

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Наукоемкие технологии в приboro - и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе

Региональная научно - техническая конференция

(Калуга, 15 – 17 апреля 2025 года)

Материалы конференции

В двух томах

Том 1



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2026

УДК 378:001.891
ББК 74.48:72
H34

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8564/>

Руководители оргкомитета конференции:

С.А. Кусачева (руководитель СНТО КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана,
председатель совета по НИР студентов
и аспирантов, канд. биол. наук, доцент),
Ю.Н. Лавренков (ф-т ИУК, канд. техн. наук, доцент),
И.Н. Зыбин (ф-т МК, канд. техн. наук, доцент)

Руководители секций:

<i>Андреев В.В.</i> , д-р техн. наук, профессор	<i>Пономарев А.И.</i> , канд. техн. наук, доцент
<i>Шаталов В.К.</i> , д-р техн. наук, профессор	<i>Витчук П.В.</i> , канд. техн. наук, доцент
<i>Перерва О.Л.</i> , д-р экон. наук, профессор	<i>Чухраев И.В.</i> , канд. техн. наук, доцент
<i>Мазин А.В.</i> , д-р техн. наук, доцент	<i>Сулина О.В.</i> , канд. техн. наук, доцент
<i>Рамазанов А.К.</i> , канд. физ.-мат. наук, доцент	<i>Труханов К.Ю.</i> , канд. техн. наук, доцент
<i>Шафигуллина Т.В.</i> , канд. ист. наук, доцент	<i>Пашенко В.Н.</i> , канд. техн. наук, доцент
<i>Анфилов К.Л.</i> , канд. хим. наук, доцент	<i>Жинов А.А.</i> , канд. техн. наук, доцент
<i>Малышев Е.Н.</i> , канд. техн. наук, доцент	<i>Кусачева С.А.</i> , канд. биол. наук, доцент
<i>Мельников Д.В.</i> , канд. техн. наук, доцент	<i>Белова Е.В.</i> , канд. филол. наук, доцент
<i>Гагарин Ю.Е.</i> , канд. физ.-мат. наук, доцент	

Секретарь конференции: В.В. Лебедев

Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : региональная научно-техническая конференция (Калуга, 15–17 апреля 2025 года) : материалы конференции : в 2 т. / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» . — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026.

ISBN 978-5-7038-6701-3

Т. 1. — 395, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6706-8

Материалы региональной научно-технической конференции, представленные в данном издании, обобщают результаты усилий ученых разных направлений науки, накопленные в течение ряда лет. Это позволяет объединить достижения различных научных школ, предложить инновационные подходы и решения актуальных проблем современной науки и техники. Научные работы включают фундаментальные разработки, а также практические приложения новых методов и технологий, нашедших свое применение в создании современных конструкций и материалов.

В первый том вошли материалы секций 1–6, 8, 12.

УДК 378:001.891
ББК 74.48:72

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-7038-6706-8 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-6701-3

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Секция 1. Прогрессивные технологии, оборудование и инструментальные системы

УДК 621.9.02

Сравнение методов фрезерования открытых пазов

Сысоев Григорий Алексеевич

grishasysoev@gmail.com

Мусохранов Марсель Владимирович

marsel@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Приведен анализ различных стратегий фрезерования открытых пазов. Рассмотрены такие подходы, как параллельное фрезерование, радиальное фрезерование, спиральная обработка и другие методы. Для каждой стратегии указаны ключевые параметры, включая точность обработки, шероховатости поверхности, производительность. На основе проведенных исследований сделаны выводы о преимуществах и ограничениях. Предложены рекомендации по их применению в различных производственных условиях для достижения максимальной эффективности и качества.

Ключевые слова: стратегии фрезерования, производственные условия, материал инструмента, эффективность фрезерования, нагрузка на инструмент

Точность фрезерования открытых пазов является одним из важнейших показателей качества обработки корпусных деталей машин, так как она напрямую влияет на надежность установки сопряженных деталей и стабильность работы узлов. Недостаточная точность геометрии паза может привести к увеличению зазоров, снижению прочности соединений и ускоренному износу компонентов.

Согласно стандартам, таким как ГОСТ 18017–81, отклонение геометрии паза определяется как разница между фактическими размерами и заданными параметрами. Эти отклонения могут касаться ширины, глубины или расположения паза [1]. Эффективность обработки открытых пазов зависит от выбранной стратегии фрезерования, параметров резания и используемого инструмента. На практике применяются различные подходы. Последовательная обработка одним инструментом для достижения требуемой геометрии. Комбинированная обработка с использованием инструментов разного диаметра (например, твердосплавных фрез диаметром 10 мм и быстрорежущих фрез диаметром 6 мм), что позволяет повысить точность и сократить время обработки.

Точность также зависит от жесткости станка, настройки инструмента и параметров резания (скорость, подача, глубина). Для минимизации погрешностей необходимо учитывать взаимное влияние этих факторов и оптимизировать технологический процесс. Пазы служат для установки крепежных элементов, направляющих, шпонок и других функциональных деталей. Пазы бывают различные в зависимости от конструкторских требований. Открытые пазы: один из краев паза открыт и выходит на поверхность детали. Закрытые пазы: полностью ограничены стенками внутри детали. Т-образные пазы:

применяются для направляющих элементов, например, в станках. Круглые или радиальные пазы: используются в дисках или шкивах [2]. Процесс установки заготовки играет определяющую роль в получении требуемой точности. Заготовки фиксируют на станке с использованием тисков, магнитных плит или специализированных приспособлений.

Существуют различные стратегии фрезерования. Погружное фрезерование: фреза вводится вертикально в материал, затем обрабатывается вдоль заданной траектории. Профильное фрезерование: обработка ведется вдоль контура паза. Комбинированный метод: последовательная обработка разными инструментами для повышения точности. Основная обработка: выполнение фрезерования по выбранной стратегии. Контроль размеров и качества: измерение ширины, глубины и расположения паза, проверка шероховатости поверхности. Твердосплавные фрезы обеспечивают высокую точность и долговечность, но требуют жесткого оборудования. Оптимальные скорость, подача и глубина резания минимизируют износ инструмента и улучшают качество поверхности. Недостаточная жесткость вызывает вибрации, снижающие точность. Твердость и прочность материала влияют на выбор инструмента и режимов обработки. Современные станки: автоматизация процесса и повышение точности. СОЖ улучшает качество поверхности и увеличивает срок службы инструмента.

Были рассчитаны режимы резания для стали 45 фрезой из ВК8: диаметр фрезы 10 мм; скорость резания (V_c): 300–400 м/мин; подача на зуб (S): 0,02–0,05 мм/зуб; глубина резания: 0,5–0,7 мм. Для фрезы из Р6М5: диаметр фрезы 10 мм; скорость резания: 30–50 м/мин; подача на зуб: 0,01–0,03 мм/зуб; глубина резания: 0,25–0,30 мм [3]. Управляющая программа для обработки открытых пазов была разработана в CAD/CAM-системе PTC CREO. Этот современный инструмент позволяет проектировать детали, рассчитывать траектории движения инструмента, выбирать оптимальные режимы резания и оценивать время обработки. Использование модуля CAM обеспечило высокую точность и эффективность процесса. Точность фрезерования открытых пазов является ключевым параметром качества обработки корпусных деталей, влияющим на надежность и долговечность узлов. Для достижения высокой точности необходимо учитывать стратегию фрезерования (последовательная или комбинированная), параметры резания (скорость, подача, глубина), жесткость оборудования и свойства материала заготовки [4].

Современные ЧПУ-станки и CAD/CAM-системы позволяют автоматизировать процесс, оптимизировать режимы обработки и минимизировать погрешности. Использование твердосплавных фрез (ВК8) для твердых материалов и быстрорежущих (Р6М5) для менее твердых, а также применение СОЖ, способствует повышению качества поверхности и увеличению срока службы инструмента [5]. Оптимизация всех факторов обеспечивает высокую точность, снижение износа и повышение производительности.

Литература

- [1] Половинкин А.И. *Основы инженерного творчества*. Санкт-Петербург, Лань, 2016, 364 с.
- [2] Воробьев В.В. *Технология машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2020, 512 с.
- [3] Романов Б.Л. *Режимы резания при обработке металлов резанием: справочник*. Москва, Машиностроение, 2019, 320 с.
- [4] Карпов А.С. *Современные технологии обработки металлов резанием*. Санкт-Петербург, Питер, 2021, 384 с.
- [5] Ильин А.И. *Инструментальные материалы: справочник*. Москва, Машиностроение, 2018, 400 с.

Comparison of open slot milling methods

Sysoev Grigory Alekseevich grishasysoev@gmail.com

Musokhranov Marsel Vladimirovich marsel@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article analyzes various strategies for milling open slots, their features, and applications in modern manufacturing processes. Approaches such as parallel milling, radial milling, spiral machining, and other methods are considered. For each strategy, key parameters are outlined, including machining accuracy, surface roughness, tool load, and productivity. Particular attention is paid to the selection of the optimal method depending on the type of material, slot geometry, and quality requirements. Based on the conducted research, conclusions are drawn about the advantages and limitations of each strategy, and recommendations are provided for their application in various production conditions to achieve maximum efficiency and quality.

Keywords: milling strategies, production conditions, tool material, milling efficiency, tool load

УДК 621.9

Обработка соосных отверстий в корпусных деталях машин

Макарчук Александр Сергеевич makarchukas@student.bmstu.ru

Зенкин Николай Васильевич zenkin-nv@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы обработки соосных отверстий в корпусных деталях машин. Освещены основные этапы обработки, включая сверление, растачивание, зенкерование и развертывание. Подробно рассмотрены методы достижения соосности отверстий на станках с ЧПУ, а также способы контроля соосности. Приведены рекомендации по наиболее эффективным методам обработки с акцентом на растачивание и развертывание, которые обеспечивают высокую точность и качество поверхности. Подчеркнута важность соосности для обеспечения точности сборки и долговечности механизмов. Приведены выводы о наиболее точном методе получения соосности.

Ключевые слова: соосность отверстий, обработка отверстий, растачивание, станки с ЧПУ, контроль соосности

Соосность отверстий в корпусных деталях машин является важным параметром качества, влияющим на точность сборки и пространственное положение деталей и узлов. Отклонения от соосности затрудняют сборку и увеличивают износ деталей. В соответствии с ГОСТ 24642–81, отклонение от соосности определяется как расстояние между осью проверяемого отверстия и общей осью [1]. Общая ось может быть определена как прямая, проходящая через центры крайних отверстий, или как ось воображаемого цилиндра, в который вписаны оси всех измеренных отверстий [2].

Обработка соосных отверстий включает несколько этапов: сверление, растачивание, зенкерование и развертывание. Каждый из этих этапов имеет свои особенности и применяется в зависимости от требований к точности и шероховатости поверхности. Например, сверление является начальным этапом обработки, но оно не обеспечивает высокой точности, поэтому после него часто применяются дополнительные операции, такие как зенкерование и растачивание. Развертывание, в свою очередь, является финишной операцией, которая позволяет достичь высокой точности и низкой шероховатости поверхности. Особую сложность представляет обработка соосных отверстий в корпусных деталях с несколькими стенками, где отверстия расположены на значительном расстоянии друг от друга. В таких случаях важно учитывать возможные погрешности, возникающие при обработке на станках с ЧПУ [3].

Сверление — основной процесс получения отверстий в заготовке. Сверление обеспечивает 11–12-й квалитеты точности, но полученные отверстия могут иметь овальную форму в поперечном сечении и конусность в продольном. Для повышения точности сверления используются специальные направ-

ляющие втулки и кондукторы, которые помогают минимизировать отклонения от оси.

Зенкерование применяется для улучшения геометрической формы отверстий, повышения точности и снижения шероховатости. Зенкерование обеспечивает точность в пределах 10–11-го квалитета. Этот этап особенно важен для подготовки отверстий к финишной обработке, такой как растачивание или развертывание. Зенкерование может выполняться как на универсальных станках, так и на станках с ЧПУ, что позволяет достичь высокой точности при обработке сложных деталей.

Растачивание выполняется резцами различных конструкций и позволяет достичь высокой точности обработки. Для повышения производительности используются многоглазвийные расточные головки. Этот метод особенно эффективен при обработке отверстий большого диаметра и в случаях, когда требуется высокая точность соосности. На станках с ЧПУ растачивание может выполняться с использованием программного обеспечения, которое автоматически корректирует положение инструмента для достижения максимальной точности.

Развертывание — это финишная операция, которая выполняется после сверления, зенкерования или растачивания. Развертывание обеспечивает точность обработки по 6–7-му квалитетам. Развертывание особенно важно для отверстий, которые будут использоваться в точных механизмах, где требуется высокая точность и минимальные отклонения от соосности [2].

Обработка соосных отверстий борштангой осуществляется осевой подачей стола с деталью или шпинделем. Этот метод позволяет обрабатывать отверстия большого диаметра с высокой точностью. Основные этапы обработки включают черновое растачивание, получистовую и чистовую обработку. Для достижения высокой точности используются направляющие втулки и контрольные оправки [2].

На горизонтально-расточных станках с ЧПУ важно учитывать погрешности, возникающие при повороте стола на 180°. Основные источники погрешностей включают неперпендикулярность оси поворота стола к направлению подачи, неточность поворота стола и несовпадение расчетной координаты с осью поворота. Для минимизации погрешностей рекомендуется производить растачивание при постоянном вылете шпинделя [3].

Контроль соосности отверстий осуществляется с помощью индикаторных приспособлений, контрольных валов и втулок. Соосность трех и более отверстий проверяют с помощью ступенчатого контрольного вала. Для измерения расстояния между осями отверстий используются микрометрические штихмассы и контрольные валики. Перекос осей отверстий измеряют с помощью уровня и угольников.

Контроль соосности отверстий:

1) индикаторные приспособления: для контроля соосности отверстий используются индикаторные приспособления, которые позволяют измерять отклонения от оси с высокой точностью;

2) контрольные валы и втулки: соосность трех и более отверстий проверяют с помощью ступенчатого контрольного вала. Для измерения расстояния между осями отверстий используются микрометрические штихмассы и контрольные валики;

3) измерение перекоса осей: перекос осей отверстий измеряют с помощью уровня и угольников. Это особенно важно для деталей, где требуется высокая точность сборки [4].

Соосность отверстий в корпусных деталях машин является ключевым параметром качества, влияющим на точность сборки и положение деталей и узлов. В статье рассмотрены основные методы обработки соосных отверстий, включая сверление, растачивание, зенкерование и развертывание. Особое внимание уделено методам достижения соосности на станках с ЧПУ и способам контроля соосности. Наиболее эффективными методами обработки являются растачивание и развертывание, которые обеспечивают высокую точность и качество поверхности.

Литература

- [1] ГОСТ 24642–81. *Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения*. Москва Изд-во стандартов, 1981, 45 с.
- [2] *Обработка соосных отверстий*. URL: <https://www.stanotex.ru/obrabotka-soosnyh-otverstij/> (дата обращения 11.07.2025).
- [3] *Достижение соосности отверстий на ЧПУ станках*. URL: <https://www.metalcutting.ru/content/dostizhenie-soosnosti-otverstiy-na-chpu-stankah> (дата обращения 11.07.2025).
- [4] *Контроль соосных отверстий*. URL: <https://www.stanotex.ru/kontrol-otverstij> (дата обращения 11.07.2025).

Processing of coaxial holes in machine housing parts

Makarchuk Alexander Sergeevich makarchukas@student.bmstu.ru

Zenkin Nikolay Vasilievich zenkin-nv@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses methods for machining coaxial holes in machine body parts. The article covers the main stages of machining, including drilling, boring, countersinking and reaming. The article discusses in detail the methods for achieving hole coaxiality on CNC machines, as well as methods for monitoring coaxiality. The article provides recommendations on the most effective machining methods, with an emphasis on boring and reaming, which ensure high accuracy and surface quality. The importance of coaxiality is emphasized for ensuring assembly accuracy and durability of mechanisms. Conclusions are provided on the most accurate method for obtaining coaxiality.

Keywords: coaxial holes, hole processing, boring, CNC machines, alignment control, reaming, drilling, precision machining

УДК 621.9

Исследование методов обработки глубоких отверстий в машиностроении

Яковлев Максим Денисович

yakovlevmd@student.bmstu.ru

Зенкин Николай Васильевич

zenkin-nv@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлены различные методы обработки глубоких отверстий, их особенности и применение в машиностроении. Рассмотрены различные технологии, включая сплошное и кольцевое сверление, а также вибрационную обработку и иные подходы. Для каждого из методов указаны параметры точности, уровень шероховатости и возможные сферы использования. На основе исследований сделаны выводы о выборе оптимальных способов обработки глубоких отверстий с учетом характеристик материала и требований к качеству выполняемых работ для различных условий производства.

Ключевые слова: глубокие отверстия, методы обработки, особенность обработки, точность обработки, шероховатость поверхности

Обработка глубоких отверстий является одной из наиболее сложных технологических операций в машиностроении. Глубокие отверстия, определяемые как отверстия с глубиной более пяти диаметров, требуют применения специальных инструментов и методов обработки. Такие отверстия широко используются в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, автомобильную и энергетическую. В данной статье рассматриваются основные методы обработки глубоких отверстий, их преимущества и недостатки, а также области применения [1].

Особенность сверления глубоких отверстий заключается в необходимости выбора правильного инструмента и метода, которые позволяют эффективно выполнять процесс обработки материала и обеспечить требуемое качество обработки. В зависимости от глубины отверстия, материала заготовки, точности, а также технологических требований можно выбрать канонические или специализированные методы сверления [1].

Канонические методы сверления глубоких отверстий — это классические, широко применяемые и проверенные временем способы обработки, которые используются для создания отверстий с большой глубиной (обычно более 5–10 диаметров сверла). Эти методы разработаны для обеспечения высокой точности, качества поверхности и эффективности при работе с различными материалами. Основные канонические методы включают: сплошное сверление, кольцевое сверление (метод ВТА или STS), сверление с подачей охлаждающей жидкости через инструмент (метод Ejector), глубокое сверление с использованием одно- или двухкромочных сверл, вибрационное сверление [1].

Специализированные методы сверления глубоких отверстий — это более сложные и технологически продвинутые способы обработки, которые используются в случаях, когда стандартные (канонические) методы не могут обеспечить необходимую точность, качество или производительность. Эти методы разработаны для работы с особыми материалами, в условиях повышенных требований к качеству обработки. Они часто требуют специального оборудования, инструментов и технологий [1].

Методы обработки глубоких отверстий каноническими методами:

1) сплошное сверление — это классический метод, при котором весь материал удаляется в виде стружки с использованием стандартных спиральных сверл за один проход. Этот метод применяется для отверстий диаметром до 60–80 мм. Глубина резания равна половине диаметра отверстия. Основным преимуществом является простота и доступность оборудования. Однако метод имеет существенные недостатки, такие как высокая нагрузка на инструмент, необходимость эффективного охлаждения и сложность удаления стружки на больших глубинах [2]:

- шероховатость: $Ra = 1,6\text{--}3,2 \text{ мкм}$;
- область применения: обработка отверстий малого и среднего диаметра в низколегированных сталях и цветных металлах;

2) кольцевое сверление предполагает удаление только части материала, оставляя центральный стержень. Этот метод применяется для отверстий диаметром более 80 мм и позволяет снизить энергозатраты и нагрузку на инструмент. Основное преимущество — экономия материала и снижение усилий на резание. Метод требует специального оборудования и инструментов [3]:

- шероховатость: $Ra = 1,6\text{--}2,5 \text{ мкм}$;
- применяется при обработке отверстий большого диаметра в высокопрочных сталях и титановых сплавах;

3) вибрационное сверление используется для обработки отверстий малого диаметра в вязких материалах. Метод основан на наложении осциллирующего движения на обычное осевое движение подачи, что позволяет улучшить удаление стружки и снизить вибрации. Этот метод особенно эффективен при обработке материалов с низкой теплопроводностью, таких как титан и нержавеющие стали [4]:

- шероховатость: $Ra = 0,8\text{--}1,6 \text{ мкм}$;
- применяется при обработке отверстий малого диаметра в вязких и труднообрабатываемых материалах;

4) сверление с внутренней подачей СОЖ — этот метод предполагает подачу охлаждающей жидкости (СОЖ) через каналы в инструменте, что позволяет эффективно охлаждать зону резания и удалять стружку. Применяется для обработки глубоких отверстий в твердых материалах, таких как высокопрочные стали и сплавы. Основное преимущество — улучшенное охлаждение и снижение износа инструмента:

- шероховатость: $Ra = 0,8\text{--}1,6 \text{ мкм}$;
- область применения: обработка глубоких отверстий в твердых и труднообрабатываемых материалах, в оружейной промышленности;

5) сверление с нулевым стержнем — этот метод является модификацией сплошного сверления, при котором вблизи оси инструмента создается небольшой стержень, предотвращающий смятие материала. Это позволяет снизить нагрузку на инструмент и улучшить качество обработки [5]:

– шероховатость: $R_a = 1,6\text{--}2,5 \text{ мкм}$;

– применяется при обработке отверстий малого и среднего диаметра в высокопрочных сталях.

Анализ методов обработки глубоких отверстий показал, что обработка глубоких отверстий является сложной технологической задачей, требующей применения специализированных методов и инструментов. Наиболее эффективными методами являются кольцевое сверление и сверление с внутренней подачей СОЖ, которые обеспечивают высокую точность и качество поверхности. Выбор метода обработки должен основываться на специфике задачи, характеристиках материала и требованиях к качеству обработки.

Литература

- [1] Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. *Обработка глубоких отверстий в машиностроении: справочник*. Москва, Машиностроение, 2010, с. 6–11.
- [2] Омонов А.А. Сверление глубоких отверстий. *Universum: технические науки*, 2022, № 11 (104). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14553> (дата обращения 20.05.2025).
- [3] Звонцов И.Ф., Серебренецкий П.П., Схиртладзе А.Г. *Технологии сверления глубоких отверстий*. Санкт-Петербург, Лань, 2022, с. 53–61.
- [4] Троицкий Н.Д. *Глубокое сверление*. Москва, Машиностроение, 1981, 176 с.
- [5] Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.И., Плужников С.К. *Обработка глубоких отверстий*. Москва, Машиностроение, 1988, 269 с.

Research on methods for machining deep holes in mechanical engineering

Yakovlev Maxim Denisovich

yakovlevmd@student.bmstu.ru

Zenkin Nikolay Vasilievich

zenkin-nv@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article presents various methods for machining deep holes, their features, and applications in mechanical engineering. Different technologies are considered, including solid drilling, trepanning, vibratory machining, and other approaches. For each method, parameters such as accuracy, surface roughness, and potential areas of application are specified. Based on the research, conclusions are drawn regarding the selection of optimal methods for machining deep holes, taking into account material characteristics and quality requirements for various production conditions.

Keywords: deep holes, machining methods, machining features, machining accuracy, surface roughness

УДК 621.9

Обработка шпоночных пазов

Лыкова Анна Алексеевна

lyukovaaa@student.bmstu.ru

Зенкин Николай Васильевич

zenkin-nv@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы обработки шпоночных пазов, которые являются важным элементом в передаче крутящего момента между валом и установленной на нем деталью. Рассмотрены различные методы фрезерования, строгания и контроля качества шпоночных пазов. Приведены основные типы шпоночных соединений, их особенности и области применения. Особое внимание уделено выбору инструментов и режимов обработки для достижения высокой точности и качества поверхности. Приведены выводы о наиболее эффективных методах обработки в зависимости от типа паза и требований к точности.

Ключевые слова: шпоночные пазы, фрезерование, строгание, точность обработки, шероховатость поверхности

Шпоночные пазы играют ключевую роль в передаче крутящего момента между валом и установленной на нем деталью, такой как шестерня или шкив. Эти пазы обычно имеют прямоугольную или полукруглую форму и предназначены для размещения шпонки, обеспечивающей надежное соединение. Точность и качество исполнения шпоночного паза критически важны для долговечности и эффективности механизма.

Шпоночные соединения делятся на напряженные и ненапряженные. Напряженные соединения используют клиновые и тангенциальные шпонки, которые создают радиальные или тангенциальные силы, обеспечивая передачу крутящего момента и восприятие осевых нагрузок. Однако такие соединения могут вызывать деформацию деталей и дисбаланс, что ограничивает их применение. Ненапряженные соединения используют призматические и сегментные шпонки. Призматические шпонки передают врачающий момент, но не воспринимают осевые нагрузки. Сегментные шпонки удобны в сборке, но ослабляют вал, поэтому применяются при небольших нагрузках.

Фрезерование — один из наиболее распространенных методов обработки шпоночных пазов, позволяющий достичь высокой точности и требуемой шероховатости поверхности. Выбор оборудования, инструмента и режимов обработки зависит от материала детали, размеров паза и требуемой точности.

Актуальность изучения фрезерования шпоночных пазов обусловлена широким распространением данного метода в различных отраслях промышленности, от машиностроения до приборостроения. Понимание принципов процесса, особенностей используемого оборудования и инструментов, а также умение выбирать оптимальные режимы обработки, являются ключевыми компетенциями для инженеров-технологов и специалистов по механической обработке [1].

Пазы под сегментные шпонки изготавливаются фрезерованием с помощью дисковых фрез. Подача осуществляется перпендикулярно оси вала. Диаметр фрезы должен быть равен двойному радиусу канавки. Пазы под призматические шпонки изготавливаются на горизонтально- или вертикально-фрезерных станках. Сквозные и закрытые пазы обрабатываются дисковыми фрезами за 1–2 рабочих хода. Для полуузакрытых пазов используются методы фрезерования за один рабочий ход или маятниковой подачи. Маятниковая подача обеспечивает высокую точность и взаимозаменяемость, но требует больше времени. Тангенциальные пазы фрезеруют дисковыми, концевыми или фасонными фрезами. Клиновые пазы изготавливают в два этапа: сначала делают прямой паз, затем обрабатывают одну из сторон под углом. Для поворота заготовки используют делительные головки или поворотные столы [2, 3].

Качество фрезеровки зависит от состояния фрезы, точности станка, жесткости системы и температурного воздействия. Контроль проводится с помощью угольников, штангенциркулей, микрометров и предельных калибров [4].

Фрезерование шпоночных пазов — важный процесс, обеспечивающий высокую точность и надежность соединений. Правильный выбор оборудования, инструментов и режимов обработки критически важен для качества и долговечности механизмов. Контроль качества играет ключевую роль в обеспечении точности размеров и шероховатости поверхности.

Строгание пазов — это процесс обработки металла резанием, при котором на заготовке формируется углубление заданной формы и размеров с помощью поступательно движущегося инструмента — строгального резца. Этот метод, хотя и менее распространен, чем фрезерование, по-прежнему находит применение в различных отраслях промышленности, особенно при обработке крупногабаритных деталей или деталей сложной формы, где фрезерование затруднительно.

В процессе строгания пазов резец, закрепленный в резцедержателе строгального станка, совершают возвратно-поступательное движение (главное движение резания) вдоль заготовки. Заготовка, закрепленная на столе станка, периодически перемещается в направлении, перпендикулярном движению резца (движение подачи). Таким образом, резец постепенно снимает слой металла за слоем, формируя паз нужной формы и глубины.

