*

Одним из способов, с помощью которого можно провести корреляционный анализ в Microsoft Excel, является использование функции «КОРРЕЛ». Для использования данной возможности необходимо открыть мастер функций и выбрать эту функцию. В качестве аргументов она принимает два массива данных, для которых будет определяться коэффициент корреляции [5, с. 38].

При использовании тестового набора данных результат получился примерно 0,22, что можно трактовать как слабая прямая зависимость. На рис. 1 представлен скриншот с результатом.

Кроме того, корреляцию можно вычислить с помощью одного из инструментов, который представлен в пакете анализа. Для этого нужно зайти в анализ данных и выбрать инструмент «корреляция». Далее выбирается нужный диапазон ячеек, который будет сравниваться (рис. 2, 3) [6, с. 129].

Как можно увидеть, на данных рисунках представлен коэффициент корреляции. Естественно, он оказался тот же, что и при использовании первого способа вычисления. Это объясняется тем, что оба варианта выполняют одни и те же вычисления, однако произвести их можно разными способами, что однозначно, можно отнести к плюсам программы Microsoft Excel, так как каждый исследователь сможет выбрать наиболее удобный для себя способ вычисления коэффициента корреляции.

#### *Реализация в Libreoffice Calc*

Для того, чтобы выполнить корреляцию в Libreoffice Calc, необходимо зайти в раздел «Данные» и выбрать из предложенного списка формул корреляцию. После этого нужно указать массив данных, влияние друг на друга которых будет рассматриваться. На рис. 4 представлен пример интерфейса для расчета коэффициента корреляции в программе Libreoffice Calc [7, с. 39].

Результат выполнения вставляется в выбранной ячейке таблицы, при этом выполняется вставка мини-таблицы, состоящей из нескольких столбцов и строк. Пример результата расчета коэффициента корреляции представлен на рис. 5.

Результат коэффициента корреляции оказался таким же, как и в Excel, с точностью до 9 знака, что является довольно высоким показателем. Из недостатков Libreoffice Calc можно отметить, что вставка результата осуществляется в ячейку в формате мини-таблицы, состоящей из нескольких столбцов и строк. Это плохо, так как новые данные могут заменить значения в существующих ячейках.

#### **Заключение**

Таким образом, сравнительный анализ реализации корреляционного анализа в Microsoft Excel и LibreOffice Calc выявил как сходства, так и различия в результатах расчета коэффициента корреляции Пирсона. Обе программы предоставляют функциональность для выполнения такого анализа, но незначительные различия в обработке данных могут приводить к небольшим отклонениям в полученных результатах.

Microsoft Excel, обладая более широким функционалом и возможностями, может быть предпочтительнее для сложных исследовательских задач, требующих, например, дополнительных визуализаций или углубленного статистического анализа.

LibreOffice Calc, являясь бесплатным и кроссплатформенным решением, остается удобной альтернативой для решения задач, не требующих высокой степени точности и детализации.

#### **Список литературы**

1. Гордиенко Е.П., Паненко Н.С. Современные технологии обработки и анализа больших данных в научных исследованиях // Актуальные проблемы железнодорожного транспорта. 2018. С. 44–48.
2. Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа // Медицинский альманах. 2021. № 3 (68). С. 70–79.
3. Шишлянникова Л.М. Применение корреляционного анализа в психологии // Психологическая наука и образование. 2009. Т. 14, № 1. С. 98–107.
4. Кизянов А.О. Корреляция Пирсона на языке программирования Python // Постулат. 2018. № 8 (34). С. 14.
5. Слесарева Е.А. Корреляционный анализ как один из методов обработки результатов психологического исследования // Международный журнал психологии и педагогики в служебной деятельности. 2016. № 4. С. 38–40.
6. Береснева И.В. Применение методов корреляционного анализа в Microsoft Excel для выявления зависимостей между выборками значений двух случайных величин // Синтез науки и образования как инструмент решения глобальных проблем современности. 2023. С. 129–132.
7. Красников В.Л. Применение пакета LibreOffice для обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов // Учебная физика. 2015. № 1. С. 39–40.