Пазы строгают на строгальных станках, используя верхние или боковые суппорты. Для прямоугольных пазов применяют прорезные и подрезные резцы. Закрытые пазы на валах обрабатывают с предварительным сверлением отверстий для ввода резца.

Строгание пазов, несмотря на свою относительную медлительность и меньшую точность по сравнению с фрезерованием, по-прежнему остается востребованным методом обработки, особенно при работе с крупногабаритными деталями [5].

Выбор оптимального метода обработки пазов требует комплексного подхода, учитывающего все вышеуказанные факторы. Развитие технологий

и появление новых методов совершенствование технологических процессов и применение инновационных решений позволяет повысить конкурентоспособность продукции.

Литература

- [1] Кряжев Д.Ю. *Фрезерная обработка на станках с ЧПУ*. Санкт-Петербург, ЗАО «ИРЛЕН-инжиниринг», 2005, 41 с. URL: https://drive.google.com/file/d/0B_XQd1MpK1eNNDZTaVFCV20yVHM/view?resourcekey=0-kf0NsIVzViecnpl1_0U0OQ (дата обращения 11.03.2025).
 - [2] Безъязычный В.Ф., ред. *Справочник фрезеровщика*. Москва, Машиностроение, 2010, 272 с.
 - [3] Аврутин С.В. *Фрезерное дело*. Москва, Изд-во Профтехиздат, 1964, 542 с.
 - [4] Барбашов Ф.А. *Фрезерные работы*. Москва, Высшая школа, 1986, 208 с.
 - [5] Бобров В.Ф., Грановский Г.И. *Развитие науки о резании металлов*. Москва, Машиностроение, 1967, 416 с.

Keyway groove processing

Lykova Anna Alekseevna

lyykovaaa@student.bmstu.ru

Zenkin Nikolay Vasilyevich

zenkin-nv@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses the methods of processing keyways, which are an important element in the transmission of torque between the shaft and the part mounted on it. Various methods of milling, planing and quality control of keyways are considered. The main types of keyway joints, their features and applications are given. Special attention is paid to the choice of tools and processing modes to achieve high precision and surface quality. Conclusions are drawn about the most effective processing methods depending on the type of groove and accuracy requirements.

Keywords: keyways, milling, planing, machining accuracy, surface roughness

УДК 621.9

Рациональные методы обеспечения точного расположения отверстий

Влас Владислав Юрьевич vlasvyu@student.bmstu.ru
Вяткин Андрей Геннадьевич and-vyatkin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы обеспечения точного расположения отверстий в деталях машин. Основное внимание уделено методам обработки отверстий, включая сверление по разметке, использование станков с ЧПУ, координатно-расточных станков и кондукторов. Подробно описаны преимущества и недостатки каждого метода, а также приведены рекомендации по выбору наиболее подходящего метода в зависимости от условий производства. Особое внимание уделено точности обработки и производительности. Приведены выводы о наиболее эффективных методах, обеспечивающих высокую точность и качество обработки.

Ключевые слова: точное расположение отверстий, сверление, станки с ЧПУ, координатно-расточные станки, кондукторы, точность обработки

Точное расположение отверстий является одной из ключевых задач в машиностроении, особенно при производстве деталей с высокой степенью точности. На многих промышленных предприятиях используются детали фланцевого типа, которые требуют точного сверления отверстий. В данной работе рассматриваются рациональные методы обеспечения точного расположения отверстий, их преимущества и недостатки, а также выбор наиболее подходящего метода в зависимости от условий производства [1].

Методы обеспечения точного расположения отверстий следующие.

1. Обработка по разметке. Этот метод применяется в единичном и мелкосерийном производстве. Точность межцентровых расстояний составляет около 0,5 мм. Процесс включает разметку, кернение и сверление отверстий. Основным недостатком является низкая точность и высокая трудоемкость [2].

2. Сверление на станках с ЧПУ. Станки с числовым программным управлением обеспечивают высокую точность (0,01–0,05 мм) и производительность. Этот метод подходит для серийного и массового производства, так как исключает необходимость ручной настройки и снижает вероятность ошибок [3].

3. Координатно-расточные станки. Эти станки обеспечивают точность межцентровых расстояний до 0,001–0,005 мм. Они используются для обработки сложных деталей с высокой точностью, но их применение экономически оправдано только при крупносерийном производстве.

4. Сверление по кондукторам. Кондукторы обеспечивают точность до 0,08–0,2 мм и применяются в серийном и массовом производстве. Они упрощают процесс сверления и повышают повторяемость обработки.

Анализ методов:

1. Обработка по разметке:

- преимущества: простота, низкая стоимость оборудования;
- недостатки: низкая точность, высокая трудоемкость;
- применение: единичное и мелкосерийное производство.

2. Сверление на станках с ЧПУ:

- преимущества: высокая точность, автоматизация процесса, возможность обработки сложных деталей;

- недостатки: высокая стоимость оборудования и программного обеспечения;

- применение: серийное и массовое производство.

3. Координатно-расточные станки:

- преимущества: высокая точность, возможность обработки сложных деталей;

- недостатки: высокая стоимость оборудования, низкая рентабельность при малых объемах производства;

- применение: крупносерийное производство.

4. Сверление по кондукторам:

- преимущества: высокая точность, простота использования, повторяемость;

- недостатки: ограниченная гибкость, необходимость изготовления кондукторов для каждой детали [4];

- применение: серийное и массовое производство.

Выбор метода обеспечения точного расположения отверстий является ключевым этапом при проектировании и производстве деталей с высокой степенью точности. Этот выбор зависит от множества факторов, включая объем производства, требования к точности, доступное оборудование, квалификацию персонала и экономическую целесообразность. В данном разделе представлен подробный анализ каждого метода и рекомендации по их применению в различных условиях производства.

На основе анализа методов можно сделать вывод:

– для единичного и мелкосерийного производства наиболее подходящим методом является обработка по разметке из-за низкой стоимости и простоты;

– для серийного и массового производства оптимальным методом является сверление на станках с ЧПУ благодаря высокой точности и производительности;

– для крупносерийного производства с требованиями высокой точности рекомендуется использовать координатно-расточные станки;

– для серийного производства с необходимостью высокой повторяемости подходит сверление по кондукторам.

С развитием цифровых технологий и автоматизации в машиностроении ожидается дальнейшее совершенствование методов обработки отверстий.

Внедрение искусственного интеллекта и систем автоматического контроля позволит повысить точность и снизить затраты на производство. Также

активно развиваются аддитивные технологии, которые могут изменить подход к созданию деталей с отверстиями, позволяя изготавливать их с высокой точностью без необходимости механической обработки.

Точное расположение отверстий является важной задачей в машиностроении, и выбор метода обработки зависит от объема производства, требуемой точности и экономической целесообразности. Наиболее прогрессивным и универсальным методом является использование станков с ЧПУ, которые обеспечивают высокую точность и производительность, особенно в условиях серийного и массового производства.

Литература

- [1] Федоренко М.А. Обеспечение точности при сверлении отверстий. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2018, № 5, с. 104–109.
- [2] Левин А.В., Комков Л.В., Комкова М.А., Людоговский П.Л. *Способ определения координат центра отверстий и способы их реализации*. Казань, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, с. 52–54.
- [3] Малевский Н.П., Мешеряков Р.К., Полтавцев О.Ф. *Слесарь-инструментальщик. Точное размещение отверстий*. Москва, Высшая школа, Академия, 2000, с. 101–104.
- [4] Винников И.З., Френкель М.И. *Сверловщик*. Москва, Высшая школа, 1971, 288 с.

Rational methods to ensure the exact location of the holes

Vlas Vladislav Yurievich vlasvyu@student.bmstu.ru
 Vyatkin Andrey Gennadievich vyatkin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses methods for ensuring the exact location of holes in machine parts. The main focus is on hole processing methods, including marking drilling, the use of CNC machines, coordinate boring machines and conductors. The article describes in detail the advantages and disadvantages of each method, as well as provides recommendations for choosing the most appropriate method, depending on the production conditions. Special attention is paid to processing accuracy and productivity. Conclusions are given about the most effective methods that ensure high accuracy and quality of processing.

Keywords: precise hole location, drilling, CNC machines, coordinate boring machines, conductors, precision machining

УДК 621.9

Выбор рациональных методов обработки отверстий в машиностроении

Коршунова Анна Вячеславовна korshunovaav@student.bmstu.ru

Вяткин Андрей Геннадьевич vyatkin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы обработки отверстий, такие как сверление, зенкерование, развертывание, растачивание, шлифование, хонингование и протягивание. Описаны особенности каждого метода, их преимущества и недостатки, а также области применения. Приведены критерии точности и шероховатости поверхности, получаемые при использовании различных методов обработки. На основе анализа предложены наиболее эффективные методы для различных типов производства. Также рассмотрены современные тенденции в области обработки отверстий, включая использование станков с ЧПУ и автоматизированных систем.

Ключевые слова: обработка отверстий, сверление, зенкерование, развертывание, шлифование, хонингование, протягивание, точность, шероховатость

Обработка отверстий является одной из ключевых операций в машиностроении, так как отверстия используются для крепления деталей, передачи движения, размещения подшипников и других целей. В зависимости от требований к точности, шероховатости и производительности, применяются различные методы обработки отверстий. В данной статье рассмотрены основные методы обработки отверстий, их особенности и области применения.

Сверление — это процесс создания отверстий в сплошном материале с помощью сверл. Сверление применяется для получения отверстий невысокой точности (9–12 квалитет) и шероховатости ($Ra = 6,3\text{--}12,5 \text{ мкм}$). Основные типы сверл: спиральные, перовые, для глубокого сверления и одностороннего резания. Сверление осуществляется на сверлильных, токарных и других станках. Для повышения точности и качества обработки используются кондукторные втулки и специальные приспособления [1].

В современных условиях сверление часто выполняется на станках с ЧПУ, что позволяет повысить точность и производительность. Автоматизированные системы управления позволяют минимизировать человеческий фактор и снизить вероятность ошибок. Также активно используются сверла с покрытием из твердых сплавов, что увеличивает их износостойкость и срок службы.

Зенкерование — это процесс обработки отверстий с целью повышения их точности и шероховатости. Зенкеры имеют большее количество режущих кромок (3–6), что делает процесс более производительным по сравнению со сверлением. Зенкерование применяется для обработки отверстий, полученных литьем, ковкой или штамповкой, а также для подготовки отверстий

под развертывание или протягивание. Точность обработки — 8–10 квалитет, шероховатость — $Ra = 3,2\text{--}6,3$ мкм [2].

Развертывание — это финишная операция обработки отверстий, обеспечивающая высокую точность (6–8 квалитет) и низкую шероховатость ($Ra = 0,32\text{--}2,50$ мкм). Развертки имеют большее количество зубьев (6–12) и снижают минимальный припуск. Развертывание выполняется на тех же станках, что и сверление и зенкерование, с использованием охлаждающей жидкости. Для повышения точности применяются плавающие развертки, которые самоустанавливаются по оси отверстия [3].

Операция развертывания, как правило, осуществляется на том же оборудовании, которое используется для предшествующих этапов обработки, включая сверление, зенкерование и расточку. Для обеспечения максимальной точности размеров и правильного взаимного расположения отверстий, данные операции целесообразно выполнять с соблюдением принципа единства баз, что подразумевает обработку заготовки без ее переустановки [3].

Растачивание — это процесс обработки отверстий с помощью резцов на расточных станках. Растачивание применяется для получения отверстий с высокой точностью (6–7 квалитет) и шероховатостью ($Ra = 1,6\text{--}3,2$ мкм). Этот метод особенно эффективен для обработки больших отверстий и корпусных деталей. Растачивание позволяет исправлять геометрические отклонения, вызванные уводом инструмента на предыдущих операциях.

Шлифование отверстий — это процесс обработки с использованием абразивных кругов. Шлифование применяется для получения отверстий с высокой точностью (5–7 квалитет) и низкой шероховатостью ($Ra = 0,10\text{--}0,63$ мкм). Существуют различные схемы шлифования: с продольной подачей, врезное, планетарное и бесцентровое. Шлифование позволяет исправлять отклонения оси отверстия и обрабатывать отверстия большого диапазона диаметров.

Хонингование — это метод отделочной обработки отверстий, который выполняется с помощью хонинговальных головок с абразивными или алмазными брусками. Хонингование обеспечивает высокую точность (5–7 квалитет) и низкую шероховатость ($Ra = 0,10\text{--}0,32$ мкм). Этот метод применяется для обработки отверстий в цилиндрах, корпусных деталях и других изделиях, где требуется высокая точность и качество поверхности.

Протягивание — это высокопроизводительный метод обработки отверстий, который выполняется с помощью многозубых протяжек. Протягивание применяется для обработки цилиндрических, шлицевых и профильных отверстий. Точность обработки — 6–9 квалитет, шероховатость — $Ra = 0,63\text{--}1,25$ мкм. Протягивание выполняется на протяжных станках и позволяет снимать весь припуск за один ход инструмента.

Используются протяжки с твердосплавными пластинами, что увеличивает их износостойкость и позволяет обрабатывать твердые материалы. Автоматизированные системы контроля процесса протягивания позволяют минимизировать погрешности и повысить качество обработки.

Анализ методов обработки отверстий показал, что выбор метода зависит от требований к точности, шероховатости и производительности [4]. Для черновой обработки наиболее подходят сверление и зенкерование, а для чистовой — развертывание, шлифование и хонингование. Протягивание является наиболее производительным методом для массового и крупносерийного производства. Выбор рационального метода обработки отверстий позволяет повысить качество изделий и снизить себестоимость производства.

Литература

- [1] Остапенко М.С., Василега Д.С., Воронова Н.А. Качество обработки отверстий при глубоком сверлении. Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, 2022, № 3, с. 179–174.
- [2] Полиновский Л.А. Способ обработки сквозных отверстий. Актуальные проблемы в машиностроении, 2017, № 4, с. 52–56.
- [3] Агапов С.И., Сидякин Ю.И., Корпелянский О.Ф Повышение точности отверстий при развертывании в деталях из труднообрабатываемых материалов. Наукоемкие технологии в машиностроении, 2018, № 6, с. 18–23.
- [4] Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р. Совершенствование обработки отверстий небольшого диаметра. Вестник машиностроения, 2012, № 9, с. 50–52.

The choice of rational methods of hole processing in mechanical engineering

Korshunova Anna Vyacheslavovna korshunovaav@student.bmstu.ru

Vyatkin Andrey Gennadievich vyatkin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses hole processing methods such as drilling, countersinking, reaming, boring, grinding, honing and stretching. The features of each method, their advantages and disadvantages, as well as the areas of application are described. The criteria of accuracy and surface roughness obtained using various processing methods are given. Based on the analysis, the most effective methods for various types of production are proposed. Modern trends in the field of hole processing, including the use of CNC machines and automated systems, are also considered.

Keywords: hole processing, drilling, countersinking, unfolding, grinding, honing, stretching, precision, roughness

УДК 621.9

Расчет оптимального количества проходов при снятии припуска

Липский Никита Дмитриевич lipskiynd@student.bmstu.ru

Бысов Сергей Александрович bysov.s@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема определения оптимального количества проходов при снятии припуска в процессе металлообработки. Исследованы основные факторы, влияющие на выбор количества проходов, а также методы расчета, включая теоретические, эмпирические и аналитические подходы. Описаны различные подходы к оптимизации процесса, включая численные методы и моделирование с использованием современных CAM-систем. Приведен практический пример расчета оптимального количества проходов на конкретной детали. Сделаны выводы о необходимости комплексного подхода к выбору параметров обработки для повышения эффективности и качества продукции.

Ключевые слова: металлообработка, снятие припуска, оптимизация, проходы, расчет

Расчет оптимального количества проходов при снятии припуска играет ключевую роль в машиностроении, влияя на качество обработки деталей, производительность и экономическую эффективность процесса. Выбор количества проходов зависит от множества факторов, включая характеристики материала, точность обработки, тип оборудования и инструментов. В данной работе рассматриваются различные методы расчета, а также приводится анализ практического примера.

Оптимальное количество проходов определяется множеством параметров: характеристики заготовки (материал, размеры, способ получения), требования к изделию (точность размеров, качество поверхности), технологические параметры обработки (оборудование, режущий инструмент, режимы резания), а также экономические аспекты (затраты на обработку, производительность) [1].

Существуют различные методы расчета оптимального количества проходов. Теоретический расчет основывается на определении геометрии снятия припуска и учитывает параметры инструмента и глубину резания. Этот метод позволяет получить первичную оценку количества проходов, но не учитывает внешние факторы, такие как износ инструмента и стабильность оборудования. Для его применения необходимо знать точные геометрические параметры заготовки и инструмента, а также учитывать допустимые нагрузки на режущую кромку. Однако теоретические методы часто требуют дополнительной корректировки на практике из-за динамических изменений в процессе обработки [2].

Эмпирические методы основаны на анализе накопленных данных и практических рекомендациях. Они применяют коэффициенты, зависящие от ма-

териала заготовки, условий обработки и инструментального оснащения. Такие методы позволяют быстро определить примерное количество проходов, но требуют регулярной корректировки и учета изменений в технологическом процессе. Несмотря на свою простоту, эмпирические методы имеют ограниченную точность, поскольку не учитывают динамические изменения в процессе обработки [2].

Аналитические методы более точны, так как учитывают параметры резания, мощность оборудования и механические характеристики процесса. Один из наиболее распространенных аналитических подходов — расчет на основе энергозатрат, где определяется необходимая мощность станка и силы резания. Этот метод позволяет оценить пределы производительности оборудования и выбрать оптимальные параметры обработки. Использование аналитических методов особенно актуально при обработке твердых сплавов и сложных заготовок, требующих высокой точности и минимальных погрешностей [3].

Также существуют численные методы расчета, основанные на компьютерном моделировании и использовании САМ-систем. Эти методы учитывают все технологические факторы, позволяют проводить моделирование процесса обработки, прогнозировать износ инструмента и оптимизировать стратегии резания. Их применение позволяет значительно повысить точность прогнозирования и минимизировать производственные затраты. Современные САМ-системы способны анализировать весь цикл обработки, обеспечивая высокую степень автоматизации и адаптации технологического процесса [4].

В качестве примера проведены расчеты для детали из стали 40Х диаметром 18 мм с припуском 4,8 мм, обрабатываемой токарным методом на станке мощностью 7,5 кВт. Расчеты по эмпирическим методам показали, что оптимальное количество проходов составляет около трех, что обеспечивает баланс между скоростью обработки и качеством поверхности. Важно учитывать, что уменьшение количества проходов может привести к перегреву инструмента и снижению точности обработки, поэтому расчетные значения должны соотноситься с реальными условиями производства.

Дополнительно аналитический расчет на основе энергозатрат позволил определить, что реальное количество проходов, исходя из мощности станка и усилия резания, составляет около четырех. Это указывает на необходимость корректировки технологических параметров для оптимального сочетания производительности и ресурса оборудования. На практике, для снижения энергозатрат и увеличения стойкости инструмента, могут применяться комбинированные методы, совмещающие черновую и чистовую обработку с переменной глубиной резания.

Таким образом, выбор количества проходов при снятии припуска является многопараметрической задачей, требующей комплексного подхода. Для достижения наилучшего результата необходимо учитывать не только геометрические и энергетические параметры обработки, но и экономические аспекты, такие как себестоимость инструмента, временные затраты и ресурс обо-

рудования. Применение современных цифровых технологий, в том числе искусственного интеллекта, открывает новые возможности для оптимизации процесса и повышения его эффективности.

Литература

- [1] Схиртладзе А.Г., Тимирязев В.А., Солнышкин Н.П., Дмитриев С.И. *Проектирование технологических процессов машиностроительных производств*. Санкт-Петербург, Лань, 2014, с. 220–226.
- [2] Наумкин И.О. Обзор методов назначения припусков на механическую обработку деталей машин. *Научные достижения в XXI веке. IX Междунар. науч.-практ. конф.: сб. тр.* Анапа, Изд-во «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2020, с. 64–76. URL: <https://innova-science.ru/wp-content/uploads/2020/06/sbornik-nauchnyh-trudov-01.06.2020-nd-9.pdf> (дата обращения 11.03.2025).
- [3] Васин А.Н. Аналитический обзор современных методов расчета припусков на механическую обработку заготовок. *Вестник Саратовского государственного технического университета*, 2005, № 2, с. 16–26.
- [4] Звонцов И.Ф. *Разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ*. Санкт-Петербург, Лань, 2024, с. 131–139.

Calculation of the optimal number of passes for material removal

Lipskiy Nikita Dmitrievich lipskiynd@student.bmstu.ru
Bysov Sergey Alexandrovich bysov.s@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This paper examines the problem of determining the optimal number of passes for material removal in machining. The main factors influencing the choice of the number of passes are analyzed, as well as calculation methods, including theoretical, empirical, and analytical approaches. Various approaches to process optimization are described, including numerical methods and modeling using modern CAM systems. A practical example of calculating the optimal number of passes for a specific part is presented. Conclusions are drawn about the necessity of a comprehensive approach to selecting processing parameters to improve efficiency and product quality.

Keywords: machining, material removal, optimization, passes, calculation

УДК 621.9

Снижение трудоемкости механической обработки за счет разработки технологий на оборудовании с ЧПУ

Дикарев Даниил Сергеевич

dikaryovds@student.bmstu.ru

Аракелян Самвел Абрамович

arakelyan@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы снижения трудоемкости механической обработки за счет внедрения оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ). Освещены основные преимущества технологий с ЧПУ, такие как автоматизация процессов, повышение точности и гибкости производства. Рассмотрены методы оптимизации программирования, использования многофункциональных станков, автоматизации смены инструмента и интеграции с роботизированными системами. Приведены выводы о повышении производительности и снижении затрат на производство.

Ключевые слова: ЧПУ, механическая обработка, трудоемкость, автоматизация, производительность

Современное машиностроение требует высокоточной и эффективной механической обработки для изготовления сложных деталей и узлов. В условиях растущей конкуренции и сокращения сроков производства одним из ключевых направлений повышения эффективности становится внедрение станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Эти технологии позволяют значительно снизить трудоемкость механической обработки, повысить производительность и улучшить качество продукции [1].

Целью работы является анализ методов и технологий, позволяющих снизить трудоемкость механической обработки за счет внедрения оборудования с ЧПУ. Рассмотрены основные преимущества технологий с ЧПУ, методы их оптимального использования и перспективы их развития в промышленности [2].

Основные понятия и задачи механической обработки. Механическая обработка — это процесс изменения формы, размеров и качества поверхности заготовок из металлов, сплавов или других материалов с использованием режущих инструментов. Этот процесс является ключевым этапом в производстве деталей и узлов для различных отраслей промышленности, включая машиностроение, приборостроение и авиастроение [3].

Основные виды механической обработки:

- токарная обработка — используется для изготовления деталей вращения (валики, оси, втулки);
- фрезерование — применяется для создания плоскостей, пазов, зубчатых передач;
- сверление — процесс создания отверстий;
- шлифование — используется для повышения точности размеров и улучшения качества поверхности;

– расточка, строгание, протяжка — специализированные виды обработки для сложных форм [6].

Основные параметры механической обработки:

– точность обработки — соответствие размеров детали заданным параметрам;

– шероховатость поверхности — качество обработанной поверхности;

– производительность — объем работы, выполненный за единицу времени.

Задачи механической обработки:

– достижение заданной геометрии и размеров детали — обеспечение ее соответствия чертежу;

– улучшение механических свойств поверхности — повышение износостойкости, прочности;

– снижение брака и повышение точности изготовления — минимизация погрешностей;

– оптимизация производственного процесса — сокращение времени и затрат на изготовление [4].

Технологические особенности оборудования с ЧПУ:

– программирование траекторий: работа станков с ЧПУ основывается на создании управляющих программ, где задаются траектории движения инструмента, режимы обработки (скорость подачи, обороты шпинделя, глубина резания) и последовательность операций [5];

– высокая точность и повторяемость: технологии ЧПУ обеспечивают точность размеров до микрон, что крайне важно для высокоточных отраслей [1];

– гибкость производства: современные станки с ЧПУ могут выполнять множество операций (токарные, фрезерные, сверлильные) за один цикл благодаря наличию многоосевых систем [2].

Современные станки с ЧПУ обладают рядом уникальных характеристик, отличающих их от традиционного оборудования. Многоосевая обработка (5-осевые и более станки) позволяет выполнять сложные операции за одну установку детали, что сокращает время переналадки на 40–60 %. Например, при обработке турбинных лопаток 5-осевые станки обеспечивают точность позиционирования до 3–5 мкм, что невозможно при использовании 3-осевых аналогов.

Системы автоматической коррекции инструмента решают проблему износа режущих кромок. Датчики лазерного контроля измеряют длину и радиус инструмента с точностью до 1 мкм, автоматически внося поправки в управляющую программу. Это увеличивает ресурс инструмента на 25–30 % и снижает количество брака.

Методы снижения трудоемкости на оборудовании с ЧПУ. Снижение трудоемкости при использовании оборудования с ЧПУ достигается за счет нескольких ключевых методов, основанных на последних достижениях цифровых производственных технологий:

– оптимизация программирования: современные системы CAD/CAM позволяют создавать управляющие программы с минимальным участием оператора [3];

- использование многофункциональных станков: комбинированные фрезерно-токарные станки с возможностью смены инструмента и автоматической подачей заготовок [6];
- автоматизация смены инструмента: современные станки с ЧПУ оснащаются автоматическими системами смены инструментов [7];
- системы мониторинга и диагностики: ЧПУ-оборудование с встроенными датчиками позволяет в реальном времени контролировать состояние оборудования [1].

Особого внимания заслуживает комплексная автоматизация цикла обработки — от проектирования до контроля качества. Современные CAD/CAM-системы (например, Siemens NX, Autodesk PowerMill) позволяют не только создавать управляющие программы, но и проводить полное виртуальное моделирование процесса обработки с анализом усилий резания, температурных деформаций и вибраций. Это сокращает время подготовки производства на 30–40 % по сравнению с традиционными методами программирования.

Внедрение оборудования с ЧПУ позволяет значительно снизить трудоемкость механической обработки, повысить производительность и улучшить качество продукции. Современные технологии обработки на ЧПУ обеспечивают высокую точность, гибкость и автоматизацию процессов, что делает их незаменимыми в условиях современного производства.

Литература

- [1] Епифанова О.В. Управление качеством процесса подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ на основе выбора стратегий и средств автоматизации. Дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2012, 132 с.
- [2] Казанцев М.С. Метод оценки трудоемкости разработки управляющих программ для изготовления группы деталей на станках с ЧПУ. *Приборостроение*, 2015, т. 58, № 4, с. 322–325.
- [3] Кугаевский С.А. К вопросу о гибкости и оперативности подготовки производства для станков с ЧПУ. *САПР и графика*, 2009, № 12. URL: <https://sapr.ru/article/21031> (дата обращения 15.02.2025).
- [4] Анцев В.Ю., Моцаков С.А. Оценка качества процесса подготовки управляющих программ для металлообрабатывающих станков с ЧПУ. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2009, вып. 1, с. 190–196.
- [5] Голубев А.А., Панов А.В. Системный подход при сокращении трудоемкости подготовительных операций для станков с ЧПУ в условиях опытного производства. *Молодой учёный*, 2019, № 50 (288), с. 97–101.
- [6] Числовое программное управление: теоретические основы, технологии и системы. Москва, ДМК Пресс, 2014.
- [7] Юрьев И.Н. Роботизированные и автоматизированные системы для станков с ЧПУ. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2017.

Reduction of labor intensity in mechanical processing through the development of CNC technologies

Dikarev Daniil Sergeevich dikaryovds@student.bmstu.ru

Arakelyan Samvel Abramovich arakelyan@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses methods for reducing the labor intensity of mechanical processing through the introduction of computer numerical control (CNC) equipment. The main advantages of CNC technologies are highlighted, such as process automation, increased accuracy, and production flexibility. Methods for optimizing programming, using multifunctional machines, automating tool changes, and integrating with robotic systems are considered. Conclusions are drawn about increasing productivity and reducing production costs.

Keywords: CNC, mechanical processing, labor intensity, automation, productivity

УДК 621.9

Выбор инструментального материала для обработки стали 30ХМА

Гусаков Антон Владимирович gusakovav@student.bmstu.ru

Малышев Евгений Николаевич malen@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы выбора инструментальных материалов для обработки стали 30ХМА, обладающей высокой прочностью и износостойкостью. Рассмотрены физико-механические свойства материала, определяющие сложность его обработки. Проведено сравнение эксплуатационных характеристик различных классов инструментальных материалов: быстрорежущих сталей, твердых сплавов, керамики и сверхтвёрдых материалов (CBN, PCD), а также их применение в зависимости от типа инструмента и этапа обработки. Приводятся рекомендации по выбору инструмента для различных видов обработки (точение, фрезерование, сверление)

Ключевые слова: сталь 30ХМА, механическая обработка, инструментальные материалы, режимы резания, твердые сплавы

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к качеству и точности обработки деталей из конструкционных сталей. Особую сложность представляет обработка легированных сталей типа 30ХМА, широко применяемых для изготовления ответственных деталей (валов, шестерен, осей) в авиационной, автомобильной и энергетической промышленности. Высокие прочностные характеристики этой стали, достигаемые за счет оптимального сочетания углерода (0,28–0,34 %) и легирующих элементов (Cr, Mo, Mn), значительно усложняют процесс механической обработки [1, 2].

Целью работы является исследование инструментальных материалов и их оптимального выбора для обработки стали 30ХМА с учетом типа инструмента и режимов резания.

Физико-механические свойства стали 30ХМА и их влияние на процесс обработки. Сталь 30ХМА относится к классу среднеуглеродистых хромомолибденовых сталей. Ее химический состав и термическая обработка определяют комплекс свойств, существенно влияющих на процесс резания [1, 3]:

- 1) механические характеристики:
 - предел прочности: 800–1000 МПа;
 - твердость после закалки: HRC 25–32;
 - относительное удлинение: 12–15 %;
 - ударная вязкость: 50–80 Дж/см²;
- 2) термические свойства:
 - теплопроводность: 36–40 Вт/(м · К);
 - температура плавления ≈ 1500 °C;
 - коэффициент линейного расширения $11,5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹;
- 3) технологические особенности обработки:

- высокое сопротивление резанию ($K_c \approx 2500\text{--}3000 \text{ Н/мм}^2$);
- склонность к упрочнению при пластической деформации;
- образование длинной сливной стружки;
- интенсивное тепловыделение в зоне резания.

Эти свойства определяют повышенные требования к инструментальным материалам, которые должны сохранять режущую способность в условиях значительных механических и термических нагрузок.

Современные инструментальные материалы: сравнительный анализ. Для обработки стали 30ХМА применяются четыре основных класса инструментальных материалов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения [4]:

Быстрорежущие стали [5]:

- составы: M2, M35, M42 с добавками Co;
- твердость 62–67 HRC;
- термостойкость до 600 °C;
- основные преимущества: хорошая ударная вязкость, возможность многократной заточки.
- область применения: сверла, развертки, метчики, фрезы сложной формы.

Твердые сплавы (WC–Co):

- твердость 89–93 HRA;
- термостойкость до 1000 °C;
- особенности: высокая износостойкость, но ограниченная прочность;
- применение: токарные резцы, фрезы, сверла для высокопроизводительной обработки.

Керамические материалы:

- типы: оксидная (Al_2O_3), нитридная (Si_3N_4);
- твердость 91–94 HRA;
- термостойкость до 1200 °C;
- преимущества: исключительная износостойкость;
- ограничения: хрупкость, чувствительность к ударам.

Сверхтвёрдые материалы (CBN, PCD):

- твердость: CBN — 4500 HV, PCD — 7000 HV;
- термостойкость: CBN — до 1500 °C;
- особенности: максимальная износостойкость, но высокая стоимость;
- применение: чистовая обработка закаленных сталей.

Оптимизация выбора инструмента для различных операций:

1) токарная обработка [4]:

- черновая: твердые сплавы марки Р30 с TiCN-покрытием;
- получистовая: твердые сплавы Р10–Р20 с многослойным покрытием;
- чистовая: керамика или CBN для закаленных состояний;

2) фрезерование [4]:

- торцовое: твердые сплавы с износостойким покрытием;
- концевое: мелкозернистые твердые сплавы с повышенной прочностью;
- высокоскоростное: керамика Si_3N_4 ;

3) сверление [4]:

- стандартное: HSS-Со с оптимизированной геометрией;
- глубокое: твердосплавные сверла с внутренним охлаждением;
- высокопроизводительное: твердые сплавы с алмазоподобными покрытиями.

Перспективные направления развития. Современные тенденции в области инструментальных материалов для обработки трудных сталей включают:

- разработку наноструктурированных покрытий (TiAlN, AlCrN);
- создание градиентных твердых сплавов [6];
- применение аддитивных технологий для производства инструментов;
- интеграцию систем мониторинга износа инструмента.

Заключение. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Обработка стали 30ХМА требует дифференцированного подхода к выбору инструментального материала в зависимости от вида обработки и состояния заготовки.
2. Наибольшую универсальность демонстрируют твердые сплавы с современными износостойкими покрытиями.
3. Для чистовой обработки закаленных деталей оптимальны инструменты из СВН.
4. Дальнейшее повышение эффективности обработки связано с внедрением интеллектуальных систем управления процессом резания.

Литература

- [1] Курдюмова Л.Н. *Инструментальные материалы*. Орел, Изд-во ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019, 56 с.
- [2] Зубарев Ю.М. *Технология инструментального производства. Инструментальные материалы*. Санкт-Петербург, СПбИМ, 1993, 89 с.
- [3] Григорьев С.Н., Гречишников В.А., Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г. *Современные инструментальные материалы. Т. 1. Горячая штамповка*. Старый Оскол, ТНТ, 2020, 128 с.
- [4] Верещака А.С., Кушнер В.С. *Резание материалов*. Москва, Высшая школа, 2009, 512 с.
- [5] Зубков Н.Н. *Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов. Машиностроение и компьютерные технологии*, 2013, № 5, с. 75–100.
- [6] Бельский Е.И. *Химико-термическая обработка инструментальных материалов*. Минск, Наука и техника, 1986, 256 с.

Selection of tool material for processing 30XMA steel

Gusakov Anton Vladimirovich

gusakovav@student.bmstu.ru

Malyshev Evgeny Nikolaevich

malen@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses methods for selecting tool materials for processing 30XMA steel, which has high strength and wear resistance. The physical and mechanical properties of the material, which determine the complexity of its processing, are considered. The performance characteristics of various classes of tool materials are compared: fast-cutting steels, hard alloys, ceramics and superhard materials (CBN, PCD), as well as their application depending on the type of tool and the stage of processing. Recommendations are given on the choice of tools for various types of processing (turning, milling, drilling).

Keywords: 30XMA steel, machining, tool materials, cutting modes, hard alloys

УДК 621.7

Сравнение методов изготовления заготовки детали типа «крышка цилиндра»

Силаков Кирилл Михайлович

silakovkm@student.bmstu.ru

Вяткин Андрей Геннадьевич

vyatkin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен сравнительный анализ двух технологий изготовления заготовок деталей типа «крышка цилиндра» из стали 20: литья в кокиль и горячей объемной штамповки на кривошипных прессах (КГШП). Исследование охватывает ключевые параметры: точность размеров, качество поверхности, механические характеристики и экономическую эффективность. Особый акцент сделан на влиянии каждого метода на эксплуатационные свойства деталей, работающих под высокими механическими нагрузками. На основе комплексной оценки технологических и экономических факторов сформулированы практические рекомендации по выбору оптимального способа производства для различных промышленных условий и типоразмеров изделий.

Ключевые слова: литье в кокиль, горячая объемная штамповка, сталь 20, точность размеров, шероховатость поверхности, механические свойства, себестоимость

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к качеству и эксплуатационным характеристикам деталей, работающих в условиях значительных механических нагрузок. Особый интерес представляют технологии производства таких ответственных узлов, как крышки цилиндров, которые широко применяются в гидравлических и пневматических системах.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью оптимизации производственных процессов при изготовлении заготовок из стали 20. Выбор между литьем в кокиль и горячей объемной штамповкой имеет принципиальное значение для обеспечения требуемых механических свойств, точности геометрических параметров и экономической эффективности производства [1, 2].

Целью работы является сравнительный анализ технологических возможностей литья в кокиль и горячей объемной штамповки применительно к производству деталей типа «крышка цилиндра». В задачи исследования входила оценка влияния каждого метода:

- на точность размеров и шероховатость поверхности;
- механические свойства готовых изделий;
- производительность технологического процесса;
- экономические показатели производства.

Исследование проводилось с использованием следующих методов:

- теоретический анализ научных публикаций и нормативной документации (ГОСТ);
- сравнительная оценка технологических параметров;

- экономический анализ себестоимости производства;
- практический опыт промышленного применения технологий.

Для объективной оценки были рассмотрены образцы деталей, изготовленные обоими методами на производственных предприятиях [3, 4].

Сталь 20 относится к углеродистым конструкционным сталям с содержанием углерода 0,17–0,24 %. Основные свойства [5]:

- предел прочности: 410–530 Мпа;
- предел текучести: 245–275 Мпа;
- удлинение: 26–30 %;
- ударная вязкость: 70–120 Дж/см².

Данный материал сочетает хорошую обрабатываемость с удовлетворительными механическими характеристиками, что делает его распространенным для изготовления деталей средней нагруженности.

Преимущества литья в кокиль [1–3]:

- возможность получения сложных геометрических форм;
- относительно низкие затраты при малых сериях;
- минимальные механические воздействия на материал.

Недостатки:

- точность размеров IT14–IT16;
- шероховатость поверхности Ra 12,5–25,0 мкм;
- возможность образования пор и раковин;
- необходимость термообработки для снятия внутренних напряжений и улучшения структуры;
- ограниченная производительность.

Преимущества горячей объемной штамповки в открытых штампах на КГШП [4]:

- повышенная прочность изделия (на 15–20 % выше, чем при литье);
- более однородная структура материала;
- высокая производительность;
- меньшие припуски на механическую обработку.

Недостатки:

- высокие первоначальные затраты на оснастку;
- ограничения по сложности геометрии заготовок;
- необходимость точного соблюдения температурных режимов.

Анализ себестоимости показал следующее.

1. Для мелкосерийного производства (до 1000 шт./год) литье в кокиль экономичнее на 15–20 % [1–3].

2. При серийности свыше 5000 шт./год горячая штамповка обеспечивает экономию до 30 % за счет:

- снижения трудоемкости;
- уменьшения расхода материала;
- более высокой производительности.

Однако для деталей с высокой цикловой нагрузкой (гидроцилиндры) штамповка предпочтительна даже в малых сериях, так как снижает риск от-

каза из-за дефектов. Это подтверждается испытаниями образцов на предельную нагрузку [4].

На основании проведенного исследования рекомендуется следующее.

1. Для деталей, работающих под высокими нагрузками, использовать горячую объемную штамповку.

2. В условиях крупносерийного и массового производства использовать горячую объемную штамповку.

3. Для деталей сложной геометрии при малых сериях применять литье в кокиль.

4. При выборе технологии необходимо учитывать:

- требуемые механические свойства;
- планируемые объемы производства;
- сложность геометрической формы заготовки;
- экономические показатели.

Заключение. Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы.

1. Горячая объемная штамповка обеспечивает лучшие механические характеристики деталей.

2. Литье в кокиль предпочтительно для сложных геометрических форм.

3. Экономическая эффективность каждого метода зависит от объемов производства.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка комбинированных технологий, сочетающих преимущества обоих методов.

Литература

- [1] Афонькин М.Г., Звягин В.Б. *Производство заготовок в машиностроении*. Санкт-Петербург, Политехника, 2011, 380 с.
- [2] Видзяйло П.И. Особенность формообразования поверхностей заготовок при литье в металлические формы (кокиль). *Машиностроение: сб. тр.* Минск, БНТУ, 2005, т. 1, вып. 21, с. 309–312.
- [3] Султанов В.И., Тимофеева Т.С., Панкратов Д.Л. Литье в кокиль. *Актуальные проблемы науки в студенческих исследованиях: сб. материалов*. Казань, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2018, с. 90–92.
- [4] Килов А.С., Вольнов С.В., Килов К.А. *Производство заготовок. Объемная штамповка. Кн. 1. Проектирование и производство поковок (штампованных заготовок)*. Оренбург, ГОУ ОГУ, 2004, 155 с.
- [5] Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Ерофеев В.К., Устинова А.А. *Конструкционные стали и сплавы*. Санкт-Петербург, Политехника, 2013, 440 с.

Comparison of manufacturing methods for cylinder cover - type workpieces

Silakov Kirill Mikhailovich

silakovkm@student.bmstu.ru

Vyatkin Andrey Gennadievich

vyatkin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article presents a comparative analysis of two manufacturing technologies for “Cylinder Cover” workpieces made of steel 20: die casting and hot bulk forging on crank presses (KGSHP). The study covers key parameters: dimensional accuracy, surface quality, mechanical properties, and economic efficiency. Special emphasis is placed on the influence of each method on the operational characteristics of parts working under high mechanical loads. Based on a comprehensive assessment of technological and economic factors, practical recommendations are provided for selecting the optimal production method for various industrial conditions and product sizes.

Keywords: die casting, hot bulk forging, steel 20, dimensional accuracy, surface roughness, mechanical properties, production cost

УДК 621.7.01

Анализ методов получения заготовок зубчатых колес

Малышев Ярослав Сергеевич

malysevaroslav0@gmail.com

Мусохранов Марсель Владимирович

Marsel@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен анализ различных методов получения заготовок зубчатых колес. Зубчатые колеса являются важными элементами механических передач, обеспечивая передачу крутящего момента и изменение характеристики движения. От качества их заготовок напрямую зависят эксплуатационные характеристики, такие как точность, надежность и долговечность. Поэтому выбор метода получения заготовки играет ключевую роль в технологическом процессе. Он определяет не только механические свойства детали, но и экономическую целесообразность ее производства.

Ключевые слова: зубчатое колесо, заготовка, методы получения, горячая штамповка, литье, порошковая металлургия, прокатка, точность, прочность, коэффициент использования материала, серийность производства, экономическая эффективность, технологический процесс, пластическая деформация, механическая обработка

Зубчатые колеса представляют собой детали с зубчатым венцом, предназначенные для передачи движения посредством зацепления с другими колесами или рейками. Они классифицируются по ряду параметров, включая форму зуба, профиль зацепления, расположение зубьев и уровень точности. По геометрии зуба различают прямозубые, косозубые и шевронные колеса. По профилю зацепления — эвольвентные, циклоидальные и трапецидальные. В зависимости от расположения зубьев выделяют цилиндрические, конические и червячные передачи. Выбор конструкции зубчатого колеса определяется условиями его эксплуатации, нагрузками и требованиями к точности передачи движения. Например, цилиндрические зубчатые колеса широко применяются в промышленных редукторах и приводах благодаря простоте их изготовления и высокой эффективности передачи энергии. Конические передачи чаще используются в автомобильных трансмиссиях и других механизмах, где важно изменение направления вращения. Червячные передачи обеспечивают плавность работы и большое передаточное число, что делает их незаменимыми в подъемно-транспортных механизмах и высокоточных системах [1].

Существует несколько основных методов получения заготовок зубчатых колес, каждый из которых обладает своими преимуществами и ограничениями. Горячее накатывание зубьев является одним из методов пластической деформации, который обеспечивает высокую прочность и точность заготовки. Горячая штамповка широко применяется в серийном производстве, позволяя снизить отходы материала и повысить механические характеристики изделий. Литье используется для производства крупных и сложных деталей, однако оно

требует дополнительной механической обработки для достижения необходимых точностных параметров [2]. Методы прокатки, высадки, штамповки и вырубки активно применяются в массовом производстве, так как они позволяют получать заготовки с минимальными потерями материала. Порошковая металлургия является перспективной технологией для изготовления деталей сложной формы с высокой точностью и стабильностью размеров.

Выбор метода получения заготовки зубчатого колеса зависит от множества факторов, которые необходимо учитывать для обеспечения максимальной эффективности производства. Одним из ключевых критериев является прочность материала, так как от этого зависит долговечность и надежность изделия [3]. Жесткость заготовки также играет важную роль, поскольку она снижает вероятность деформации под нагрузкой. Высокая точность заготовки позволяет минимизировать затраты на последующую механическую обработку, что особенно важно для массового производства. Габариты заготовки определяют применимость того или иного метода: для крупных изделий предпочтительно использовать литье, тогда как для мелких — порошковую металлургию. Коэффициент использования материала (КИМ) является важным параметром при выборе метода получения заготовки, так как он определяет степень рационального использования сырья. Чем выше КИМ, тем меньше отходов образуется в процессе производства [4]. Серийность производства также влияет на выбор метода: для массового выпуска деталей предпочтение отдается высокопроизводительным методам, таким как штамповка или прокатка. Экономическая эффективность метода определяется затратами на оборудование, материалы и энергопотребление. Кроме того, важным критерием является экологичность процесса, которая включает минимизацию отходов и возможность вторичной переработки материалов.

Выбор метода получения заготовки зубчатого колеса является сложной технологической задачей, требующей учета множества параметров. Оптимальное решение позволяет снизить затраты на производство, повысить качество продукции и увеличить срок службы изделия [5]. Современные технологии стремятся к минимизации отходов и повышению эффективности процессов, что делает особенно актуальным использование методов с высоким коэффициентом использования материала и низким уровнем энергопотребления. В дальнейшем исследования в данной области могут быть направлены на разработку комбинированных методов получения заготовок, которые объединяют преимущества различных технологий, обеспечивая высокую точность и прочность при минимальных затратах.

Литература

- [1] Кондаков А.И., Васильев А.С. *Выбор заготовок в машиностроении: справочник*. Москва, Машиностроение, 2007, 560 с.
- [2] Афонькин М.Г., Магницкая М.В. *Производство заготовок в машиностроении*. Ленинград, Машиностроение, 1987, 256 с.

-
- [3] Калашников С.Н. и др. *Производство зубчатых колес: справочник*. Москва, Машиностроение, 1990, 28 с.
 - [4] Семенов Е.И., ред. *Ковка и штамповка. Т. 1. Горячая штамповка*. Москва, Машиностроение, 1996, 592 с.
 - [5] Пегашкин В.Ф., Пегашкина Е.В. *Методы получения заготовок деталей машин*. Екатеринбург, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2016, 81 с.

Analysis of methods for obtaining gear blanks

Malyshev Yaroslav Sergeevich

malysevaroslav0@gmail.com

Musokhranov Marsel Vladimirovich

marsel@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article analyzes various methods for obtaining gear blanks. Gears are important elements of mechanical gears, providing torque transmission and changing motion characteristics. The performance characteristics such as accuracy, reliability and durability directly depend on the quality of their blanks. Therefore, the choice of the preparation method plays a key role in the technological process. It determines not only the mechanical properties of the part, but also the economic feasibility of its production.

Keywords: gear wheel, billet, production methods, hot stamping, casting, powder metallurgy, rolling, accuracy, strength, material utilization rate, mass production, economic efficiency, technological process, plastic deformation, mechanical processing

УДК 621.2

Влияние кинематических схем на качество глубокого сверления отверстий

Антипова Анжелика Евгеньевна antipovaae@student.bmstu.ru
 Вяткин Андрей Геннадьевич vyatkin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены основные методы глубокого сверления — сплошное и кольцевое, а также влияние кинематических схем на качество обработки отверстий с отношением глубины к диаметру более 5. Представлены данные о классификации отверстий по диаметру и глубине, проанализированы особенности обработки с учетом режимов резания и конструкции инструмента. Показано, что выбор кинематики существенно влияет на точность, долговечность инструмента и шероховатость поверхности. Сделаны выводы, что оптимальная кинематическая схема зависит от размера и глубины отверстий и может применяться для повышения производительности и качества в машиностроении.

Ключевые слова: глубокое сверление, кинематические схемы, точность обработки, сплошное сверление, кольцевое сверление

Глубокое сверление является важным технологическим процессом в машиностроении, который применяется для создания отверстий с отношением глубины к диаметру (L/d) более 80. Такие отверстия встречаются в конструкциях валов, шпинделей, осей и других деталей, требующих высокой точности и качества поверхности. В зависимости от диаметра отверстия классифицируются как малые (3–12 мм), средние (12–60 мм), большие (60–300 мм) и сверхбольшие (свыше 300 мм). По глубине их делят на малые ($5d < L \leq 20d$), средние ($20d < L \leq 80d$), глубокие ($80d < L \leq 200d$) и сверхглубокие ($L > 200d$). Для анализа были рассмотрены два основных метода глубокого сверления: сплошное и кольцевое. Сплошное сверление предполагает полное удаление материала из зоны резания в виде стружки, где глубина резания равна половине диаметра отверстия ($t = d_0/2$). Этот метод требует тщательного выбора инструмента, параметров резания и системы отвода стружки, чтобы избежать износа и перегрева. Кольцевое сверление, напротив, обрабатывает только кольцевую зону, оставляя центральный стержень, что снижает объем удаляемого материала и повышает экономичность процесса. Однако сохранение стержня может привести к его деформации, что вызывает колебания инструмента и требует дополнительных мер стабилизации [1].

В работе проанализированы три кинематические схемы: вращение заготовки при неподвижном инструменте, совместное вращение заготовки и инструмента, вращение инструмента при неподвижной заготовке. Каждая из них имеет свои преимущества и ограничения в зависимости от диаметра и глубины отверстия. Например, вращение заготовки минимизирует увод оси

отверстия, что особенно важно для малых и средних диаметров (3–60 мм) с глубиной до $80d$ [2].

Совместное вращение заготовки и инструмента обеспечивает минимизацию увода оси сверла и равномерное распределение нагрузки на режущие кромки, что повышает точность и снижает износ инструмента при обработке твердых материалов и отверстий средней и большой глубины ($20d$ – $200d$) [3]. Схема с вращением инструмента чаще используется для крупных деталей с диаметром более 60 мм, но сопровождается максимальным отклонением оси, что можно компенсировать переменной подачей [4].

Особенности сплошного сверления заключаются в том, что у оси сверла скорость резания снижается до нуля, что приводит к смятию материала вместо его резания. Это увеличивает осевую силу, ускоряет износ инструмента и ухудшает качество поверхности, особенно при обработке отверстий малого и среднего диаметра [5]. Для устранения этих недостатков применяются модификации, такие как сверление с нулевым стержнем, где режущие кромки смещаются на 0,1–0,2 мм от центра. Это позволяет избежать смятия материала и улучшить отвод стружки. В случае кольцевого сверления деформация стержня вызывает поперечные колебания инструмента, особенно при вращении заготовки. Для стабилизации процесса используются дополнительные опоры или направляющие, что повышает точность обработки [1]. После сверления часто применяются дополнительные операции, такие как растачивание, зенкерование, развертывание, хонингование, шлифование, притирка, которые позволяют достичь требуемой шероховатости поверхности и диаметральной точности. Эти процессы особенно важны для отверстий с жесткими допусками, например в гидравлических системах или двигателях [2]. Применение сплошного сверления эффективно для отверстий среднего диаметра (12–60 мм) и глубины до $80d$, где важна высокая производительность. Кольцевое сверление предпочтительно для отверстий больших (60–300 мм) и сверхбольших (свыше 300 мм) диаметров, так как обеспечивает экономию материала и снижение энергозатрат [4].

Для сверхглубоких отверстий ($L > 200d$) особое значение имеет прямолинейность оси и качество поверхности. Вращение заготовки в таких случаях минимизирует отклонения, но использование удлиненных спиральных сверл, например для масляных каналов, может привести к забиванию стружечных канавок. Это снижает эффективность отвода стружки и требует применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) под высоким давлением [3]. Современные технологии, такие как координатно-измерительные машины и станки с ЧПУ, позволяют контролировать дефекты обработки, включая увод оси, конусность и шероховатость. Это обеспечивает достижение высокой точности даже при сверлении сверхглубоких отверстий [4]. Также для подобных отверстий применяют пушечные сверла сконструированные в виде стержня со срезанным на половину концом образующим канал для отвода стружки для направления сверла предварительно должно быть просверлено отверстие на глубину 0,5–0,8d и ружейные, представляющие собой трубку

с обжатой канавкой для отвода стружки с углом 110–120° и полостью для подвода охлаждающей жидкости.

В результате исследований установлено, что выбор метода и кинематической схемы зависит от конкретных параметров отверстия и материала заготовки. Сплошное сверление оптимально для средних диаметров и глубин, где важна производительность, тогда как кольцевое сверление подходит для больших и сверхбольших отверстий, обеспечивая экономию ресурсов. Кинематика с вращением заготовки предпочтительна для сверхглубоких отверстий, где требуется высокая прямолинейность оси. Совместное вращение заготовки и инструмента эффективно для твердых материалов, а вращение инструмента — для крупных деталей с возможностью коррекции подачи. Применение современных методов контроля и оптимизация режимов резания позволяют значительно повысить качество обработки глубоких отверстий в машиностроении.

Литература

- [1] Зубарев Ю.М., Вебер А.В., Афанасенков М.А. *Режущий инструмент*. Санкт-Петербург, Лань, 2024, 153 с.
- [2] Кожевников Д.В. *Современная технология и инструмент для обработки глубоких отверстий*. Москва, НИИМаш, 1981, 60 с.
- [3] Уткин Н.Ф. *Обработка глубоких отверстий*. Ленинград, Машиностроение, 1988, 269 с.
- [4] Смирнов Д.В. *Технология глубокого сверления: методы и техники*. Москва, Наука, 2018, с. 120–150.
- [5] Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. *Режущий инструмент*. Москва, Машиностроение, 2022.

Influence of kinematic schemes on the quality of deep drilling of holes of various depths and diameters

Antipova Anzhelika Evgenievna

antipovaae@student.bmstu.ru

Vyatkin Andrey Gennadievich

vyatkin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The main deep drilling methods — solid and annular — are considered, along with the influence of kinematic schemes on the quality of machining holes with a depth-to-diameter ratio exceeding 5. Data on the classification of holes by diameter and depth are presented, and the specifics of machining are analyzed, taking into account cutting conditions and tool design. It is shown that the choice of kinematics significantly affects accuracy, tool durability, and surface roughness. Conclusions are drawn that the optimal kinematic scheme depends on the hole size and depth and can be applied to enhance productivity and quality in mechanical engineering.

Keywords: deep drilling, kinematic schemes, machining accuracy, solid drilling, annular drilling

УДК 621.74.04

Исследование методов получения заготовок литьем

Фалендыш Виктор Андреевич lfalendysh@mail.ru
Бысов Сергей Александрович bysov.s@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Приведено сравнение различных способов получения заготовок при помощи литья, рассмотрены такие подходы, как литье в песчано-глинистые формы, литье в оболочковые формы, литье в металлические формы (кокили), центробежное литье. Для каждого метода изучено влияние параметров процесса на характеристики получаемых заготовок. На основе проведенных исследований сделаны выводы о преимуществах и ограничениях. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных технологий для получения определенных типов заготовок.

Ключевые слова: методы литья, производственные условия, производство заготовок, производительность литья, точность заготовок

Литье представляет собой один из основных способов производства металлических заготовок и широко используется в различных отраслях промышленности. Этот процесс дает возможность создавать детали сложной конфигурации с высокой точностью, а также снижать затраты на последующую механическую обработку. Изучение методов получения заготовок литьем охватывает как традиционные технологии, так и современные подходы, что способствует оптимизации производственных процессов и повышению качества конечной продукции.

Ключевым резервом для повышения производственной эффективности является уменьшение материалоемкости и трудоемкости. Достигнуть этого можно только заменив устаревшие методы обработки на более современные и прогрессивные, а также внедряя новые, высокоточные технологии для получения заготовок. С помощью литья изготавливаются отливки как простой, так и сложной формы, включая изделия с внутренними полостями. Вес отливок может варьироваться от нескольких граммов до сотен тонн. Ключевой задачей литейного производства является получение отливок, форма и размеры которых максимально приближаются к требованиям готовой детали, что значительно уменьшает объем последующей механической обработки [1].

Литье в песчаную литейную форму представляет собой процесс, при котором металлический расплав заливается в форму, изготовленную из песчаной формовочной смеси. Этот метод является наиболее распространенным и универсальным способом получения отливок, подходящим для изделий различной массы и формы, от нескольких граммов до нескольких тонн. Основное влияние на точность размеров и шероховатость поверхности отливок оказывают используемые материалы, качество формовочных смесей и свойства литейного сплава [2]. Преимущества данного метода включают возмож-

ность создания сложных форм и относительно низкие затраты на формы по сравнению с металлическими. Однако существуют и недостатки, такие как высокий расход формовочных материалов, большие припуски на механическую обработку и более низкое качество отливок, что ведет к увеличению литейного брака. В результате область применения данного способа сужается, уступая место более современным методам литья с лучшими характеристиками и качеством.

Литье в оболочковые формы — это современный метод, при котором расплавленный металл заливается в тонкостенные сборные литейные формы, изготовленные из оgneупорных материалов и органических связующих. Эти формы имеют стенки толщиной от 5 до 15 мм и изготавливаются по модельной оснастке, что позволяет получать отливки с высокой точностью и качеством поверхности. Метод литья в оболочковые формы позволяет производить ответственные детали, такие как ребристые цилиндры, коленчатые валы, зубчатые колеса и другие изделия из различных металлов, включая чугун и легированные стали [3]. Он обладает высокой производительностью, что делает его оптимальным для серийного и крупносерийного производства, обеспечивая размерную точность отливок в интервале от 100 до 4000 мм.

Литье в кокиль представляет собой метод, при котором расплавленный металл заливается в металлическую форму, называемую кокилем. Эти формы обладают высокой прочностью и могут использоваться многократно. Литье в кокиль позволяет получать отливки с высокой точностью и качеством поверхности и применяется при производстве деталей из алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов, а также медных и некоторых тугоплавких материалов. Метод литья в кокиль обеспечивает множество преимуществ, таких как высокая точность размеров отливок, снижение шероховатости поверхности и возможность экономии на механической обработке. Тем не менее, существует и ряд недостатков, включая сложность получения деталей с поднутрениями, высокую стоимость металлических форм и ограниченную стойкость при литье стали [4]. В условиях массового или крупносерийного производства использование кокиля становится особенно целесообразным и позволяет значительно повысить эффективность производства.

Центробежное литье — это метод, при котором расплавленный металл заливается во вращающуюся форму, и благодаря центробежным силам формируются отливки, особенно изделия типа тел вращения. Этот способ наиболее эффективен при серийном производстве, включая такие изделия, как трубы, втулки, цилиндрические гильзы и детали автомобильной и тракторной техники. Он позволяет достигать высокой плотности отливок и минимизирует количество межкристаллических пустот, что по своим характеристикам делает центробежные отливки сопоставимыми с поковками. Преимущества метода включают снижение расхода металла за счет отсутствия литниковой системы, исключение затрат на стержни и улучшение заполняемости формы [5]. Однако для получения качественных отливок требуется использование специализированного оборудования, а также могут возникнуть проблемы

с точностью размеров и загрязнением поверхности отливок, что увеличивает требуемые припуски на механическую обработку.

Производство отливок из сплавов с различными физическими свойствами, размерами и уровнями сложности невозможно осуществить, используя только один метод. Выбор способа изготовления отливки представляет собой сложную задачу с множеством вариантов, поскольку разные технологии могут эффективно удовлетворять технические и экономические требования к детали. Оптимальный метод производства определяется исходя из конкретных условий и требований, предъявляемых к конечному изделию.

Литература

- [1] Зубарев Ю.М. Методы получения заготовок в машиностроении и расчет припусков на их обработку. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 256 с.
- [2] Тюняев А.В. Основы конструирования деталей машин. Литые детали. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 192 с.
- [3] Волков Д., Волков А.Д., Ефименко А.В. Литье в оболочковые формы и его универсальность в мелкосерийном и серийном производстве. Литейщик России, 2016, № 4, с. 26–30.
- [4] Производство и механическая обработка заготовок. Литые заготовки. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2016, 88 с.
- [5] Сенопальников В.М., Сивков В.Л., Гейко М.А. Технология специальных видов литья. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014, 155 с.

Investigation of methods for obtaining blanks by casting

Falendysh Viktor Andreevich

lfalendysh@mail.ru

Bysov Sergey Alexandrovich

bysov.s@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article compares different methods of producing blanks using casting. Such approaches as sand-clay casting, shell casting, metal casting (coquille), and centrifugal casting are considered. For each method, the effect of process parameters on the characteristics of the resulting blanks has been studied. Based on the conducted research, conclusions are drawn about the advantages and limitations. Recommendations have been developed on the selection of optimal technologies for the production of certain types of blanks.

Keywords: casting methods, production conditions, production of blanks, casting productivity, precision of blanks

УДК 004.94

Сравнение «прогонов» имитационной модели участка механической обработки в среде AnyLogic

Борисов Сергей Андреевич borisov123467@yandex.ru
SPIN-код: 3493-8290

Малышев Евгений Николаевич malen@bmstu.ru
SPIN-код: 3167-1190

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено создание tandem'a имитационной модели и эксперимента сравнения «прогонов», репрезентирующих функционирование участка механической обработки. Приведены роли элементов диаграммы процессов. Описаны предшествующие сопоставлению действия, связанные с параметрами, наборами данных и элементами управления. Представлены фрагменты простого эксперимента, сравнение «прогонов» и отклики. Произведен анализ результатов. Сделан вывод о зависимости заготовки и численностей заготовок и деталей от времени между прибытиями заготовок, продолжительностей обработки и вероятности принятия детали в качестве годной на этапе контроля.

Ключевые слова: производственный процесс, участок механической обработки, имитационное моделирование, эксперимент, AnyLogic

AnyLogic делает возможным конструирование систем, способных работать с неявной статистикой, сводящих к минимуму трудоемкий расчет, замещающих дорогостоящую реализацию, позволяющих использовать несвойственные реальным машинам значения. Фундируемая разнообразными сочетаниями имитационных подходов первичная многослойность инструмента AnyLogic критически расширяется надстроичным комплексом численных экспериментов. Простой эксперимент преимущественно визуализирует деятельность, не предоставляя возможности достаточно оперативно и эргономично получать множество выходных показателей. Сравнение «прогонов» оформляет элементы управления параметрами и строит репрезентативные графики с обновлением легенд, отстраняясь от вывода лишней информации. Симуляция поведения производственных структур есть востребованная составляющая планирования, прогнозирования, регулирования многосторонних связей.

Участок механической обработки — совокупность 13 единиц технологического оборудования. Заготовки (отливки) привозятся транспортерами после отжига. Деталь-представитель проходит 8 операций обработки, проверяется в отделе технического контроля и покидает помещение.

Наглядное представление привносит дополнительные свойства, оказывающие влияние на глубину и реалистичность. На полотно интерфейса наносятся *Стены* (оконтуренная площадь пола со сквозной дорогой), *Стеллаж*

(временное пребывание заготовок до передачи краном), *Точечные Узлы* (закрепление обрабатывающих центров), *Стреловые Краны* (перемещение заготовок и деталей), *Прямоугольные Узлы* (стоянка транспортеров и место генерации заготовок снаружи, промежуточные склады и место уничтожения деталей внутри), *Пути* (сеть движения вилочных погрузчиков) и *Мостовой Кран* (однонаправленное транспортирование объектов производства между разделенными дорогой областями). Внедряются 3D-паллеты и потенциально приводимые в действие работники-операторы, верстаки, конвейеры, тары для стружки и т. д.

Диаграммы, состоящие из блоков библиотек, объединяют компоненты разметки. Заготовка-деталь, вилочный погрузчик и единица оборудования вводятся корреспондирующими *Типами Агентов*. *ResourcePool* содержит в себе множество *Агентов*, *Source* генерирует заготовки [1]. *RackStore* передает заготовки в *Стеллаж* с использованием транспортеров-ресурсов, *Delay* задерживает заготовки в складах. *SelectOutput* и *SelectOutput5* проверяют условия для распределения заготовок по рабочим местам, *MoveByCrane* перемещает заготовки и детали с захватом крана. *Service* «обрабатывает» заготовки [2]. *RestrictedAreaStart* и *RestrictedAreaEnd* лимитируют количество заготовок и деталей, одновременно находящихся в ветвях операций.

Динамическое изменение значений обеспечивается элементами управления. Имена привнесенных на данном этапе *Параметров* указываются в полях блоков (время между прибытиями *Source*, время задержки *Service*, вероятность выхода true *SelectOutput*). Для времен обработки типом управления назначаются, например *Бегунки*, для вероятности оценки и времени между генерациями — *Текстовые Поля*. Именно они самостоятельно добавляются в будущее сравнение «прогонов». Следующими связываются с вышеупомянутыми *Параметрами* нововведенные *Бегунки*, отображаемые только в окне агента Main (простой эксперимент).

Столбиковая Диаграмма (коллекционер значений “*Source.count()*” и т. п.) демонстрирует количественные сведения о заготовках, годных деталях и браке [3]. *Временной График* подходит для отслеживания сдельной заработной платы. Для хранения и передачи ему чисел используются *Переменные (Integer)*, действия типа “*Variable += S*” (*S* — выплата за одну деталь) в строках «При выходе» блоков *Service* и наименования *Переменных* в разделе «Данные» *Временного Графика*. Интенция на сравнение «прогонов» удовлетворяется применением *Наборов Данных* со схожими ссылками. Начальные и конечные фрагменты проекта представлены на рис. 1.

Основной недостаток простого эксперимента — многократное воспроизведение. Подобное преодолевается сравнением «прогонов»: после отбора в окне-мастере параметров и диаграмм с типом «набор данных» и значениями “*root.DataSet*” в появившейся вкладке автоматически формируются *Временные Графики*, *Текстовые Поля* и *Бегунки* [4]. Некоторое их сочетание приводится на рис. 2. Решения зафиксированы в таблице.

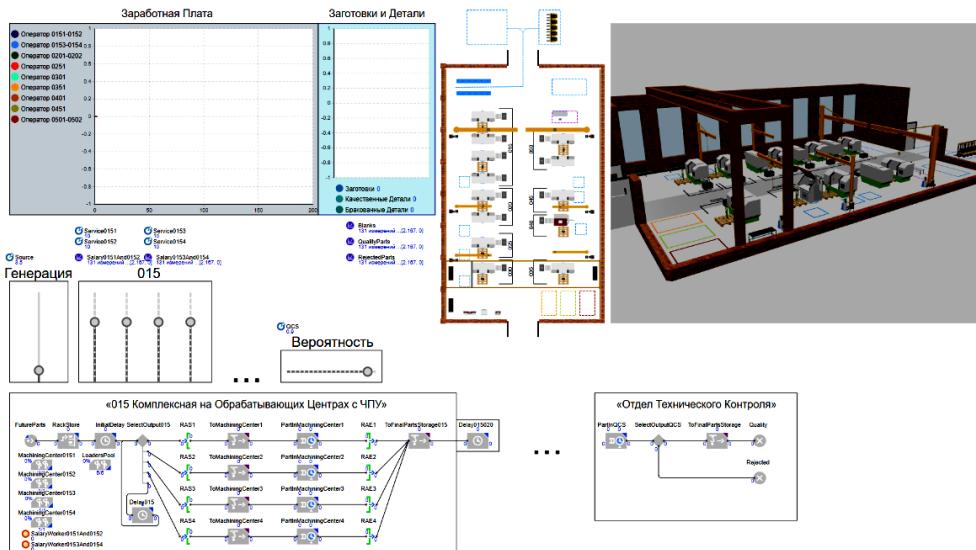


Рис. 1. Фрагменты модели в простом эксперименте

Сравнение

Количество прогонов: 12

Параметры:

Service0151: 5

Service0152: 5

Service0153: 5

Service0154: 8

Service0201: 13

Service0202: 13

Service0251: 7

Service0301: 8

Service0351: 4

Service0401: 11

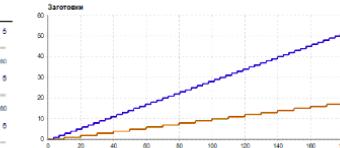
Service0451: 0

Service0501: 9

Service0552: 9

Source: 10

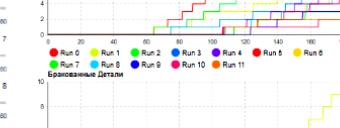
QCS: 0.5



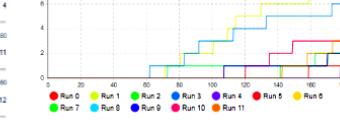
Заготовки



Заработная Плата 0151 0152



Заработная Плата 0251



Заработная Плата 0401

Рис. 2. Сравнение «прогонов» модели участка механической обработки

Результаты эксперимента

<i>t</i>	<i>P</i>	<i>H</i>	3	ЗП 0151-0152	ЗП 0153-0154	ЗП 0201-0202	ЗП 0251	ЗП 0301	ЗП 0351	ЗП 0401	ЗП 0451	ЗП 0501-0502	КД	БД
3,5	0,9	А	51	1150	900	1330	330	240	190	665	900	425	15	1
3,5	0,5		51	1150	900	1330	330	240	190	665	900	425	7	9
10	0,9		17	800	0	525	225	180	140	490	650	325	10	2
10	0,5		17	800	0	525	225	180	140	490	650	325	6	6
3,5	0,9	Б	51	900	850	665	180	132	100	350	350	150	5	1
3,5	0,5		51	900	850	665	180	132	100	350	350	150	3	3
10	0,9		17	800	0	490	165	132	100	315	350	150	5	0
10	0,5		17	800	0	490	165	132	100	315	350	150	3	2
3,5	0,9	В	51	1650	500	630	195	144	110	280	300	125	5	0
3,5	0,5		51	1650	500	630	195	144	110	280	300	125	3	2
10	0,9		17	850	0	525	195	132	100	280	300	125	5	0
10	0,5		17	850	0	525	195	132	100	280	300	125	2	3

Обозначения: *t* — время между генерациями заготовок; *P* — вероятность оценки детали в качестве годной; *H* — набор значений времен обработки (классический А: 10, 10, 10, 10, 4, 4, 2, 1, 2, 1, 1, 5, 5; Б: 15, 15, 14, 14, 11, 11, 8, 1, 9, 2, 11, 13, 13; В: 5, 5, 6, 6, 13, 13, 7, 8, 4, 11, 12, 9, 9); 3 — количество заготовок; ЗП — заработка платы; КД — количество качественных деталей; БД — количество бракованных деталей. Продолжительность 180 мин

При увеличении *t* на 185,7 % З уменьшается на 66,6 %, ЗП уменьшается в среднем на 45,6 % (А), 31,9 % (Б) и 36,2 % (В). При *t* = 10 мин и наборе А ЗП 0153–0154 равняется 0, так как заготовки, своевременно обрабатываемые в группе 0151–0152, не переходят к 0153–0154. Допускается вывод последней по причине ненадобности. Иной выход — равномерное распределение красном. Сходные отклики получены для Б и В с соответствующим *t*. Таким образом, увеличение времени между генерациями заготовок отрицательно сказывается на средней заработной плате.

При уменьшении *P* на 44,4 % среднее КД уменьшается на 48 % (А), 40 % (Б) и 50 % (В). КД+БД в смежных строках с одинаковым *t* равны. Следовательно, уменьшение вероятности оценки детали в качестве годной приводит к уменьшению среднего количества качественных деталей и увеличению среднего количества бракованных деталей.

t = 3,5 мин, *P* = 0,9: при увеличении среднего времени обработки на 110,7 % средняя ЗП уменьшается на 40 %, КД+БД уменьшается на 62,5 % (А–Б); при уменьшении среднего времени обработки на 21,1 % средняя ЗП увеличивается на 6,9 %, КД+БД уменьшается на 16,6 % (Б–В).

t = 10 мин, *P* = 0,9: при увеличении среднего времени обработки на 110,7 % средняя ЗП уменьшается на 24,9 %, КД+БД уменьшается на 58,3 % (А–Б); при уменьшении среднего времени обработки на 21,1 % средняя ЗП увеличивается на 0,1 %, КД+БД не изменяется (Б–В). Изменение среднего времени обработки вызывает неоднозначные результаты как в стро-

ках, так и в столбцах. Необходимо принимать во внимание узкие места, начисление части ЗП в момент выхода детали из станка и взаимодействие времени обработки с t .

Модель непротиворечива в первом приближении. Дальнейшие изыскания в «локусах» и имплементация диаграммы Гантта гарантируют более полное представление о скрытых процессах.

Литература

- [1] Лимановская О.В., Алферьева Т.И. *Моделирование производственных процессов в AnyLogic 8.1: Лабораторный практикум*. URL: https://www.anylogic.ru/upload/Books_ru/modelirovaniye-proizvodstvennyh-processov-v-anylogic-8.1.pdf (дата обращения 15.02.2025).
- [2] Лимановская О.В. *Имитационное моделирование в AnyLogic 7. Часть 1*. URL: https://www.anylogic.ru/upload/Books_ru/imitacionnoe-modelirovaniye-v-anylogic-7-chast-1.pdf (дата обращения 15.02.2025).
- [3] Куприяшкин А.Г. *Основы моделирования систем*. URL: https://www.anylogic.ru/upload/pdf/osnovi_modelirovaniya_sistem.pdf (дата обращения 15.02.2025).
- [4] Григорьев И. *AnyLogic за 3 дня: практическое пособие по имитационному моделированию*. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/free-simulation-book-and-modeling-tutorials/> (дата обращения 15.02.2025).

Compare runs experiment of machining department simulation model in AnyLogic environment

Borisov Sergey Andreevich

borisov123467@yandex.ru
SPIN-code: 3493-8290

Malyshev Evgeniy Nikolaevich

malen@bmstu.ru
SPIN-code: 3167-1190

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The creation of simulation model and compare runs experiment tandem representing the functioning of a machining department is considered. The roles of process flowchart elements are given. The pre-comparison actions related to parameters, data sets and controls are characterized. The fragments of a simple experiment, the runs comparison and responses are presented. The results are analyzed. The conclusion is drawn about the dependence of wage rates and the numbers of blanks and parts on blank interarrival time, processing times and probability of taking part as good-quality at the control stage.

Keywords: manufacturing activity, machining department, simulation modelling, experiment, AnyLogic

УДК 621.771

Сравнительный анализ методов изготовления заготовки

Губанов Ярослав Алексеевич gubanovyaa@student.bmstu.ru

Малышев Евгений Николаевич malen@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен сравнительный анализ методов изготовления заготовки. Проведено углубленное исследование разнообразных технологических подходов, применяемых в современном производственном процессе. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого из методов и значимость оптимального метода изготовления заготовки. Статья будет полезна для специалистов, занимающихся разработкой и проектированием заготовок различными методами с целью выявления конечной стоимости, качества и эксплуатационные характеристики готового изделия.

Ключевые слова: заготовка, методы, литье, штамповка, аддитивные технологии

В машиностроении заготовкой называют исходный материал, который в процессе производства преобразуется в деталь путем изменения формы, размеров, свойств поверхности или материала. Заготовительное производство является ключевым начальным этапом любого машиностроительного процесса и представляет собой первую стадию технологической обработки.

Существуют различные виды заготовок: литье, полученные обработкой давлением (кованые и штампованные), из проката, сварные и комбинированные, а также изготовленные методами порошковой металлургии.

Литье позволяет создавать заготовки практически любых размеров и сложности из различных металлов и сплавов [1]. Литье — это древнейший и фундаментальный производственный процесс, позволяющий создавать изделия сложной формы путем заливки расплавленного материала в специально подготовленную форму. Этот метод, известный человечеству на протяжении тысячелетий, до сих пор сохраняет свою актуальность благодаря своей универсальности и способности производить детали различных размеров и конфигураций. Процесс литья начинается с изготовления формы, в которую будет заливаться расплавленный металл, пластик или другой материал. Формы могут быть одноразовыми, изготовленными из песка и связующих веществ, или многоразовыми, выполненными из металла или керамики. Выбор материала формы зависит от типа отливаемого материала, требуемой точности и серийности производства.

После подготовки формы, расплавленный материал заливается в полость. Этот этап требует тщательного контроля температуры и скорости заливки, чтобы избежать дефектов, таких как пористость, трещины и неравномерная усадка. После остывания и затвердевания материала, форму разрушают (в случае одноразовых форм) или раскрывают, извлекая готовую отливку. Завершающим этапом является обработка отливки, включающая удаление

литников и прибылей, очистку поверхности и, при необходимости, механическую обработку для достижения требуемых размеров и шероховатости. Литье широко используется в автомобильной, авиационной, судостроительной и других отраслях промышленности, обеспечивая производство деталей двигателей, корпусов, элементов конструкций и многих других компонентов.

Обработка металлов давлением используется для получения кованых и штампованных заготовок, а также машиностроительных профилей.

Ковка применяется в основном в единичном и мелкосерийном производстве, а также для создания крупных и уникальных заготовок с особыми требованиями к материалу [2].

Штамповка позволяет изготавливать заготовки, близкие по форме к готовой детали. Механические свойства заготовок, полученных обработкой давлением, обычно выше, чем у литых. Заготовки из проката используются в единичном и серийном производстве [3].

Штамповка, как технологический процесс, представляет собой формоизменение материала под воздействием давления с использованием специального инструмента — штампа. Этот процесс применяется для изготовления деталей различной конфигурации и размеров из листового или объемного материала. Процесс штамповки состоит из нескольких этапов: подготовка материала, установка заготовки в штамп, приложение усилия к штампу для деформации материала, извлечение готовой детали.

Сварные и комбинированные заготовки состоят из отдельных элементов, соединенных сваркой, что упрощает создание сложных конструкций. Заготовки, изготовленные методами порошковой металлургии, могут соответствовать готовым деталям и требовать минимальной обработки. Заготовки из конструкционной керамики используются для деталей, работающих в условиях высоких температур или агрессивных сред.

Современные технологии «выращивания» деталей, известные как аддитивные технологии, позволяют создавать изделия послойно на основе 3D-моделей. 3D-принтеры, аналогичные станкам с ЧПУ, применяются для «выращивания» деталей сложной формы и печати литейных форм.

Применение 3D-печати позволяет создавать образцы деталей для проверки, изготавливать формообразующие элементы и пресс-формы, сокращать время и затраты на подготовку производства, а также получать детали сложной конфигурации [4].

В отличие от традиционных методов обработки, аддитивные технологии не требуют сложной технической подготовки предприятия и широкой номенклатуры оборудования. При выборе 3D-принтера необходимо учитывать технологии печати, точность оборудования, используемые материалы и объем рабочей камеры [5].

Для произведения сравнительного анализа необходим чертеж детали, чтобы произвести комплексное исследование по выбору оптимального метода получения детали типа «корпус подшипника». А также необходимо определиться с типом производства детали.

Детали типа «Корпус» очень распространены в машиностроении и обычно имеют большую партию изделий, для расчета и анализа проектирования заготовок типа «Корпус» примем партию деталей в 5000 шт., а соответственно и тип производства крупносерийный [6].

Также необходимо произвести анализ материала детали, а также рассмотреть аналоги, для возможности расширить вариации использования методов для изготовления детали [7].

Сталь 20 — это конструкционная углеродистая качественная сталь, широко применяемая в промышленности. Ее популярность не уступает стали 09Г2С, хотя по техническим и эксплуатационным характеристикам между этими марками существует заметная разница. Сталь 20 применяется главным образом для производства деталей, сварных конструкций, в строительстве, машиностроении, но полный список отраслей ее применения занял бы несколько страниц текста. Практичность стали этой марки позволяет ей занимать одно из лидирующих положений на рынке среди металлов черного проката.

Аналог материала для использования литейных методов получения детали — Сталь 22Л ГОСТ 977–88.

Нелегированная сталь 20Л используется для изготовления фасонных отливок изделий машиностроения путем выплавляемых моделей, лито-сварных конструкций, работающих в интервале температур — арматура, шаботы, другая продукция.

Литература

- [1] Фролов К.В. *Искусство Машиностроение. Энциклопедия*. Москва, Машиностроение, 2004, 833 с.
- [2] Синицкий О.В. *Моделирование процессов ОМД*. Магнитогорск, МГТУ, 2009.
- [3] *Марочник сталей и сплавов*. Москва, 2014, 1216 с.
- [4] Кокорин В.Н., Мертенс К.К., Титов Ю.А., Григорьев А.А. *Технологические расчеты в процессах холодной листовой штамповки*. Ульяновск, УлГТУ, 2002, 36 с.
- [5] Килов А.С. *Обработка материалов давлением в промышленности*. Оренбург, ОГУ, 2003, 154 с.
- [6] Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. *Кузнечно-штамповочное оборудование*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 577 с.
- [7] Кобелев А.Г. *Теория и технология процессов ковки и прессования: Составление чертежа поковки и разработка технологии ковки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 28 с.

Comparative analysis of the methods of workpiece manufacturing

Gubanov Yaroslav Alekseevich

gubanovyaa@student.bmstu.ru

Malyshev Evgeny Nikolaevich

malen@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article considers a comparative analysis of the methods of workpiece manufacturing. An in-depth study of various technological approaches used in the modern production process is carried out. The advantages and disadvantages of each method and the importance of the optimal method of workpiece manufacturing are considered. The article will be useful for specialists involved in the development and design of blanks by various methods in order to identify the final cost, quality and performance characteristics of the finished product.

Keywords: billet, methods, casting, stamping, additive technologies

УДК 621.96

Сравнительный анализ основных методов резки металлов

Синяев Кирилл Алексеевич

kirill.siniaiev@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен сравнительный анализ четырех основных методов резки металлов: газовой, плазменной, лазерной и гидроабразивной. Рассмотрена их особенности, преимущества и недостатки, а также области применения. В заключении сделан вывод о том, что выбор метода резки зависит от требований к качеству, точности и размеру деталей, а также от экономических и технических факторов. Статья может быть полезна для специалистов в области металлообработки, инженеров, технологов и руководителей предприятий, работающих с различными видами металлов и сплавов.

Ключевые слова: резка металлов, плазменная резка, газовая резка, лазерная резка, гидроабразивная резка, точность резки, выбор метода резки

В процессе изготовления деталей машин, строительных металлоконструкций и прочих металлоизделий из листового металла используют как классические ручные и механизированные способы резки, так и современные автоматизированные методы с применением станков ЧПУ. Выбор технологии зависит от химического состава сплава, его теплопроводности, текучести, пластичности и хрупкости, требуемого качества и точности реза, размера листов и прочих технических условий.

Среди наиболее распространенных ручных и автоматизированных технологий раскроя в современной промышленности используется четыре наиболее доступных видов резки металла.

1. *Газовая*. Высокотемпературная струя пламени расплавляет металл в точке контакта. Для этого используют пропан или ацетилен, которые сгорают в среде чистого кислорода. Это может быть как ручная, так и автоматизированная резка.

Газовый раскрой металла основан на его способности сгорать в кислородной среде при высокой температуре (1200 °C). С помощью газовых резаков раскраивают металл и обрабатывают его кромки перед сваркой. Ручные газовые резаки используют в местах, где нельзя применить высокоточные станки и традиционные гильотины. Газом режут средне- и низколегированную сталь, трубы и крупные строительные конструкции. Преимущество газовой резки — возможность обработки толстых листов (до 300 мм), недостаток — большая ширина реза (более 2,0 мм) [1].

2. *Плазменная*. На металл воздействует струя плазмы, температура которой в зависимости от разрезаемого материала может достигать +30000 °C, а скорость плазменного потока около 1500 м/с. Плазма выдувает расплав, оставляя чистые и аккуратные края реза. Плазменной резкой можно обраба-

тывать различные металлы, включая углеродистую и легированную сталь, чугун, медь и алюминий. Плазморезом можно разрезать металлические листы толщиной до 200 мм ручным и автоматизированным способами [2].

Преимущество плазменной резки в высокой скорости и возможности получения сложных форм. Главный недостаток — высокотемпературное воздействие, при котором металл или компоненты сплава выгорают, а также происходит изменение структуры кристаллической решетки и цвета по линии обработки с нарушением изначальных параметров твердости.

3. Лазерная. Этот метод резки металла схож с плазменным, за исключением того, что вместо струи плазмы расплавление металла производится высокомощным лучом лазера, которым можно раскраивать металлические листы до 20 мм. Отличительная черта — возможность обработки крайне хрупких и тонких листовых материалов.

Лазерный луч отличается когерентностью, направленностью и монохроматичностью, что позволяет ему расплавлять металл с высокой точностью. Для резки толстых металлических листов применяется газ, выдувающий расплав и тем самым снижающий энергопотребление оборудования. В качестве дополнительного газа может использоваться кислород, который выжигает расплав.

Основные преимущества лазерной резки включают высокую скорость, отсутствие наплавов и окалины, возможность работы с тонкими и хрупкими материалами, минимальные деформации заготовки и тонкий раскрой сложных форм. Толщина реза может достигать от 0,1 мм. Экономические и эксплуатационные преимущества включают минимум потерь материала, низкие трудозатраты и средние энергозатраты [3].

Основным недостатком является высокая стоимость оборудования и необходимость значительных первоначальных инвестиций. В связи с этим, для мелкосерийного производства металла, предприятия и мастерские часто обращаются к сторонним услугам лазерной резки.

Сфера применения лазерной резки металла практически не ограничена. Это включает в себя машиностроение, приборостроение, строительство, производство сувениров и рекламной продукции. Ограничение применения лазерной резки касается толщины металла — до 20–40 мм, хотя для достижения высокой точности резки и безупречных результатов требуются дополнительные настройки оборудования.

4. Гидроабразивная. В отличие от предыдущих способов резки металла, этот не предполагает высокотемпературного воздействия, что решает сразу несколько проблем металлообработки, связанных с выгоранием легирующих компонентов, короблением, появлением окалины, изменением цвета и т. п. Особенность этого метода в механическом воздействии тонкой струи воды, подаваемой под давлением до 6000 бар. Этого достаточно, чтобы разрезать мягкие металлы и сплавы с толщиной реза 0,5–1,5 мм. Для резки твердых металлов толщиной до 300 мм в поток воды добавляют мелкодисперсный абразив.

Преимущества включают улучшенное качество кромок, высокую точность и возможность обработки деталей со сложной геометрией. Этот метод подходит для работы с материалами, чувствительными к высоким температурам, и является экологически безопасным и пожаробезопасным. Скорость резки стали толщиной в 1 мм может достигать 2,7 метров в минуту, а производительность уменьшается с увеличением толщины материала [4].

В таблице представлено сравнение различных методов резки металлов. Каждый метод имеет свои особенности, преимущества и недостатки, и выбор оптимального способа зависит от типа металла, требуемой точности и качества резки.

Сравнение методов резки металлов

Критерий сравнения	Метод резки			
	Газовая	Плазменная	Лазерная	Гидроабразивная
Ограничение по максимальной толщине металла, мм	300	200	40	300
Материал	Средне- и низколегированная сталь	Черные и цветные металлы	Все металлы	Все материалы с низким коррозионным потенциалом
Качество	Плохое качество кромки	Высокое качество кромки	Отличное качество кромки	Высокое качество кромки
Производительность	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Стоимость оборудования	Дешевое оборудование	Дешевое оборудование	Дорогое оборудование	Дорогое оборудование

Литература

- [1] Голубев В.С., Лебедев Ф.В. *Лазерная техника и технологии. Инженерные основы создания технологических лазеров*. Москва, Высшая школа, 1988, 176 с.
- [2] Куликов О.Н., Еремин Е.Н., Родюков Д.А. *Основы технологии машиностроения*. Москва, Академия, 2013, 288 с.
- [3] Суслов А.Г., Дальский А.М. *Научные основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2002, 684 с.
- [4] Федоров А.А., Федоров А.А. Сравнительный анализ современных методов резки металлов. *Молодой ученый*, 2016, № 10, с. 244–247.

Comparative analysis of the main metal cutting methods

Sinyaev Kirill Alekseevich

kirill.siniaiev@mail.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

A comparative analysis of four main metal cutting methods is carried out: gas, plasma, laser and waterjet. Their features, advantages and disadvantages, as well as applications are considered. In conclusion, it is concluded that the choice of cutting method depends on the requirements for quality, accuracy and size of parts, as well as on economic and technical factors. The article may be useful for specialists in the field of metalworking, engineers, technologists and managers of enterprises working with various types of metals and alloys.

Keywords: metal cutting, plasma cutting, gas cutting, laser cutting, waterjet cutting, cutting accuracy, choice of cutting method

УДК 621.96

Проведение полного двухфакторного эксперимента по влиянию режимов резания и средств оснащения на отклонение от перпендикулярности

Синяев Кирилл Алексеевич

kirillsiniae@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено влияние режимов резания и средств оснащения на отклонение от перпендикулярности при лазерной резке тонколистового материала. Приведен план полного двухфакторного эксперимента с двумя уровнями факторов и последующий регрессионный анализ. Проанализирована важность точности изготовления деталей для повышения качества и снижения затрат. Сделан вывод о необходимости оптимизации режимов резания для достижения высокой точности без дополнительных операций. Работа будет полезна инженерам, технологам и студентам в области машиностроения.

Ключевые слова: двухфакторный эксперимент, режимы резания, лазерная резка, точность, отклонение от перпендикулярности, поверхность реза

При оптимизации технологического процесса изготовления детали учитывается рациональный выбор метода обработки, последовательности операций обработки, используемых оборудования, инструментов и приспособлений [1]. Рассматривая методы обработки тонколистового материала, можно выделить фрезерный, вырубной и метод лазерной резки. Лазерная резка имеет ряд преимуществ, если речь идет о точности детали не более 0,1 мм, по сравнению с другими методами обработки. К ним относятся: высокая скорость обработки, отсутствие затрат на инструмент, отсутствие необходимости специализированной оснастки, возможность быстрой перенастройки станка для обработки другой детали [2]. Однако, несмотря на все преимущества данного метода, существует ряд проблем, связанных с формированием контура деталей и точностью обработки. Использование лазера для обработки листовых материалов требует поиска решений ряда задач, касающихся качества поверхности реза (наличие грата (наплывов) на кромке реза, изменение цвета металла в результате перегрева материала) [3]. Актуальность этой темы обусловлена тем, что точность изготовления деталей играет ключевую роль в обеспечении качества и надежности изделий, а также в снижении затрат на их производство [4]. Основной целью данной работы является проведение анализа погрешностей ориентации поверхностей деталей, изготовленных лазерной резкой для повышения точности путем выбора режимов резания и средств оснащения.

Исследования проводились на базе АО «НПФ Сигма». В качестве оборудования применялась установка для лазерной резки PRIMA POWER PLATINO 1530. Для проведения эксперимента в качестве объекта исследова-

ния была выбрана заготовка из листового проката. Обработка осуществлялась на двух листах разной толщины при разных мощностях источника: I заготовка — 2 мм, 3000 Вт, II заготовка — 2 мм, 4000 Вт, III заготовка — 6 мм, 3000 Вт, IV заготовка — 6 мм, 4000 Вт.

Таблица 1

Факторы и интервалы их варьирования

	Нижний уровень (–)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+)	Интервал варьирования	Наименование фактора
x_1	2	4	6	2	s , мм (толщина листа)
x_2	3000	3500	4000	500	P , Вт (мощность источника)

Таблица 2

План эксперимента

Номер опыта (u)	Матрица планирования			
	x_0	x_1	x_2	x_1x_2
1	+	+	+	+
2	+	+	–	–
3	+	–	+	–
4	+	–	–	+

После выполнения эксперимента было произведено измерение расстояния n на каждой заготовке в 3 местах (рис. 1).

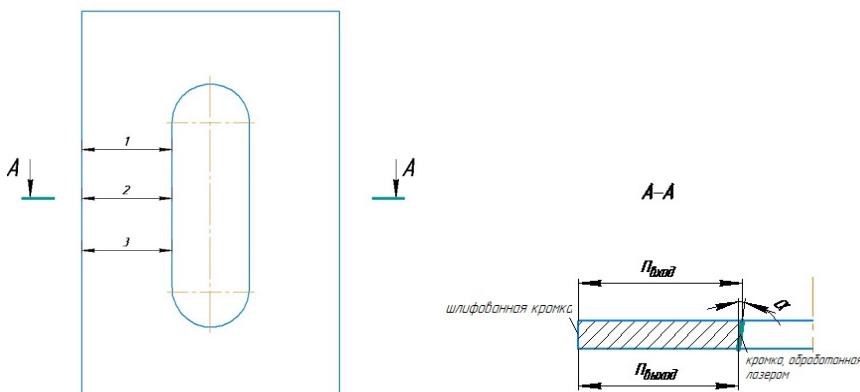


Рис. 1. Схема измерения заготовки

Проведем ПФЭ² для анализа значения отклонения от перпендикулярности n .

Таблица 3

ПФЭ²

N	$S, \text{мм}$ (x_1)	$P, \text{Вт}$ (x_2)	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S_i^2
1	6	3000	0,9	0,97	1,00	0,96	$2,63 \cdot 10^{-3}$
2	2	3000	0,6	0,5	0,52	0,54	$2,8 \cdot 10^{-3}$
3	6	4000	0,75	0,8	0,78	0,77	$0,63 \cdot 10^{-3}$
4	2	4000	0,45	0,38	0,47	0,43	$2,23 \cdot 10^{-3}$

После проведения расчетов, нахождения необходимых коэффициентов, успешных проверок об однородности дисперсии по G -критерию Кохрана, проверки статической значимости коэффициентов уравнения. Оно стало иметь следующий вид:

$$y = 0,68 + 0,19x_1 + 0,072x_2 + 0,018x_1x_2.$$

После проведения процедур упрощения и приведения подобных получим:

$$y = -0,204 + 0,095s + 0,000144P.$$

Уравнение регрессии показывает, что при лазерной резке листового проката из стали 10 на станке PRIMA POWER PLATINO 1530 влияние на отклонение от перпендикулярности в большей степени (2,63 раза) оказывает толщина заготовки, чем мощность источника. Совместное влияние толщины заготовки и мощности источника практически не оказывает влияния на отклонение от перпендикулярности. Знак «+» перед x_1 и x_2 говорит, что с увеличением исследуемых факторов, значение отклонения будет увеличиваться. Иными словами, с увеличением толщины заготовки и мощности пучка, угол между кромками соответственно увеличивается, что и влечет за собой отклонение от перпендикулярности.

В заключение можно сделать вывод, что лазерная резка является одним из наиболее точных и эффективных методов обработки материалов, однако даже при использовании этого метода могут возникать погрешности формы деталей. Одним из контролируемых параметров является отклонение от перпендикулярности, поскольку лазерный луч имеет конусообразную форму.

В работе был спланирован и проведен полный двухфакторный эксперимент по влиянию режимов резания и средств оснащения на отклонение от перпендикулярности; проведен регрессионный анализ отклонения от перпендикулярности в зависимости от режимов лазерной резки (толщина заготовки, мощность источника). Было получено уравнение регрессии, определяющее зависимость величины отклонения от перпендикулярности от выбранных факторов.

Литература

- [1] Шилов А.Л. *Основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2020, с. 45–46.
- [2] Долин Д.Ю. *Лазерная резка: новые технологии и применение*. Санкт-Петербург, Наука и Техника, 2018, с. 111–112.
- [3] Петрова М.В. *Качество обработки материалов: теория и практика*. Екатеринбург, Урал. гос. техн. ун-т, 2021, с. 78–79.
- [4] Зайцева Н.И. *Основы управления качеством в машиностроении*. Москва, Лань, 2022, 95 с.

Planning of a complete two-factor experiment on the influence of cutting modes and equipment on the deviation from perpendicularity

Sinyaev Kirill Alekseevich

kirill.siniaiev@mail.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article examines the effect of cutting modes and equipment on deviation from the perpendicular during laser cutting of thin-sheet material. The plan of a complete two-factor experiment with two levels of factors and subsequent regression analysis is presented. The importance of precision manufacturing of parts for improving quality and reducing costs is analyzed. The main conclusion suggests the need to optimize cutting modes to achieve high accuracy without additional operations. The work will be useful for engineers, technologists and students in the field of mechanical engineering.

Keywords: two-factor experiment, cutting modes, laser cutting, accuracy, deviation from perpendicularity, cut surface

УДК62

Перспективы использования цифровых двойников в машиностроении

Фокин Никита Игоревич fokinni@student.bmstu.ru

Калмыков Вадим Владимирович kalmykovvv@bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены ключевые аспекты виртуальных моделей оборудования и технологических процессов, особенно в контексте машиностроения. Описаны цифровые двойники, их влияние на машиностроение и смежные отрасли, а также практическое применение таких технологий. Особое внимание уделено преимуществам, возможным проблемам и перспективам развития этой области. Рассмотрены примеры успешного внедрения цифровых двойников, их роль в оптимизации производства, снижении затрат и повышении качества продукции.

Ключевые слова: цифровые двойники, машинное обучение, моделирование, автоматизация, промышленность

Сегодня цифровые технологии активно внедряются в различные сферы, включая промышленность и науку. Виртуальные модели становятся важным инструментом для оптимизации производства, снижения издержек и повышения эффективности работы предприятий.

Цель работы — рассмотреть перспективы применения цифровых двойников в машиностроении, их роль в оптимизации производственных процессов, снижении издержек и повышении эффективности работы предприятий.

Основные направления создания виртуальных моделей. Цифровой двойник представляет собой виртуальную реплику реального объекта или процесса, предназначенную для анализа его поведения, тестирования разных сценариев и прогнозирования изменений [1]. Эта технология активно применяется в машиностроении. Например, компания Boeing использует цифровые двойники для моделирования и тестирования авиационных конструкций, а Volvo применяет их для оптимизации процессов сборки и контроля качества автомобилей. Siemens активно использует цифровые двойники для оптимизации промышленных процессов.

Виртуальные модели технологических процессов позволяют не только анализировать, но и оптимизировать производство, а также автоматизировать его. Эти модели активно используются для проектирования новых конструкций, оценки прочности материалов и моделирования производственных линий. Например, компания Ford использует моделирование для улучшения сборочных процессов, а Airbus применяет цифровые симуляции для тестирования аэродинамических характеристик своих новых самолетов.

Искусственный интеллект помогает улучшать виртуальные модели с помощью анализа больших данных и предсказаний. В машиностроении ИИ

применяют для прогнозирования износа деталей, автоматической настройки параметров оборудования и оптимизации сборочных процессов. Это также помогает в прогнозировании поломок оборудования и снижении затрат на ремонт. Например, компания Caterpillar использует ИИ для предсказания необходимости обслуживания строительной техники, а BMW внедряет нейросети для контроля качества на своих производственных линиях.

Преимущества виртуальных моделей:

- снижение затрат — использование виртуальных моделей позволяет избежать затрат на создание физических прототипов, что существенно снижает как финансовые, так и временные расходы. Компании могут моделировать различные сценарии работы оборудования, оценивать их эффективность и находить оптимальные решения, не проводя реальные испытания;
- оптимизация процессов — виртуальные модели помогают выявлять узкие места в производственных линиях, прогнозировать возможные сбои и вносить корректировки в процессы в реальном времени. Это ведет к повышению эффективности, снижению отходов и улучшению качества выпускаемой продукции;
- повышение безопасности — виртуальное моделирование дает возможность предсказать потенциальные аварийные ситуации, проверять оборудование на предельные нагрузки и разрабатывать стратегии для предотвращения неисправностей и ошибок. Это особенно критично в машиностроении, где безопасность и надежность оборудования играют ключевую роль;
- гибкость и адаптивность — виртуальные модели обеспечивают быструю адаптацию конструкций оборудования или производственных процессов к изменяющимся требованиям рынка и новым технологиям. Это помогает предприятиям оставаться конкурентоспособными и ускоряет внедрение инноваций.

Проблемы и перспективы. Несмотря на явные преимущества, создание и внедрение виртуальных моделей сталкивается с несколькими проблемами. В России предпринимаются активные меры для их решения:

- высокие требования к вычислительным ресурсам — обработка сложных моделей требует мощного оборудования и ПО. В ответ на это российские предприятия машиностроения внедряют высокопроизводительные вычислительные центры. Например, Объединенная двигателестроительная корпорация (ОДК), входящая в Ростех, использует суперкомпьютеры для цифрового моделирования авиационных двигателей, что значительно ускоряет процесс проектирования и тестирования;
- нехватка квалифицированных специалистов — для создания и обслуживания виртуальных моделей необходимы высококвалифицированные инженеры и ИТ-специалисты. В ответ на эту проблему машиностроительные компании активно сотрудничают с вузами. Например, КАМАЗ совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана разрабатывает образовательные программы по цифровым двойникам, а Уралвагонзавод внедряет корпоративные курсы для обучения инженеров работе с виртуальными моделями [2];
- кибербезопасность — данные, использующиеся в цифровых моделях, нуждаются в защите от несанкционированного доступа. Для усиления безопасности в сфере машиностроения внедряются специализированные реше-

ния. Например, Уральский завод транспортного машиностроения использует отечественные системы кибербезопасности для защиты данных цифровых моделей бронетехники, а Ростех разрабатывает защищенные платформы для цифрового моделирования в оборонной промышленности.

Перспективы развития технологии включают совершенствование цифровых двойников, интеграцию с нейросетями и дальнейшее внедрение виртуальных моделей в машиностроение [3]. Наибольшую выгоду получат те отрасли, где цифровые модели могут значительно оптимизировать производство, снизить затраты на разработку новых конструкций и повысить качество продукции [4].

Заключение. Виртуальные модели оборудования и технологических процессов становятся важным инструментом для повышения эффективности производства. Они позволяют оптимизировать проектирование, снизить затраты и минимизировать риски. Развитие цифровых двойников, искусственного интеллекта и компьютерного моделирования способствует повышению точности и надежности технологических решений. Основные вызовы — это нехватка специалистов, высокие требования к вычислительным мощностям и кибербезопасность. Однако с активными усилиями для их преодоления открываются новые возможности для будущего.

Литература

- [1] Конягина М.Н. *Основы цифровой экономики*. Москва, Юрайт, 2024, 235 с.
- [2] *Национальные проекты России. Цифровая экономика*. URL: <https://национальныепроекты.рф/projects/tsifrovaya-ekonomika/> (дата обращения 23.03.2025).
- [3] Федорова О.С., Калмыков В.В. Основные статистические методы анализа результатов эксперимента. *Электронный журнал: наука, техника и образование*, 2016, № 1, с. 68–75. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26747498_20657784.pdf (дата обращения 23.03.2025).
- [4] Авдеева И.Л., Головина Т.А., Паракина Л.В. Цифровая трансформация экономических процессов: возможности и угрозы. *Финансовый бизнес*, 2020, № 1 (204), с. 3–7.

Prospects of using digital twins in mechanical engineering

Fokin Nikita Igorevich fokinni@student.bmstu.ru

Kalmykov Vadim Vladimirovich kalmykovvv@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article examines the key aspects of virtual models of equipment and technological processes, particularly in the context of mechanical engineering. It describes digital twins, their impact on mechanical engineering and related industries, as well as the practical application of such technologies. Special attention is given to the advantages, potential challenges, and development prospects in this field. The article also explores examples of successful implementation of digital twins, their role in optimizing production, reducing costs, and improving product quality.

Keywords: digital twins, machine learning, modeling, automation, industry

УДК 621.96

Моделирование одноимпульсного лазерного сверления в программе COMSOL Multiphysics 6.2

Гусакова Ксения Александровна

kseniya230402@yandex.ru

Журавлева Татьяна Александровна

juravleva.ta@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Смоделирован процесс лазерного одноимпульсного сверления на листах нержавеющей стали одной толщины с различными составами 08Х22Н6Т и 06ХН28МДТ, а также проведен анализ влияния длительности импульса на результаты сверления. Для проведения виртуальных экспериментов применяется программное обеспечение COMSOL Multiphysics 6.2, имитирующее действия неодимового (Nd:YAG) лазера. Статья может быть полезна для специалистов лазерной обработки при проектировании и изготовлении деталей из тонколистовых металлических материалов с отверстиями малого диаметра.

Ключевые слова: длительность импульса, компьютерное моделирование, лазерные технологии, нержавеющая сталь, одноимпульсное лазерное сверление, отверстия малого диаметра, теплопередача

В качестве объекта моделирования были приняты образцы нержавеющих сталей марок 06ХН28МДТ и 08Х22Н6Т толщиной 3 мм, длиной и шириной 10 мм.

Данные марки стали выбраны для исследования процесса, учитывая условие наличия материалов с различным химическим составом. Так, сталь 06ХН28МДТ имеет в своем составе высокое содержания никели и меди по сравнению с 08Х22Н6Т. Никель, в свою очередь, поглощает лазерное излучение не так эффективно, как другие металлы, что может требовать повышения входных параметров при одноимпульсной обработке. Медь имеет высокую теплопроводность, зачастую сплавы на основе этого элемента не обрабатывают из-за того, что теплота, генерируемая лазерным лучом, рассеивается [1]. Термофизические свойства используемых сплавов приведены в таблице.

Термофизические свойства используемых сплавов, необходимые для моделирования процесса [2]

Свойство	06ХН28МДТ	08Х22Н6Т	Единицы измерения
Плотность	7960	7600	кг/м ³
Теплопроводность	16,8	13,4	Вт/(м · К)
Удельная теплоемкость	16,7	10,9	Дж/(кг · °C)
Температура плавления	1400–1450	1370–1420	°C

Лазерный луч фокусировался на верхней поверхности образцов с размером пятна 240 мкм в диаметре. Ось отверстия направлена перпендикулярно поверхности образца.

Процедура оценки влияния каждого параметра заключалась в изменении только одного параметра (длительности импульса) в каждом teste, в то время как все остальные параметры оставались неизменными. Таким образом, можно лучше проследить зависимость влияния параметров обработки.

Материал нагревался лазерным лучом, направленным на поверхность, для получения желаемого локализованного отверстия.

Тепловое излучение лазера в центре пятна лазерного луча было представлено в виде гауссова профиля с максимальным тепловым потоком на верхней поверхности образца:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad [3],$$

где ρ — плотность материала заготовки; C — удельная теплоемкость; k — теплопроводность, зависящая от температуры; Q — распределенное тепловыделение; T — температурное поле как функция пространства и времени.

Предполагалось, что все остальные поверхности пластины термически изолированы от окружающей среды, т. е. не могли обмениваться тепловой энергией с окружающей средой. Материалы образцов при моделировании были выбраны из библиотеки программного обеспечения программы. Лазер работает на длине волны, при которой материал заготовки непрозрачен, и свет не проходит через него. Таким образом, весь тепловой поток лазера попадает на поверхность.

Результаты полученных значений входных и выходных диаметров для исследуемых образцов в зависимости от длительности импульса отражены на рисунке.

Диаметр и глубина отверстий увеличивались по мере увеличения пиковой длительности импульса.

Рассмотрим образец нержавеющей стали 06ХН28МДТ. Кратер был глухим до длительности импульса 1 мс, глубина отверстия увеличивалась по мере увеличения длительности импульса.

Достигнуть сквозной отверстия получилось лишь при значении 1,5 мс.

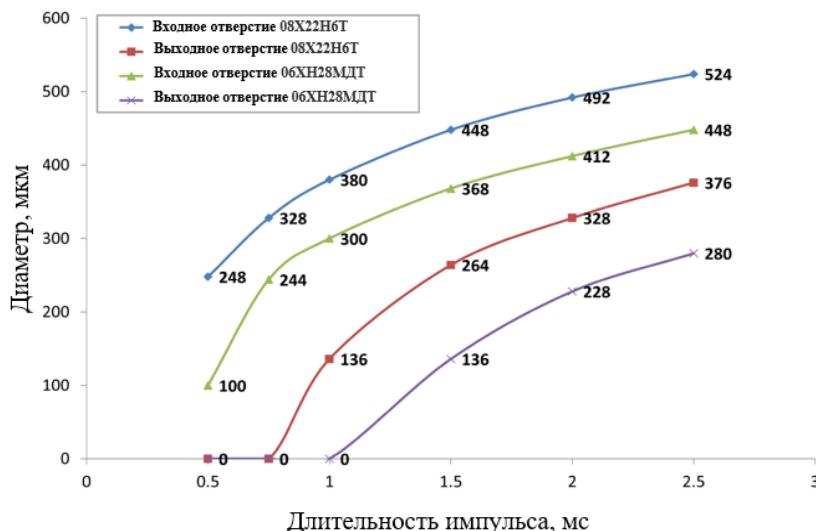
Рассмотрим образец нержавеющей стали 08Х22Н6Т. В этом случае кратер был глухим до значения длительности импульса равному 0,75 с.

Достигнуть сквозной отверстия получилось лишь при значении 1 мс.

Диаметры входных и выходных отверстий, полученных на образцах, стали 08Х22Н6Т являются большими, чем при обработке 06ХН28МДТ, при условии, что процесс выполнялся в одинаковых условиях. Увеличение диаметров входных и выходных происходит параболически.

Значение конусности при обработке 08Х22Н6Т приближается к 1, по мере увеличения длительности импульса что означает, что диаметр входного и выходного отверстий практически эквивалентен. Было замечено, что коэф-

фициент сужения при импульсе 1,5 мс длительность составляла 0,37, тогда как при длительности импульса 2,5 мс она достигала 0,71. Следовательно, это указывает на улучшение коэффициента конусности по мере увеличения длительности импульса.



Параметры входного и выходного отверстия в зависимости от длительности импульса при постоянной пиковой мощности 15 кВт

Полученные результаты связаны с разницей теплопроводности материалов. Сталь 06ХН28МДТ за счет большего содержания меди и никеля имеет выше теплопроводность, чем 08Х22Н6Т. Высокие значения теплопроводности способствуют большему рассеянию тепла, что может привести к снижению температуры в зоне резки. В свою очередь, это может замедлять процесс резки и ухудшает качество реза [4].

Литература

- [1] Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г. *Практика прецизионной лазерной обработки*. Москва, Техносфера, 2013, 696 с.
- [2] Сорокина В.Г., Гервасьева М.А., ред. *Стали и сплавы. Марочник: справочник*. Москва, Интермет инжиниринг, 2001, 608 с.
- [3] Лосев В.Ф., Морозова Е.Ю., Ципилев В.П. *Физические основы лазерной обработки материалов*. Томск, ТПУ, 2011, 199 с.
- [4] Безъязычный В.Ф., Крылов В.Н., Чарковский Ю.К., Шилков Е.В. *Технологические процессы механической и физико-химической обработки в машиностроении*. Санкт-Петербург, Лань, 2022, 432 с.

Simulation of single-pulse laser drilling in the COMSOL Multiphysics 6.2 program

Gusakova Kseniya Aleksandrovna kseniya230402@yandex.ru

Zhuravleva Tatiana Alexandrovna juravleva.ta@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

In this material, the process of single-pulse laser drilling on stainless steel sheets of the same thickness with different compositions 08H22N6T and 06KHN28MDT is modeled, and the influence of pulse duration on drilling results is analyzed. The COMSOL Multiphysics 6.2 software, which simulates the effects of a neodymium (Nd:YAG) laser, is used to conduct virtual experiments. The article may be useful for laser processing specialists in the design and manufacture of parts made of thin-sheet metal materials with small diameter holes.

Keywords: pulse duration, computer simulation, laser technology, stainless steel, single-pulse laser drilling, small diameter holes

УДК 658.51

Обзор методик экспертной оценки

Костышен Максим Олегович

kostyyshenmo@student.bmstu.ru

Мусохранов Марсель Владимирович

marsel@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлены некоторые существующие методики экспертной оценки. Рассмотрены суть и особенности данных методов экспертной оценки. Приведены основные этапы проведения экспертных оценок. Статья будет полезна для специалистов, занимающихся планированием и распределением операций, используя различные методы экспертной оценки, с целью выявления наиболее эффективного коэффициента загрузки оборудования, с наибольшей производительностью с сохранением требуемого качества и эксплуатационных характеристик готового изделия.

Ключевые слова: экспертная оценка, методы, токарные станки с ЧПУ, организация, производство

В непрерывно развивающемся мире машиностроение играет важную и решающую роль. Станки токарной группы до сих пор остаются актуальными в различных отраслях производства, например в машиностроении, металлургии, электронике, медицине и др.

На сегодняшний день существует множество различных моделей и типов токарных станков, что затрудняет процесс выбора. Каждое оборудование имеет свои особенности, от механических характеристик до программного обеспечения.

Токарные станки являются самыми распространенными станками на любом предприятии, на которых изготавливают основные детали, узлы и механизмы машин, приборов и аппаратов.

Постоянное развитие технологий обработки, таких как автоматизация процессов, использование числового программного управления (ЧПУ) и внедрение новых материалов, требует от предприятий постоянного обновления знаний о современных решениях и оборудовании. Обработка металлов давлением используется для получения кованых и штампованных заготовок, а также машиностроительных профилей.

Принцип работы метода аналитических иерархий (АИР). АИР работает по принципу сопоставления парных сравнений. Он использует систему сравнения попарно элементов, чтобы определить их относительную важность. Процесс АИР включает следующие шаги:

– разбивка проблемы на иерархию: проблема разбивается на иерархическую структуру, которая включает цель, критерии, подкритерии и альтернативы;

– создание матрицы парных сравнений: для каждого уровня иерархии создается матрица парных сравнений, где элементы сравниваются друг с другом по шкале относительной важности;

- получение весовых коэффициентов: из матриц сравнений вычисляются весовые коэффициенты для каждого элемента;
- консистентность и согласованность: проводится проверка консистентности матриц, чтобы убедиться, что оценки не противоречивы;
- расчет общего ранжирования: весовые коэффициенты всех элементов объединяются, чтобы получить общий рейтинг альтернатив [1].

Принцип работы метода SAW (метод взвешенных сумм). Метод SAW (метод взвешенных сумм) работает по принципу интеграции нескольких критериев для получения единой оценки альтернатив. Он позволяет учитывать разные аспекты и их важность в процессе принятия решения.

Он учитывает сразу несколько критериев, по которым оцениваются альтернативы. Каждому критерию присваивается вес, отражающий его значимость, что позволяет акцентировать внимание на более важных аспектах. Итоговая оценка для каждой альтернативы рассчитывается как линейная комбинация ее значений по всем критериям с учетом весов. Результаты формируют упрощенное представление о том, какая альтернатива наиболее предпочтительна на основе итоговых оценок [2].

Этапы метода SAW:

- определение альтернатив и критериев;
- нормализация данных;
- определение весов критериев;
- расчет взвешенной суммы;
- сравнение альтернатив.

Принцип работы метода Вики (VIKOR). Метод Вики (VIKOR) — это метод многокритериального принятия решений, призванный помочь в выборе оптимального варианта из множества альтернатив, учитывая различные критерии [3]. Основные этапы метода:

- определение критериев;
- критерии нормализации;
- расчет дистанции;
- определение признака;
- приоритизация альтернатив.

Метод эффективен для задач, где необходимо выбрать оптимальное решение при наличии противоречивых критериев.

Принцип работы метода PROMETHEE. Метод PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) — это подход к многокритериальному принятию решений, который позволяет упорядочить альтернативы по заданным критериям [4].

Основные этапы метода:

- определение критериев;
- сравнение альтернатив;
- расчет предпочтений;
- обобщение предпочтений;
- формирование рангов.

Принцип работы метода предпочтений. Метод предпочтений — это экспертный подход к многокритериальной оценке, который позволяет объединить мнения нескольких экспертов для выявления наилучших альтернатив по заданным критериям [5].

Этапы метода предпочтений:

- определение критериев;
- сбор мнений экспертов;
- сравнение альтернатив;
- коэффициенты предпочтений;
- агрегация результатов.

Литература

- [1] Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. Москва, Наука, 1973, 246 с.
- [2] Тихомиров А.В. Алгоритмы анализа телеметрической информации и поддержки принятия решений в системах автоматизации испытаний космических ракет-носителей. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014, 166 с.
- [3] Калашник Г.А., Попов Г.А. Современные методы согласования экспертных оценок. Современные научные исследования и инновации, 2022, № 6 (134). URL: <https://web.sciencedirect.ru/issues/2022/06/98492> (дата обращения 21.03.2025).
- [4] Орлов В.Н., Шишкина С.В. Экспертная оценка качества продукции методом ранжирования. Курган, Курганский гос. ун-т, 2008, 601 с.
- [5] Масленников Е.В. Особенности отбора экспертов. Социология, 2010, № 2, с. 82–93.

Advanced technologies, equipment and tool systems in mechanical engineering

Kostyshen Maxim Olegovich

kostyshenmo@student.bmstu.ru

Musokhranov Marcel Vladimirovich

marsel@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article presents some existing methods of expert assessment. The essence and features of these methods of expert assessment are considered. The main stages of expert assessments are given. The article will be useful for specialists involved in the planning and distribution of operations, using various methods of expert assessment, in order to identify the most efficient equipment utilization factor, with the highest productivity while maintaining the required quality and performance characteristics of the finished product.

Keywords: expert assessment, methods, CNC lathes, organization, production

УДК 621.96

Влияние пиковой мощности на диаметр входного и выходного отверстия при одноимпульсном лазерном сверлении

Гусакова Ксения Александровна

kseniya230402@yandex.ru

Журавлева Татьяна Александровна

juravleva.ta@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследовано влияние пиковой мощности лазерного излучения на диаметр входного и выходного отверстия при одноимпульсном лазерном сверлении на листах нержавеющей стали одной толщины с различными составами 08Х22Н6Т и 06ХН28МДТ, а также проведен анализ влияния пиковой мощности на результаты сверления. Для проведения виртуальных экспериментов применяется программное обеспечение COMSOL Multiphysics 6.2, имитирующее действия неодимового (Nd:YAG) лазера. Статья может вызвать интерес у специалистов в области лазерных технологий и эксплуатации лазерного оборудования.

Ключевые слова: пиковая мощность, компьютерное моделирование, лазерные технологии, нержавеющая сталь, одноимпульсное лазерное сверление, отверстия малого диаметра, теплопередача

Выходные параметры лазерной системы, используемые при моделировании процесса лазерного сверления приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пиковая мощность, кВт	Длительность импульса, мс	Количество импульсов	Положение фокальной плоскости
10–20 (*с шагом 2кВт)	1	Одиночный импульс	На поверхности

Поскольку испытание проводится в режиме одноимпульсного сверления, длительность импульса находится в пределах миллисекунд. Этого интервала значения достаточно для достижения результата при решении поставленной задачи. В качестве объекта моделирования были приняты образцы нержавеющих сталей марок 06ХН28МДТ и 08Х22Н6Т толщиной 3 мм, длиной и шириной 10 мм.

Данные марки стали выбраны для исследования процесса, учитывая условие наличия материалов с различным хим. составом. Так, сталь 06ХН28МДТ имеет в своем составе высокое содержания никели и меди, в сравнении с 08Х22Н6Т. Никель, в свою очередь, поглощает лазерное излучение не так эффективно, как другие металлы, что может требовать повышения входных параметров при одноимпульсной обработке. Медь имеет высокую теплопроводность, зачастую сплавы на основе этого элемента не обрабатывают из-за того, что тепло, генерируемое лазерным лучом, рассеивается [1].

Таблица 2

Теплофизические свойства используемых сплавов необходимые для моделирования процесса [2]

Наименование свойств	06ХН28МДТ	08Х22Н6Т	Единица измерения
Плотность	7960	7600	кг/м ³
Теплопроводность	16,8	13,4	Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	16,7	10,9	Дж/(кг·°C)
Температура плавления	1400–1450	1370–1420	°C

Лазерный луч фокусировался на верхней поверхности образцов с размером пятна 240 мкм в диаметре. Ось отверстия направлена перпендикулярно поверхности образца.

Процедура оценки влияния каждого параметра заключалась в изменении только одного параметра (пиковой мощности) в каждом тесте, в то время как все остальные параметры оставались неизменными. Таким образом, можно лучше проследить зависимость влияния параметров обработки.

Материал нагревался лазерным лучом, направленным на поверхность, для получения желаемого локализованного отверстия.

Тепловое излучение лазера в центре пятна лазерного луча было представлено в виде гауссова профиля с максимальным тепловым потоком на верхней поверхности образца:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad [3],$$

где ρ — плотность материала заготовки; C — удельная теплоемкость; k — теплопроводность, зависящая от температуры; Q — распределенное тепловыделение; T — температурное поле как функция пространства и времени.

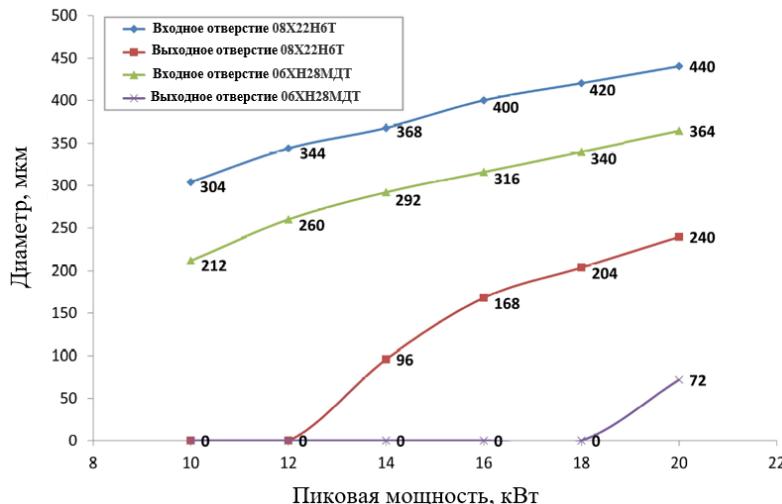
Предполагалось, что все остальные поверхности пластины термически изолированы от окружающей среды, т. е. не могли обмениваться тепловой энергией с окружающей средой. Материалы образцов при моделировании были выбраны из библиотеки программного обеспечения программы. Лазер работает на длине волны, при которой материал заготовки непрозрачен, и свет не проходит через него. Таким образом, весь тепловой поток лазера попадает на поверхность.

Результаты полученных значений входных и выходных диаметров для исследуемых образцов в зависимости от пиковой мощности при постоянной длительности импульса в 1 мс отражены на рисунке.

Отчетливо видно, что диаметр и глубина отверстий увеличивались по мере увеличения пиковой мощности лазерного луча.

Рассмотрим образец нержавеющей стали 06ХН28МДТ. Кратер был глубоким до 18 кВт, глубина отверстия увеличивалась по мере увеличения пиковой мощности.

Достигнуть сквозной отверстия получилось лишь при мощности 20 кВт.



Параметры входного и выходного отверстия в зависимости от пиковой мощности при постоянной длительности импульса в 1 мс

Рассмотрим образец нержавеющей стали 08Х22Н6Т. В этом случае кратер был глухим до достижения мощности 12 кВт.

Достигнуть сквозной отверстия получилось лишь при мощности 14 кВт.

Также стоит отметить, что диаметры входных и выходных отверстий, полученных на образцах стали 08Х22Н6Т, являются большими, чем при обработке 06ХН28МДТ, при условии что процесс выполнялся в одинаковых условиях. Увеличение диаметров входных и выходных происходит линейно.

Полученные результаты связаны с разницей теплопроводности материалов. Сталь 06ХН28МДТ за счет большего содержания меди и никеля имеет выше теплопроводность, чем 08Х22Н6Т. Высокие значения теплопроводности способствуют большему рассеянию тепла, что может привести к снижению температуры в зоне резки. В свою очередь, это может замедлять процесс резки и ухудшает качество реза [4].

Литература

- [1] Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г. *Практика прецизионной лазерной обработки*. Москва, Техносфера, 2013, 696 с.
- [2] *Стали и сплавы. Марочник: справочник*. Москва, Интермет инжиниринг, 2001, 608 с.
- [3] Лосев В.Ф., Морозова Е.Ю., Ципилев В.П. *Физические основы лазерной обработки материалов*. Томск, ТПУ, 2011, 199 с.
- [4] *Технологические процессы механической и физико-химической обработки в машиностроении*. Санкт-Петербург, Лань, 2022, 432 с.

The effect of peak power on the diameter of the inlet and outlet holes in single-pulse laser drilling

Gusakova Kseniya Aleksandrovna kseniya230402@yandex.ru

Zhuravleva Tatiana Alexandrovna juravleva.ta@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This material examines the effect of peak laser radiation power on the diameter of the inlet and outlet holes during single-pulse laser drilling on stainless steel sheets of the same thickness with different compositions 08H22N6T and 06KHN28MDT, and analyzes the effect of peak power on drilling results. The COMSOL Multiphysics 6.2 software, which simulates the effects of a neodymium (Nd:YAG) laser, is used to conduct virtual experiments. The article may be of interest to experts in the field of laser technology and operation of laser equipment.

Keywords: peak power, computer simulation, laser technology, stainless steel, single pulse laser drilling, small diameter holes, heat transfer

Секция 2. Технологии и машины сварочного производства

УДК 621.791

Сравнение проволок для восстановления ножа скоростного фронтального отвала А90

Орлик Антон Геннадьевич a.g.orlik@yandex.ru
Орлик Геннадий Владимирович G.V.Orlik@yandex.ru
Глебов Сергей Александрович sagebov@bmstu.ru
Пономарев Олег Игоревич o-o-p70@mail.ru
Никулин Константин Дмитриевич kostik.46rus15@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено восстановление ножа скоростного фронтального отвала А90 наплавкой в среде защитных газов. Приведено сравнение сварочных проволок по химическому составу и механическим свойства. Подобраны технологические параметры наплавки. Произведен замер твердости покрытий, полученных проволоками ППН-502 и ПП-3Х2В8, а также проведены испытания на гидроабразивный износ с помощью установки Kärcher для сравнения стойкости наплавленного слоя.

Ключевые слова: наплавка в среде защитных газов, сравнение сварочных проволок, нож отвала, твердость

Наплавка в среде защитных газов — способ наплавки, при котором в зону горения дуги под небольшим давлением подают газ, который вытесняет воздух и защищает сварочную ванну от кислорода и азота воздуха.

Для разного марок металла используют различные виды защитных газов:

- азот — для меди и сплавов на ее основе;
- углекислый газ — для чугуна и стали;
- гелий и аргон — для любых металлов;
- различные смеси газов [1].

Некоторые преимущества наплавки в среде защитных газов:

- процесс происходит без образования шлаковой корки;
- открытая дуга дает возможность наблюдать и корректировать процесс наплавки;

– наплавка может проводиться при любом пространственном положении поверхности наплавляемой детали;

- возможность проводить наплавку на мелких деталях [2].

Некоторые недостатки наплавки в среде защитных газов:

- склонность покрытия к трещинообразованию;
- ограниченное легирование наплавленного слоя;
- необходимость защиты от излучения открытой дуги [3].

Фронтальный скоростной отвал А90 — технологичное служебное оборудование для КДМ, предназначенное для работы в тяжелых условиях (рис. 1).

Отвал подвергается гидроабразивному изнашиванию, ударам о поверхность асфальта, наездом на крупные препятствия [5]. Со временем ножу отвала нужно восстановление, в статье рассмотрено восстановление отвала наплавкой.



Рис. 1. Фронтальный скоростной отвал A90

Нож отвала изготовлен из стали 09Г2С (рис. 2). Химический состав и механические свойства стали представлены в табл. 1, 2.

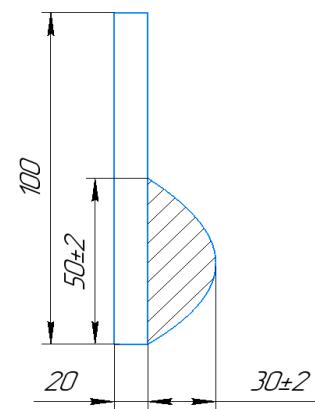


Рис. 2. Нож фронтального отвала

Таблица 1
Химический состав стали 09Г2С, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
До 0,12	0,5–0,8	1,3–1,7	до 0,3	До 0,04	До 0,035	До 0,3

Таблица 2
Механические свойства стали

$\delta_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	HRC
310–340	400–450	26–29	58	24–35

Были рассмотрены два метода наплавки (полуавтоматическая наплавка в среде защитных газов и ручная дуговая). В ходе сравнения была выбрана полуавтоматическая наплавка.

В качестве присадочного материала были рассмотрены три проволоки: Св-08Г2С, ПП-3Х2В8 и ППН-502.

Рассмотрим данные проволоки. Химический состав проволоки Св-08Г2С представлен в табл. 3.

Химический состав проволоки ПП-3Х2В8 представлен в табл. 4.

Химический состав проволоки ППН-502 представлен в табл. 5 [4].

Таблица 3
Химический состав Св-08Г2С, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
До 0,11	0,7	1,80–2,10	До 0,25	До 0,04	До 0,035	До 0,3

Таблица 4
Химический состав ПП-3Х2В8, %

C	Si	Mn	Ni	S	V	W
0,3–0,4	0,2–0,3	0,2–0,3	до 0,3	До 0,04	0,2–0,3	7,5–9,0

Таблица 5
Химический состав ППН-502, %

C	Si	Mn	Ni	S	Cr	B
1,5–2,0	1–2	0,8–1,5	до 0,3	До 0,04	14–20	0,5–0,8

Из технических требований к восстановлению следует, что ключевым параметром наплавки для нас является твердость. Углерод влияет на твердость стали, так как количество этого элемента в составе определяет механи-

ческие свойства материала, в том числе пластичность, вязкость, прочность и твердость.

Следовательно, убираем из сравнения проволоку Св-08Г2С. Так как она заведомо даст меньшую твердость.

Для определения параметров нанесения восстановительного слоя были подобраны параметры.

Для проволоки ПП-3Х2В8: $I = 170$ А; $U = 23$ В; скорость подачи: 4 м/мин; газ: 82 % Ar + 18 % CO₂.

Для проволоки ППН-502: $I = 174$ А; $U = 34$ В; скорость подачи: 5 м/мин; газ: 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂.

На полученных образцах был нанесен наплавочный слой. Для определения наиболее рационального присадочного материала для восстановления изношенной поверхности необходимо провести испытания на твердость.

Проволокой ПП-3Х2В8 была получена твердость в 54 HRC (рис. 3).

Проволокой ППН-502 мы получили твердость в 59 HRC (рис. 4).



Рис. 3. Замер твердости покрытия, полученного проволокой ПП-3Х2В8



Рис. 4. Замер твердости покрытия, полученного проволокой ППН-502

Для определения стойкости наплавленного слоя проводились испытания на гидроабразивной изнашивание в водной среде. При этом следует напомнить, что жидкую среду оказывает, как правило, разупрочняющее действие на большинство металлов, ускоряя тем самым процесс усталостного разрушения. Процесс царапанья практически представляется как множество отскоков и повторных соударений частицы с поверхностью детали.

Подготовленные образцы испытывались на специальной установке гидроабразивного изнашивания на базе установки Kärcher.

После каждого испытания проводились контрольные взвешивания образцов для определения удельной потери массы в условиях износа. По результатам измерений была составлена таблица, отражающая потерю массы после испытания (рис. 5).

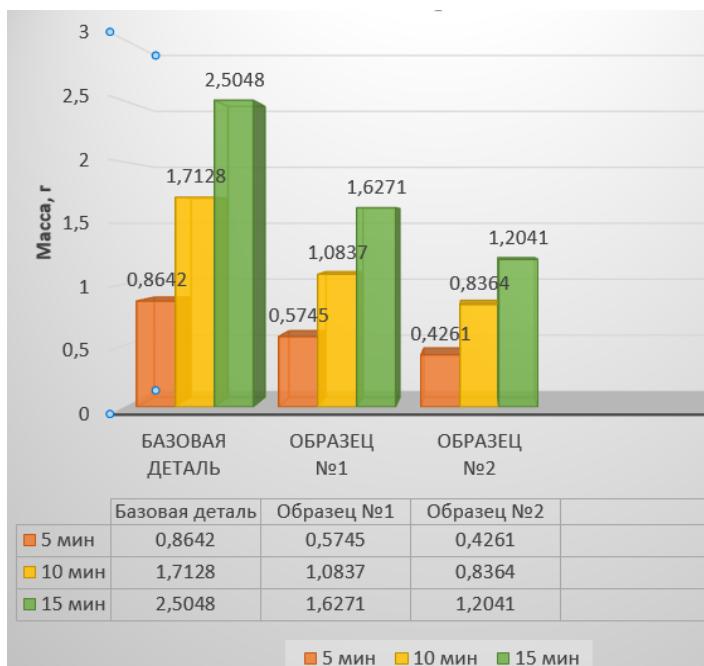


Рис. 5. Диаграмма испытаний

Из представленной диаграммы видно, что в сравнении с базовым изделием стойкость наплавки проволокой ППН-502 (образец № 2) выше, что подтверждает целесообразность применения данного способа восстановления при выбранном сочетании материалов.

Литература

- [1] Мамасолиева М.И. Методы повышения износостойкости деталей. *Молодой ученый*, 2017, № 3 (137), с. 121–122.
- [2] Суслов А.Г., Дальский А.М. *Научные основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2002, 684 с.
- [3] Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г. *Структурное состояние сталей и сплавов*. Таганрог, Изд-во ТРГУ, 2004, 60 с.
- [4] Севостьянов В.А., Третьяков Д.В., Рожков Д.А. Перспективные способы восстановления деталей машин. *Молодой ученый*, 2021, № 7 (349), с. 29–30.
- [5] Торянников А.Ю., Барышников А.А. Наплавка в среде защитных газов образца в условиях абразивного износа, упрочненного электромеханической поверхностной закалкой с последующей ультразвуковой обработкой. *Молодой ученый*, 2022, № 19 (414), с. 114–117.

Comparison of wires for restoring the a90 high-speed front blade

Orlik Anton Gennadievich	a.g.orlik@yandex.ru
Orlik Gennady Vladimirovich	g.v.orlik@yandex.ru
Glebov Sergey Alexandrovich	saglebov@bmstu.ru
Ponomarev Oleg Igorevich	o-o-p70@mail.ru
Nikulin Konstantin Dmitrievich	kostik.46rus15@mail.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses the restoration of the A90 high-speed frontal blade blade by surfacing in a protective gas environment. The comparison of welding wires by chemical composition and mechanical properties is given. The technological parameters of the surfacing have been selected. The hardness of the coatings obtained with PPN-502 and PP-3X2V8 wires was measured, and tests for waterjet wear were carried out using the Kärcher installation to compare the resistance of the deposited layer

Keywords: surfacing in the environment of protective gases, comparison of welding wires, blade blade, hardness

УДК 621.791

Выбор присадочного материала для наплавки на зубья ковша

Орлик Антон Геннадьевич a.g.orlik@yandex.ru

Орлик Геннадий Владимирович g.v.orlik@yandex.ru

Иванов Евгений Иванович ivanovei01@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

*Рассмотрены и сравнены наплавочные порошковые проволоки EnDo*390N и EnDo*48, применяемые для наплавки зуба ковша экскаватора. В процессе анализа микроструктур было выявлено, что в металле могут образовываться различные структуры, такие как феррито-цементит, аустенит, мартенсит, по-разному влияющие на коррозионную стойкость конструкции. Рассмотрено, что для повышения прочности могут проводиться различные мероприятия, такие как легирование никелем, способствующее снижение содержания феррито-цементита или отпуск при температуре 600–700 °C, который способствует распаду феррита и повышает твердость металла.*

Ключевые слова: гидроабразивный износ, твердость, наплавка, зуб ковша, износостойкость

Одним из основных видов механического разрушения в машиностроении является гидроабразивный износ. Разрушение данным видом износа представляет собой воздействие на металл твердых частиц, содержащихся в потоке жидкости. Данный вид износа встречается во многих отраслях промышленности. Наибольший урон получают рабочие органы оборудования, а именно режущие части, такие как зубья пластины, накладки и т. д. В данной работе объектом исследования является зуб ковша. Износ данного элемента приводит к потере режущей способности конструкции. Зуб ковша представляет собой сменную часть, как правило, закрепляемую на болтовое соединение, что обеспечивает беспрепятственную замену зуба на новый. Помимо замены, существуют различные способы восстановления и упрочнения поверхности.

Восстановление деталей, как правило, обходится значительно дешевле, чем замена на новую. Это существенно снижает затраты на ремонт и обслуживание техники. Восстановленная деталь может быть установлена гораздо быстрее, минимизируя простой оборудования и, соответственно, потери в производительности.

Существует большое количество способов восстановления поверхностей деталей, среди основных можно выделить: наплавка, напыление, пайка, электролитическое покрытие, пластическое деформирование и т. д. Для восстановления зуба наибольший интерес представляет наплавка.

В процессе наплавки особое внимание уделяется выбору присадочного материала. Полученное покрытие должно обладать следующим свойствами: высокая твердость, высокие показатели износостойкости слоя, а также проч-

ность детали поскольку она эксплуатируется в условиях агрессивной среды, которая способствует быстрому разрушению [1].

Обзор литературных источников показывает, что существует большое количество работ и исследований, посвященных сравнению и правильному выбору присадочного материала, а также повышения характеристик с использованием механизмов упрочнения поверхностей.

В работах А.Н. Гостевской, В.Е. Кормышева, Е.В. Капралова, В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова рассматривается исследование структуры и свойств слоя металла, наплавленного проволоками EnDo*390N и EnDo*48 на зуб ковша [2].

Для изготовления зубьев ковша используются низколегированная сталь 10ХСНД. Имеет в своем химическом составе кремний, марганец, хром, медь, никель, способствующие защите детали от коррозионных воздействий.

Суть статьи заключается в исследовании микроструктуры и механических свойств металла, полученного наплавочными порошковыми проволоками EnDo*390N и EnDo*48. На основе полученных данных, сделаны выводы о целесообразности применения той или иной проволоки, а также предлагаются методы по повышению прочности и коррозионной стойкости деталей [3].

Наплавка осуществляется полуавтоматической проволокой в среде защитных газов. Рассмотрим первый зуб, наплавленный порошковой проволокой EnDo*390N. Данная проволока применяется для наплавки поверхностей, работающих в условиях абразивного и гидроабразивного износа. Содержит в своем химическом составе хром, медь, никель, которые существенно повышают твердость металла. Наплавка производилась на следующих режимах: сила сварочного тока 182 А, напряжение 26 В, скорость сварки 26 м/час, расход газа 12 л/мин (20 %Ar + 80 %CO₂), скорость подачи проволоки 12 м/час в один два прохода. При анализе можно наблюдать, что микроструктура состоит из мартенсита (40 %), который обладает повышенной твердостью и стойкостью к гидроабразивному износу. Помимо мартенсита, следует отметить наличие аустенита в количестве не более 10 %, способствующий понижению прочности металла. В процессе работы при воздействии влажного и сухого трения аустенит полностью преобразуется в мартенсит деформации, что способствует повышению твердости. Помимо этого, в структуре также имеются феррито-цементитные структуры, не оказывающие существенного влияния на прочностные характеристики металла. Однако при большом их содержании данные структуры существенно понижают свойства слоя. Для понижения влияния феррито-цементита существуют различные методики. Одной из таких является легирование никелем (7–8 % Ni), способствующее появлению в структуре метастабильного аустенита, повышающего твердость металла. Среди особенностей структуры также можно выделить содержание сложнолегированных карбидов типа (CrFe)₂₃C₆, MeC, способствующих повышению твердости зуба. Таким образом, в результате изучения твердость наплавленного слоя составляет 66 по шкале HRC. Показатели данной характеристики при работе в условиях гидроабразивного износа должны составлять 58–61 HRC [4].

Далее рассмотрим образец с присадочным материалом EnDo*48, представляющим собой порошковую проволоку, используемую для наплавки поверхностей изделий, работающих в условиях агрессивных сред. Наплавка производилась на таких же режимах, как и для проволоки EnDo*390N. Исходя из анализа можно отметить, что большую часть микроструктуры составляет средненогольчатый мартенсит (45 %), повышающий прочностные характеристики. Помимо мартенсита большую долю составляет феррит (25 %), при большом содержании которого (больше 15 %) существенно снижается твердость наплавленного металла. Распад феррита происходит при температуре 600–700 °C. Одним из вариантов снижения феррита является отпуск детали после наплавки. Стоит также отметить небольшое содержание аустенита 4–5 %. Таким образом, по результатам анализа, твердость наплавленного слоя составляет 55 по шкале HRC [5].

Таким образом, на основе анализа микроструктуры и полученного значения твердости двух зубьев, наплавленных проволоками EnDo*390N и EnDo*48, можно сделать вывод о целесообразности применения того или иного присадочного материала. Из данных видно, что наплавочная порошковая проволока EnDo*390N имеет более лучшую структуру, а также обладает повышенной по сравнению с проволокой EnDo*48 твердостью 66 HRC, что является отличным показателем прочности для работы в среде абразивного воздействия. Из рассмотренных данных также можно отметить, что наплавленный слой может содержать различные включения, такие как феррит, аустенит, феррито-цементит, негативно влияющие на характеристики металла. Для снижения их процентного содержания, проводят различные мероприятия по упрочнению наплавленного слоя. Легирование покрытия никелем (7–8 %) для снижения содержания в металле феррито-цементита. В результате процентное содержание данной структуры в слое уменьшается, а также увеличиваются прочностные характеристики. Для снижения феррита в покрытии, наплавленном проволокой EnDo*48, был предложен отпуск детали после наплавки при температуре 600–700 °C, способствующий его распаду. Отпуск проводится при содержании феррита больше критического значения (15 %). Помимо этого, негативное влияние также оказывает и аустенит, однако при работе изделия, в результате сухого и влажного трения, он превращается в мартенсит деформации, который существенно повышает прочностные характеристики металла.

Литература

- [1] Еремин Е.Н., Шевелева Т.А., Филиппов Ю.О., Лосев А.С., Бородихин С.А., Маталасова А.Е. Исследование структуры и твердости металла, наплавленного на зубья ковша. *Омский научный вестник*, 2015, № 1 (2), с. 30–33.
- [2] Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С. А. Порошковая проволока для наплавки коррозионностойкой и износостойкой стали. *Вестник машиностроения*, 2018, № 7, с. 66–68.
- [3] Максимов А.Б., Гуляев М.В. Поверхностное упрочнение сталей для изделий шахтного оборудования. *Актуальные проблемы в машиностроении*, 2015, № 2, с. 370–374.

-
- [4] Ковалев А.А., Краско А.С. Влияние параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2021, № 3, с. 31–39.
 - [5] Артемьев А.А., Соколов Г.Н., Дубцов Ю.Н., Лысак В.И. Формирование композиционной структуры износостойкого наплавленного металла с боридным упрочнением. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2011, № 2, с. 44–48.

The choice of filler material for surfacing on the teeth of the bucket

Orlik Anton Gennadievich a.g.orlik@yandex.ru

Orlik Gennady Vladimirovich g.v.orlik@yandex.ru

Ivanov Evgeny Ivanovich ivanovei01@mail.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

*The paper considers and compares the surfacing powder wires EnDo*390N and EnDo*48 used for surfacing the excavator bucket tooth. During the analysis of microstructures, it was found out that various structures such as ferrite-cementite, austenite, martensite can form in the metal, which have different effects on the corrosion resistance of the structure. It is considered that various measures can be carried out to increase the strength, such as nickel alloying, which helps to reduce the ferrite-cementite content, or tempering at a temperature of 600–700 °C, which promotes the decomposition of ferrite and increases the hardness of the metal.*

Keywords: waterjet wear, hardness, surfacing, bucket tooth, wear resistance

УДК 621.791

Способы увеличения износостойкости деталей машин, полученных наплавкой

Орлик Антон Геннадьевич a.g.orlik@yandex.ru

Орлик Геннадий Владимирович g.v.orlik@yandex.ru

Манзюк Андрей Иванович andrey.manzuuk@gmail.com

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены различные способы повышения износостойкости деталей машин в условиях абразивного и биокоррозионного износа путем наплавки. Проведен анализ таких способов, как полуавтоматическая наплавка электродной проволокой в среде защитного газа, электродуговая наплавка с использованием наплавочной головки с механизмом колебания электрода кривошипно-шатунного типа в среде защитного газа, и электродуговая наплавка с использованием ультразвука в среде защитного газа, и сделан вывод о рациональности использования проволоки Св-08Г2С совместно с порошкообразным присадочным материалом с различным составом.

Ключевые слова: ППМ, износостойкость, восстановительная наплавка, легирование, абразивный износ, восстановление поверхностей, долговечность

Основной причиной потери работоспособности детали является не поломка, а ее износ, приводящий машину в нерабочее состояние. Все детали подвержены износу, поэтому повышение износостойкости с целью увеличения работоспособности изнашивающихся деталей машин это одна из самых главных проблем в машиностроении.

Для повышения износостойкости применяется множество способов и материалов. Одним из этих способов является наплавка. Она подразумевает нанесение расплавленного металла на поверхность детали для создания слоя с нужными для эксплуатации свойствами. В качестве материалов для наплавки используются специальные присадочные материалы, обеспечивающие высокую износостойкость деталей машин, подвергающихся гидроабразивному, абразивному, коррозионному видам износа. Анализ литературы показывает, что над этим вопросом работает большое число авторов, представляя различные методы обеспечения повышения износостойкости с помощью применения наплавки.

Повышение износостойкости деталей машин с помощью материалов приводится в работе В.В. Кураша, А.В. Кудина, Ю.Т. Антонишина, А.В. Кривицкого [1], где рассматривается полуавтоматическая наплавка электродной сварочной проволокой Св-08Г2С в среде защитного газа.

Авторы ставят перед собой цель — повысить эксплуатационные свойства деталей машин с помощью совмещения со сварочной проволокой порошкообразного присадочного материала (ППМ). В результате проведенных опытов выяснилось, что благодаря ППМ, включающему механическую смесь

на основе железа и никеля в процентном содержании 70–75 % к 30–25 % соответственно, обеспечивается повышенная износостойкость к абразивному износу, но слабое противостояние биокоррозионному износу. Проведя анализ химического состава сварочной проволоки Св-08Г2С и ППМ самофлюсующегося сплава ПГ-СР, была доказана эффективность против абразивного и биокоррозионного износа при массовом соотношении проволоки и ППМ 60 % к 40 % соответственно. Наличие боридов, силицидов и карбоборидов обеспечивает твердость 51–55 HRC, медная компонента блокирует биокоррозию, а смесь алюминия повышает стойкость к наводороживанию поверхности [2]. Эксперименты показали, что применение данной смеси позволяет снизить в 1,7–1,9 раз интенсивность изнашивания деталей машин и обеспечивает 6–7 класс износостойкости.

Другим примером повышения износостойкости деталей машин является работа Н.В. Спиридонова, А.В. Кудина, В.В. Кураша [3], где рассматривается влияние способа сварки на износостойкость посредством воздействия на каплеперенос расплавленного электродного металла. Авторы считают, что каплеперенос влияет на износостойкость деталей машин с помощью изменения качества шва, что для получения качественной поверхности необходимо обеспечивать капельный перенос металла снижением размеров капель по мере увеличения силы тока. При электродуговой наплавке в смеси защитных газов электродной проволокой сплошного сечения диаметром 1,6 мм и скоростью подачи 11 м/мин происходит струйный перенос, а при диаметре 1,2 мм и скорости подачи 50 м/мин и силе тока до 500 А происходит струйно-вращательный каплеперенос. Авторы считают, что если добавить поперечные колебания при наплавке, то это сильно увеличит производительность и изменит форму и структуру наплавленного слоя: ширина увеличится, а длина уменьшится. Наплавленный слой состоит из дендритов, которые расположены перпендикулярно к линии оплавления основного металла. Аустенитные зерна являются основой для растущих дендритов, из-за этого размеры и число дендритов определяются количеством и величиной этих зерен. Если уменьшить длину слоя жидкого металла с помощью поперечных колебаний, то это снизит пребывание в зоне перегрева, и, следовательно, способствует образованию мелкозернистой структуры наплавленного металла, что, в свою очередь, способствует созданию более прочной и износостойкой поверхности [4]. Поперечные колебания сейчас можно получить с помощью механических и пневматических колебательных механизмов, а именно наплавочные головки с механизмом колебания электрода кривошипно-шатунного типа. Плюсы данного метода: надежность, простота и удобство. Минусом является то, что мгновенная погонная энергия соответствует крайнему положению электрода, а наименьшая — среднему, что уменьшает глубину проплавления. Чтобы решить данную проблему авторы использовали электродуговую наплавку с использованием ультразвука. Этот метод способствует формированию однородной мелкозернистой структуры и позволяет одновременно легировать наплавляемый слой путем вдувания порошкообразного материала под обо-

лочку защитного газа [5]. Проведя сравнение между этими двумя способами, авторы пришли к выводу, что твердость наплавленной поверхности с использованием УЗК выше на 1,3 чем без применения УЗК, зернистость, плотность и качество слоя также выше и практически отсутствует граница раздела слоев. ППМ частицы под воздействием УЗК равномерно распределяются в объеме и образуют композитный сплав вроде механической смеси с различными свойствами: износостойкими, абразивными, коррозионностойкими и другими. Благодаря этому износостойкость увеличивается в 1,5–1,7 раз.

Исходя из проведенного анализа литературы можно сделать вывод, что применение разных способов наплавки различными материалами позволяет не только повышать износостойкость изделия, но и увеличивать производительность и качество шва, путем изменения его структуры.

Для повышения долговечности деталей, работающих в условиях абразивного износа рационально легировать наплавленный слой с помощью ППМ, в состав которого могут входить такие элементы, как Ni, Al, Fe, B, Mn, Cr, Si, благодаря которым увеличивается количество упрочняющих фаз из-за формирования гетерофазного строения покрытия.

Литература

- [1] Кураш В.В., Кудина А.В., Антонишин Ю.Т., Кривицкий А.В. Исследование интенсивности изнашивания нового состава износо-коррозионностойкого металлопокрытия для трибоповерхностей деталей машин. *Агропанорама*, 2012, № 5 (93), с. 13–17.
- [2] Лебедев М.П., Болотина Н.П. *Способ получения покрытий из самофлюсирующихся порошковых материалов на изделиях из железоуглеродистых сплавов*. Патент № 2112815 РФ, 1998, 5 с.
- [3] Спиридовон Н.В., Кудина А.В., Кураш В.В. Электродуговая наплавка металлоповерхностей колеблющимся электродом в среде защитного газа. *Наука и техника. Машиностроение и машиноведение*, 2013, № 4, с. 1–8.
- [4] Мантуров Д.С. *Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя*. Дис. ... канд. техн. наук, 2020, 160 с.
- [5] Шуляковский О.Б., Шевелкин В.И., Булатов В.П. *Способ наплавки изделий износостойкими материалами*. Патент № 2109610 РФ, 1998.

Ways to increase the wear resistance of machine parts obtained by surfacing

Orlik Anton Gennadievich a.g.orlik@yandex.ru

Orlik Gennady Vladimirovich g.v.orlik@yandex.ru

Manzyuk Andrey Ivanovich andrey.manzuuk@gmail.com

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The paper discusses various ways to increase the wear resistance of machine parts in conditions of abrasive and biocorrosive wear by surfacing. The analysis of such methods as semi-automatic welding with an electrode wire in a protective gas environment, electric arc welding using a welding head with a crank-rod type electrode oscillation mechanism in a protective gas environment, and electric arc welding using ultrasound in a protective gas environment, and a conclusion was made about the rationality of using the Sv-08G2C wire together with a powdered additive material with a different composition.

Keywords: *PPM, wear resistance, restorative surfacing, alloying, abrasive wear, surface restoration, durability*

УДК 539.319

Анализ сварной конструкции сложной геометрии на технологичность

Чернова Татьяна Георгиевна

chernova-tg@bmstu.ru

Шиленков Константин Александрович

shilenkov.kostya@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Показана отработка сварной конструкции на технологичность с использованием каркаса стула в качестве примера. Проведен анализ сварной конструкции на технологичность. Показано, что при анализе сварной конструкции на технологичность необходимо рассматривать основные технологические операции, характерные для сварочного производства, такие как заготовительные, сборочные, сварочные, контрольные. На основе проведенного анализа предложены способы оптимизации конструкции каркаса стула, которые позволяют повысить технологичность и упростить процесс производства.

Ключевые слова: технологичность, сварная конструкция, анализ конструкции, оптимизация изделия

Технологичность — совокупность свойств конструкции, определяющая ее адаптивность к достижению оптимальных затрат труда, времени, средств и материалов при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ [1, 2].

Рассматриваемая конструкция — каркас стула (рис. 1) представляет собой сварную конструкцию сложной геометрии. Конструкция типовая, мебельная. Каркас стула имеет габариты 475×465×615 мм, изготовлен из трубы 20×1,5×6000 (ГОСТ 8734–75). Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные [3], материал — сталь 08пс.

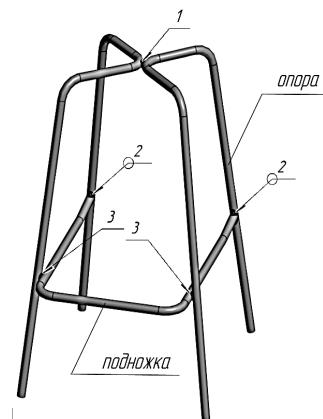


Рис. 1. Каркас стула

Основные технические требования, предъявляемые к конструкции, указаны в технической и нормативной документации [4].

При изготовлении сварных конструкций основные технологические операции:

- заготовительные;
- сборочные;
- сварочные;
- контрольные.

При анализе конструкции на технологичность необходимо рассмотреть все эти операции.

В результате анализа конструкции каркаса стула на технологичность выявлены сложности в технологических операциях.

1. Заготовительные операции. Заготовки для каркаса стула изготавливаются резкой и гибкой. Для соединения подножки с опорой швом 2 выполняется механическая обработка (резка) подножки.

Гибка трубы $20 \times 1,5 \times 6000$ может производиться как в холодном состоянии с минимальным радиусом гиба R40–R50, так и в горячем состоянии с минимальным радиусом гиба R40 [5]. Заданные в конструкторской документации радиусы гиба превышают минимальные.

Углы гиба элементов конструкции в большинстве не соответствуют нормативной документации [6].

Механическая обработка базовой конструкции подножки сложная, так как подножка расположена под углом к элементу опоры, отличному от 90° , а сами элементы опоры, сопрягаемые с подножкой, располагаются под углом к горизонтальной плоскости (рис. 2).

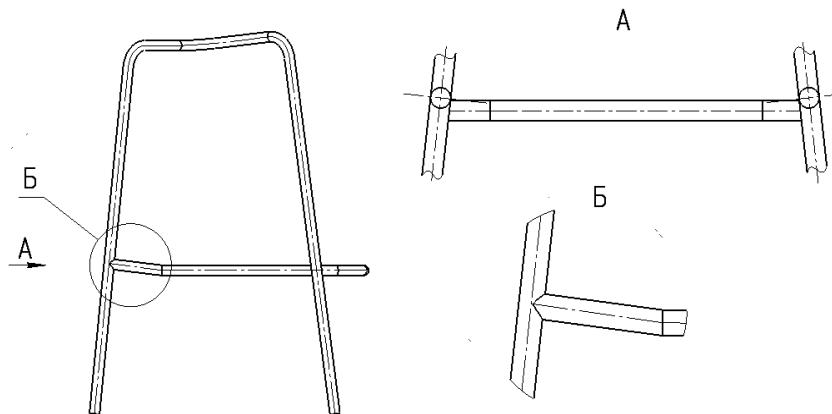


Рис. 2. Сложная механическая обработка подножки

2. Сборочные операции. При сборке необходимо обеспечить взаимное положение и закрепление опор и подножки в соответствии с конструкторской документацией. Ключевым является форма сопряжения деталей. Поэтому

необходимо проанализировать сопряжения деталей в местах выполнения сварных швов.

Сопряжение опор и подножки осуществляется в местах выполнения сварных швов (рис. 1). Для швов № 1 и № 3 — это точка касания дуг и точка пересечения образующих соответственно, площадь контакта минимальна. Для шва № 2 — пространственная кривая, площадь контакта достаточно большая.

3. Сварочные операции. Способ сварки каркаса стула — дуговая сварка неплавящимся электродом в среде защитных газов [7]. Электрод — неплавящийся вольфрамовый марки Т0 (ГОСТ 23949–80), защитный газ — аргон (ГОСТ 10157–79), присадочная проволока — 08Г2С (ГОСТ 2246–70). Способ дуговой сварки неплавящимся электродом достаточно дорогой и требует высокой квалификации сварщика.

4. Контрольные операции. Визуально-измерительный контроль производится на каждом этапе изготовления сварной конструкции в соответствии с ГОСТ Р ИСО 17637–2014. Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением. Данная операция не требует корректировки.

Оптимизируем конструкцию каркаса стула для повышения технологичности.

1. Заготовительные операции.

Скорректируем углы гиба в соответствии с нормативной документацией [7] и исключим сложную механическую обработку базовой конструкции подножки.

2. Сборочные операции.

Для швов № 1 и 3 увеличим площадь касания, сопряжение для шва № 2 выполним аналогично шву № 3.

Точку касания дуг для шва № 1 заменим на контакт по образующей (рис. 3).

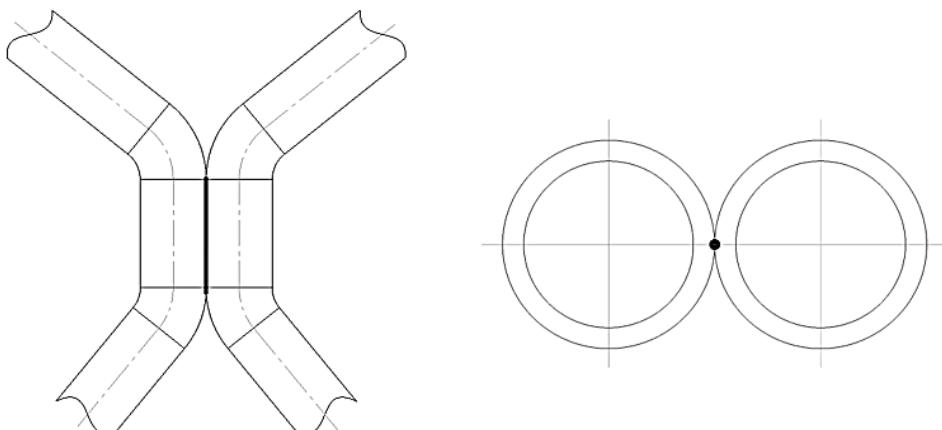


Рис. 3. Шов № 1

Точку пересечения образующих шва № 3 заменим на деформирование трубы, при этом сечение трубы заменится на овальное, а контакт подножки и опоры будет осуществляться по образующей (рис. 4).

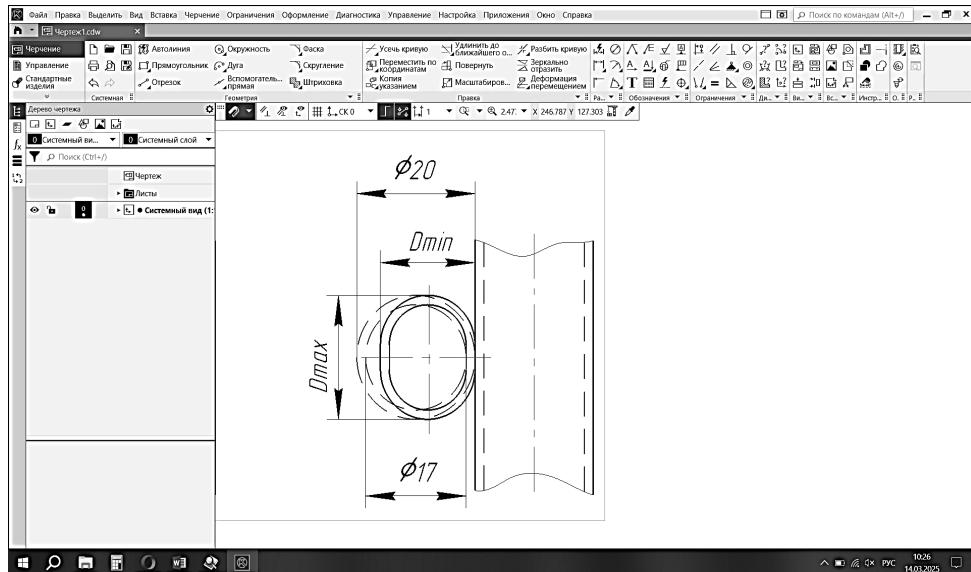


Рис. 4. Шов № 2 и № 3

3. Сварочные операции.

Заменяем сварку в защитных газах неплавящимся электродом на сварку в среде защитных газах плавящимся электродом.

Таким образом, для повышения технологичности каркаса стула предлагаются:

- скорректировать углы гиба опор;
- исключить сложную механическую обработку подножки;
- изменить сопряжения в местах выполнения сварных швов;
- заменить сварку в защитных газах неплавящимся электродом на сварку в среде защитных газах плавящимся электродом.

Оценить эффективность предложенных изменений в технологических операциях можно, проведя прочностной анализ рассматриваемой конструкции до и после оптимизации. Для расчета можно воспользоваться, например, программой КОМПАС-3D, функцией АРМ FEM.

Литература

- [1] Галушкина В.Н. *Технология производства сварных конструкций*. Москва, Академия, 2012, 96 с.
- [2] ГОСТ 14.205–83. *Технологичность конструкции изделий. Термины и определения*. Москва, Стандартинформ, 1983, 4 с.
- [3] ГОСТ 8734–75. *Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные*. Москва, Стандартинформ, 2017, 12 с.
- [4] ГОСТ 19917–2014. *Мебель для сидения и лежания. Общие технические условия*. Москва, Стандартинформ, 2014, 37 с.
- [5] РД 24.203.03–90. *Радиусы и углы гиба труб*. Березовки, 1991, 17 с.
- [6] ГОСТ 8908–81. *Основные нормы взаимозаменяемости. Нормативные углы и допуски углов*. Москва, Издательство стандартов, 2002, 10 с.
- [7] Алешин Н.П. *Сварка. Резка. Контроль*. Москва, Машиностроение, 2004, 479 с.

Analysis of welded structure of complex geometry for manufacturability

Chernova Tatiana Georgievna

chernova-tg@bmstu.ru

Shilenkov Konstantin Alexandrovich

shilenkov.kostya@mail.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The paper shows the testing of welded structure for manufacturability using the chair frame as an example. The welded structure was analyzed for manufacturability. It is shown that when analyzing the welded structure for manufacturability it is necessary to consider the main technological operations characteristic of welding production, such as billet, assembly, welding, inspection. On the basis of the conducted analysis the ways of optimization of the chair frame design are offered, which will allow to increase manufacturability and simplify the production process.

Keywords: manufacturability, welded construction, design analysis, product optimization

УДК 621.791

Обратное проектирование и анализ технологий изготовления крыльчатки

Радкевич Владислав Витальевич radk.vladis@gmail.com

Труханов Константин Юрьевич konstantin.truhanov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены подходы к обратному проектированию и выбору технологии изготовления крыльчаток открытого и закрытого типов. Цифровая модель изделий получена с помощью 3D-сканирования. Проведена оптимизация топологических моделей с целью устранения дефектов сканирования. Разработка твердотельных моделей выполнена в пакете КОМПАС-3D. Для изготовления изделий предложены технологии гибки, литья и сварки. Единичный объем изготовления изделий позволяет применять более дешевые варианты изготовления сборочно-сварочных приспособлений. В зависимости от сложности конструкции изделий рассмотрены варианты комбинации технологий.

Ключевые слова: обратное проектирование, 3D-сканирование, крыльчатка, сварка, литье, гибка

Крыльчатки разнообразных форм и конструкций используются в различных механизмах. В случае поломки чаще всего выполняют замену изделия или узла или проводят ремонт [1]. В ряде случаев оба варианта могут быть сложно реализуемы. Еще одним вариантом решения является обратное проектирование изделия и последующие изготовление в единичном или мелкосерийном объеме. В настоящее время для получения цифровой модели изделий часто применяется различные 3D-измерительные инструменты, такие как 3D-сканеры, измерительные руки, трекеры и др. В результате 3D-измерения конструктор получает полигональную модель для дальнейшей обработки, построения твердотельной модели и, в случае необходимости, разработки конструкторской документации.

В работе рассматриваются этапы обратного проектирования на примере двух конструкций крыльчатки открытого (рис. 1, *а*) и закрытого (рис. 1, *б*) типов. Полигональные модели изделий показаны на рис. 1. Крыльчатка открытого типа имеет повреждения в виде нарушения геометрии лопаток и утраты их частей.

Дальнейшая работа проводится с CAD-пакете КОМПАС-3D. Можно выделить две основные задачи на этом этапе:

– получение геометрии и характеристик поверхностей изделия, соответствующей реальным, обеспечивающей требуемое функционирование изделия и технологическую возможность изготовления;

– воспроизведение разрушенных элементов исходного изделия.

Полученные модели анализируются на соответствие геометрии исходного изделия путем сравнения с полигональными моделями (рис. 3). Сравнение выполняется с учетом деформации изделия в ходе эксплуатации и разрушения [2].

В ходе работы с полигональными моделями необходимо устраниить различные дефекты сканирования (рис. 2).

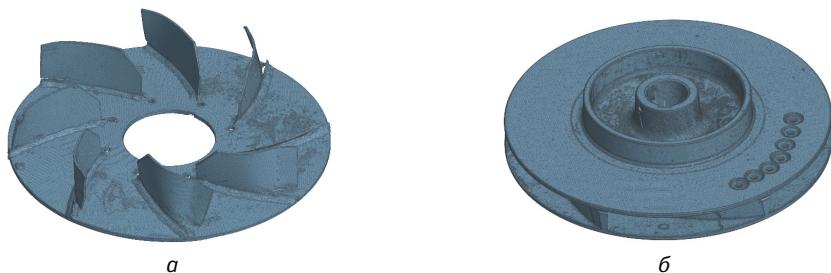


Рис. 1. Полигональные модели крыльчаток

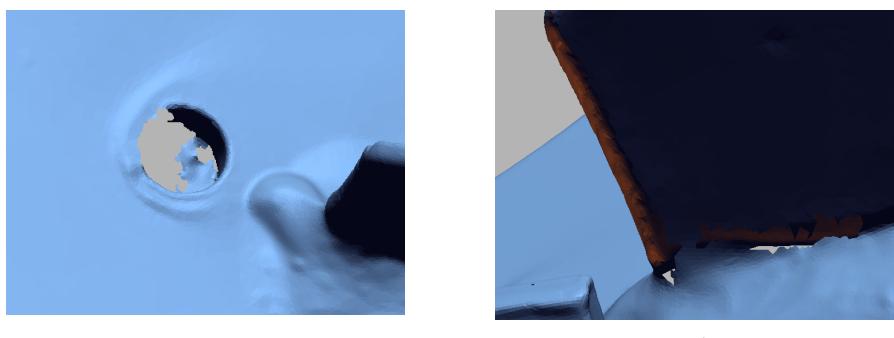


Рис. 2. Примеры дефектов сканирования

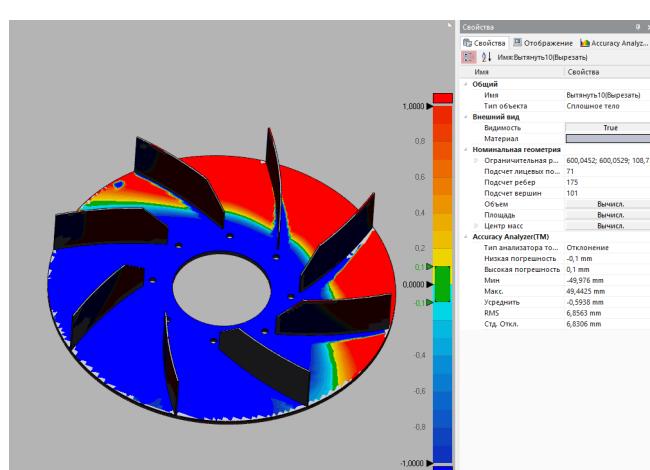


Рис. 3. Пример сравнения полигональной и твердотельной модели изделия

Далее проводится анализ материала и конструкции изделия, выбор технологии изготовления. На данном этапе были выбраны технологии литья, гибки и сварки.

Технология литья. Литье технологический процесс получения изделий путем заполнения подготовленной литейной формы расплавленным материалом. При изготовлении крыльчаток, этот метод позволяет формировать сложные пространственные конфигурации лопаток и дисков крыльчатки с высокой степенью геометрической точности.

Литейная модель должна точно воспроизводить геометрию крыльчатки, учитывать технологические припуски на усадку и последующую механическую обработку. Материалом для модели может служить дерево, модельный пластик, воск, гипс и др. Для получения восковой модели используется пресс-форма. Она состоит из нескольких разъемных и согласованных между собой частей. Для этого предварительно с помощью системы CAD и готовой модели крыльчатки методом «вычитания» делают предварительную пресс-форму. Для удобства использования предусматриваются ручки или захватные устройства, а для надежной фиксации — зажимы [3].

При изготовлении восковой модели крыльчатки с труднодоступными участками используют «сердечники» из хлорида натрия с небольшим количеством связующего элемента. Их помещают в пресс-форму до заливки воска. После затвердевания воска «сердечники» растворяют в воде, формируя необходимые зазоры между лопастями. Восковую модель очищают от облоя и визуально контролируют на наличие дефектов.

Далее к модели припаивают литниково-питающую систему. Она обеспечивает ламинарное заполнение формы расплавом и минимизирует образование дефектов. Обязательны выпоры для отвода газов при заливке.

Литейная форма формируется путем «налипания» на восковую модель формовочной смеси. Она состоит из основных (кварцевые, цирконовые и глинистые пески) и вспомогательных (бентониты, огнеупорные глины, крепители, клеи и т. д.) компонентов. Этот процесс можно автоматизировать с помощью дождевого пескосыпа с основными компонентами, роботизированной руки и смесителя с вспомогательными компонентами. В случае применения «сердечников», затрудняется формировка литейной формы, так как на внутреннюю поверхность восковой модели крыльчатки сложно нанести формовочную смесь. В этом случае необходимо вручную производить формовку литейной формы внутри восковой модели крыльчатки. Далее происходит сушка, запекание литейной формы и подготовка ее к литью [3].

Плавка материала для крыльчатки осуществляется в плавильной печи с контролем температуры и состава расплава. Заливка расплава в литейную форму производится с учетом скорости и угла наклона, чтобы избежать турбулентности и захвата воздуха [3].

После затвердевания и охлаждения отливки производится удаление литников, выпоров и формовочной смеси. Проводится визуально-измерительный и рентгенографический контроль крыльчатки оливки крыльчатки. Дальней-

шая механическая обработка включает шлифовку, полировку и, что особенно важно, балансировку крыльчатки для снижения вибраций и повышения ресурса.

Технология сварки. В контексте изготовления крыльчаток, данный метод подразумевает сборку изделия из отдельных деталей, вырезанных из листового проката и отливок.

Развертки лопаток и дисков крыльчатки разрабатываются с использованием CAD-систем и переносятся на листовой металл. Резка может осуществляться различными методами: плазменная резка, лазерная резка, гильотина или ручная резка с использованием угловой шлифовальной машины.

Детали собираются в соответствии с конструкторской документацией и фиксируются прихватками. Если толщина днища, крышки и лопаток малы (около 5 мм) сварку производят в приспособлении, которое обжимается полностью крыльчатку в сборе и равномерно распределяет лопасти по окружности [4]. Крыльчатка также остывает в приспособлении для уменьшения ее перекосов. Сварка можно осуществлять с использованием различных методов: дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитных газов, дуговая сварка неплавящимся электродом в среде защитных газов, ручная дуговая сварка покрытыми электродами [5]. Важно контролировать тепловложение для предотвращения деформации металла. Сварные швы подвергаются зачистке и шлифовке для получения требуемой формы.

Финальный этап — балансировка крыльчатки. Используются специальные балансировочные станки, либо применяются методы статической балансировки.

Технология изготовления крыльчатки открытого типа. Лопатки крыльчатки из листового проката гнутся для придания нужной формы. Сборка производится по разметке или в приспособлении, которое для небольших объемов можно изготовить из дерева, фанеры (фрезеровка ЧПУ) или пластика (3D-печать). Собранные в приспособлении детали фиксируются прихватками и свариваются обратноступенчатым способом (рис. 4) для минимизации деформаций.

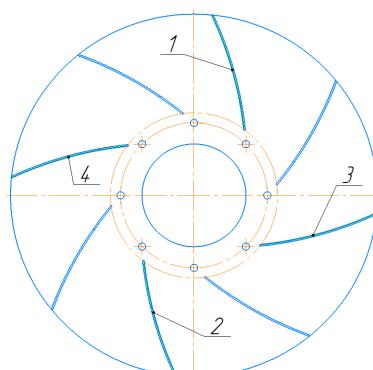


Рис. 4. Способ сварки крыльчатки

После изготовления крыльчатки необходимо выполнить ее балансировку с помощью балансировочной машины и наплавки металла на внутреннюю поверхность дисков (рис. 5) [5].

Технология изготовления крыльчатки закрытого типа. Детали крыльчатки имеют сложную форму и не могут быть получены из стандартного листового проката путем гибки (рис. 6). Для изготовления деталей можно применить литье, ковку и фрезерную обработку.

Для изготовления крыльчатки предлагается рассмотреть два варианта:

- литье крыльчатки целиком с последующей механической обработкой;
- литье отдельно лопаток и дисков, их мехобработка и последующая их сварка.

Для обеспечения сборки деталей на этапе мехобработки выполняются продольные отверстия в дисках и шипы на торцевых поверхностях лопаток (рис. 7).

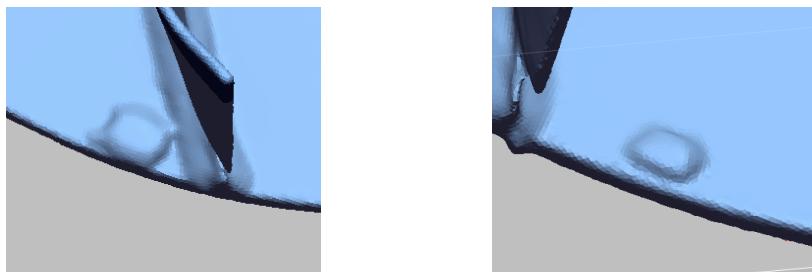


Рис. 5. Балансировка крыльчатки

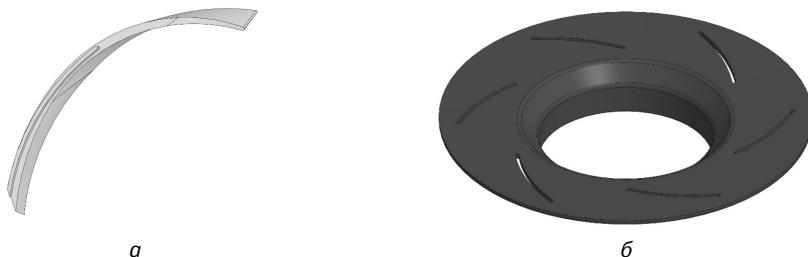


Рис. 6. Модель лопатки (а) и дисков (б) крыльчатки закрытого типа

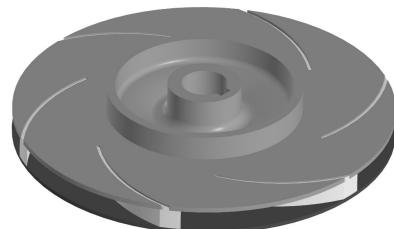


Рис. 7. Сборка крыльчатки закрытого типа

Таким образом, выбор технологий изготовления зависит от сложности геометрии изделия, технологических возможностей производства и объема выпуска. Комбинирование технологий позволяет получить требуемый результат с минимальными затратами для конкретных условий. В случае обратного проектирования крыльчатки открытого типа удается избежать сложных и затратных операций литья. Для изготовления крыльчатки закрытого типа разбиение изделия на детали, позволяет упростить этапы мехобработки изделия.

Литература

- [1] Безъязычный В.Ф. *Основы технологии машиностроения*. Москва, Инновационное машиностроение, 2020, 568 с.
- [2] Грибовский А.А. *Геометрическое моделирование в аддитивном производстве*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2015, 49 с.
- [3] Сергел Н.Н. *Технологическое оборудование машиностроительных предприятий*. Москва, ИНФРА-М, 2013, 732 с.
- [4] Моисеев В.А., Тарасов В.А., Калмыков В.А., Филимонов А.С. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 379 с.
- [5] Бойцов А.Г., Ковалев А.П., Новиков А.С. *Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 584 с.

Reverse engineering and analysis of impeller manufacturing technologies

Radkevich Vladislav Vitalievich

radk.vladis@gmail.com

Trukhanov Konstantin Yurievich

konstantin.truhanov@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses approaches to reverse engineering and the choice of technology for manufacturing impellers, open and closed types. A digital model of the products was obtained using 3D scanning. Optimization of topological models has been carried out in order to eliminate scanning defects. The development of solid-state models is carried out in the Compass-3D package. Bending, casting and welding technologies are offered for the manufacture of products. The single volume of production of products allows the use of cheaper options for the manufacture of assembly and welding devices. Depending on the complexity of the product design, options for combining technologies are considered.

Keywords: reverse engineering, 3D scanning, impeller, welding, casting, bending

УДК 658.5.0121

Технико-экономические аспекты промышленного применения сварки трением с перемешиванием

Царьков Алексей Андреевич

aleksey.tsarkov00@mail.ru

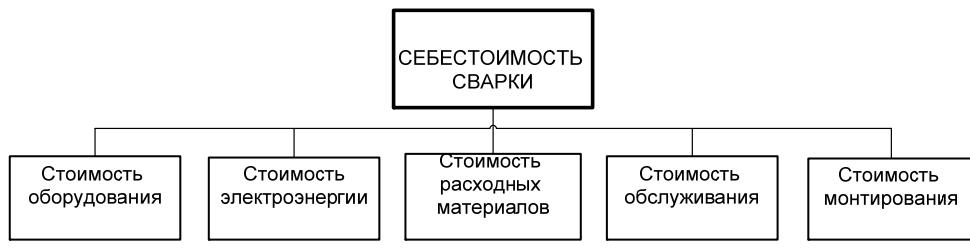
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Выполнен сравнительный технико-экономический анализ различных методов соединения материалов. С использованием метода декомпозиции произведена оценка различных ценовых составляющих традиционных методов сварки. Показана экономическая и технологическая целесообразность внедрения в промышленное производство нового способа сварки в твердом состоянии.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, декомпозиционный подход, MIG/TIG сварка, электронно-лучевая сварка, контактная сварка, высокотемпературная пайка

Введение. Сварка трением с перемешиванием (СТП) это сравнительно новый [1], быстро развивающийся способ соединения металлов в твердой фазе. Как показывает зарубежный опыт, этот способ становится незаменимым во многих отраслях промышленности. Технико-экономический анализ является важнейшим фактором при обосновании внедрения любой новой технологии. Целью данной работы является экономический анализ рентабельности внедрения сварки трением с перемешиванием в современное машиностроительное производство. Анализ осуществлялся путем сопоставления СТП с такими традиционными широко распространенными в промышленном производстве методами сварки как аргонно-дуговая сварка (TIG), сварка плавящимся электродом в среде защитных газов (MIG), электронно-лучевая сварка (ЭЛС), шовная электро-контактная сварка (ШКС) и высокотемпературная вакуумная пайка.

В данном исследовании для оценки экономической эффективности сварочных технологий использовалась количественная аналитическая модель, основанная на методе декомпозиции экономических затрат [2]. Модель, базирующаяся на детальном анализе основных экономических составляющих технологического процесса, требует разбивки процесса на элементарные составляющие, которые определяют базовую стоимостью. Полная стоимость, определяемая как сумма стоимостей отдельных составляющих сварочной технологии, представлена на рисунке. Представленные на схеме компоненты определяют соотношения между стоимостями приобретения оборудования, расходуемого в процессе сварки энергии, расходуемых материалов, зарплатами рабочих и стоимостями монтажа (запуска в эксплуатацию). Эти стоимости в основном определяются скоростью сварки, мощностью сварочной установки, временем эксплуатации, временем вспомогательных операций и производительностью процесса.



Технологическое сопоставление СТП с традиционными промышленными процессами соединения материалов:

а) СТП и TIG сварка: СТП значительно превосходит TIG сварку, в особенности, когда дело касается алюминиевых сплавов. В отличии от TIG, при СТП не образуется расплавленного металла, следовательно нет и характерных для сварки плавлением дефектов: пористости и температурных деформаций. Эта особенность позволяет сохранять присущие алюминиевым сплавам эксплуатационные свойства. Кроме того, СТП является экологически чистым способом, так как отсутствуют присадочные материалы и вредные сварочные газы. Такая комбинация преимуществ делает СТП наиболее надежным и подходящим выбором, когда требуется высокая точность и долговечность соединений;

б) СТП и MIG сварка: СТП — это прекрасная альтернатива MIG сварке, исключающая необходимость плавления основного и присадочного металлов. Это минимизирует такие сварочные дефекты, как пористость и трещинообразование, и сохраняет важные свойства соединяемых сплавов. Как результат, СТП предлагает более экономичное и экологическое решение, сокращая затраты и избавляя от расходования дополнительных газов и присадочного металла. Это делает СТП особенно привлекательной для решения современных промышленных вызовов, где рентабельность и экологическая безопасность становятся все более важными факторами в дополнении к надежному и робастному сварочному процессу;

в) СТП и вакуумная пайка: СТП существенно превосходит пайку по многим аспектам промышленного применения, особенно когда приходится иметь дело с трудно соединяемыми сплавами. При СТП минимизируется уровень термических напряжений и деформаций, характерных для высокотемпературной пайки. При СТП прочное и однородное соединение образуется в результате перемешивания нерасплавленного металла и без участия присадочного материала или флюса. В результате получается высокорентабельный и экологически чистый способ, снижающий нагрузку на внешнюю среду и материальные затраты, характеризующийся хорошей приспособленностью для высокоточных и высокопрочных сварочных соединений в промышленности;

г) СТП и ЭЛС: СТП имеет существенные преимущества перед электронно-лучевой сваркой в ряде ключевых отраслей промышленности. СТП в от-

личии от ЭЛС не требует вакуума и может производиться на открытом воздухе, делая процесс проще и дешевле с точки зрения оборудования и персонала. При сварке больших толщин СТП проще и безопаснее, так как отсутствует рентгеновское излучение, связанное с ЭЛС. Дополнительно СТП можно сваривать более широкий диапазон материалов и обеспечивать чистые высококачественные швы без риска загрязнения. Это делает СТП отличным выбором для промышленного применения там, где прежде всего требуется технологическая гибкость, безопасность и экономическая эффективность.

д) СТП и ШКС: как и все контактные способы сварки (точечная, рельефная, роликовая), так и ШКС плохо подходит для сварки сплавов с высокой электропроводностью. Кроме того, при высокой интенсивности сварки требуется постоянная зачистка электродов и разрушающий контроль соединений. Вышеуказанные операции резко снижают рентабельность роликовой сварки по сравнению с СТП.

Таблица 1

Капитальные затраты [3–5]

СТП головка для станка с ЧПУ	Стоимость встраивания головки для СТП в станок с ЧПУ стоит менее 100 000 евро, что существенно ниже специализированного оборудования для СТП
TIG/MIG оборудование	Цены колеблются от 2 500 до 15 000 евро и выше, плюс дорогие расходуемые материалы и высокий риск затрат на исправление дефектов
ЭЛС оборудование	От маленького до среднего оборудования цена колеблется от 300 000 до 500 000 евро. Настройка оборудования, в случае единичного производства, может стоить более 1 млн евро
Оборудование для вакуумной пайки	Стоимость в зависимости от объема печи колеблется от 200 000 евро до более чем 1 млн
Оборудование для роликовой сварки	В среднем 100 000 евро. Сильно зависит от мощности установки

Эксплуатационные расходы. СТП предлагает ряд очевидных преимуществ, по сравнению с традиционными способами:

- СТП инструмент: как правило, в зависимости от свариваемого материала одного инструмента хватает на выполнение от 800 до 1500 м шва;
- контроль качества: СТП, как правило, не требует серьезного контроля, чем существенно снижает эксплуатационные затраты;
- потребление энергии: СТП характеризуется чрезвычайно низким энергопотреблением.

TIG/MIG:

- необходим достаточно дорогой защитный газ аргона (или гелий), расход которого зависит от длительности сварки;
- при TIG существенные затраты уходят на вольфрамовые электроды;

- оба процесса являются весьма энергоемкими;
- оба процесса требуют расхода сварочной проволоки или прутков, что повышает общие операционные расходы.

ЭЛС:

– для создания высокого вакуума требуется дополнительное потребление энергии вакуумными насосами. Вакуумное оборудование не только потребляет энергию, но и требует дополнительных затрат на его обслуживание;

– обслуживание вакуумной системы электронной пушки и системы управления — это весьма сложный процесс, требующий высококвалифицированного обслуживания;

– потребление энергии генерации и фокусировки электронного пучка сварочной пушки — это высокоэнергозатратный процесс, существенно повышающий общие затраты на электроэнергию;

– требуются достаточно дорогие радиографический и ультразвуковой контроли для гарантированного обеспечения сплошности соединений.

Вакуумная пайка:

– обслуживание вакуумной системы заключается в регулярном обслуживании вакуумных насосов и системы управления. Это обслуживание критично для поддержания устойчивого процесса;

– стоимость материалов для пайки (листы пасты и др.) сильно разнится в зависимости от соединяемых материалов и может быть достаточно высокой;

– требуется непрерывный контроль целостности соединения;

– потребление электроэнергии печью для достижения и поддержания постоянной высокой температуры весьма высоко;

– подготовка под пайку, очистка, точное позиционирование соединяемых частей и припоя трудозатратные и дорогие операции. Эти стадии критичны для качества соединения.

Роликовая контактная сварка:

– налипание свариваемого материала на бронзовые ролики требует регулярной зачистки последних;

– невозможен неразрушающий контроль качества соединений в условиях массового производства. Требуются дополнительные затраты на разрушение и оценку качества сварного ядра, что снижает производительность процесса;

– потребление энергии больше, чем при СТП, и сильно зависит от процессов шунтирования.

Технико-экономическая оценка целесообразности внедрения СТП.

Оценка производилась на примере сварки 10 пластинам радиатора для аэрокосмической промышленности.

Технико-экономическая оценка целесообразности внедрения каждой сварочной технологии оценивалась путем рассмотрения стоимостей присущих каждой из рассмотренных технологий (табл. 2) [3–5].

Как следует из табл. 2, СТП существенно превосходит рассмотренные традиционные методы соединения по своим технико-экономическим характеристикам.

Таблица 2

Стоимости рассматриваемых технологий

Характеристика	СТП	TIG/MIG	ЭЛС	Пайка	ШКС
Капитальные затраты, евро	Менее чем 100 000	От 2 500 до 15 000	От 200 000 до 1 млн	От 200 000 до 1 млн	Около 100 000
Энерго-потребление, кВт/ч	5	–	–	4800	110
Средняя скорость сварки, м/мин	3	TIG: 0,2; MIG: 0,5	от 1 до 2	–	1,2

Выводы. Выполненный в работе технико-экономический анализ существующих сварочных технологий показал перспективность промышленного использования метода сварки трением с перемешиванием.

Литература

- [1] Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. *Friction-stir butt welding*. Patent US № 9125978.8, 1991.
- [2] Costa M.I., Rojas R., Mira-Aguiar T., Leitão C., Rodrigues D.M. A comparative techno-economic evaluation of Friction Stir Welding versus Resistance Seam Welding. *FSWP 2015 International Conference*, 2015.
- [3] Mononen J., Siren M., Hanninen H. Cost comparison of FSW and MIG welded aluminium panels. *Welding in the World*, 2013, vol. 47, pp. 32–35.
- [4] Fulufhelo M. *Conceptual Design of a Friction Stir Welding Machine for Joining Rails*. Master Thesis, Johannesburg, 2009.
- [5] *Friction Stir Welding: Comparing costs with alternative methods*. URL: <https://stirweld.com/en/welding-costs/> (accessed 11.02.2025).

Technical and economic aspects of friction stir welding

Tsarkov Aleksey Andreevich

aleksey.tsarkov00@mail.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

A comparative technical-economic analysis of the different bonding technologies was performed. Conventional welding process price items were estimated. Based on the decomposition technique, the economic feasibility and the technological expediency of a new solid state welding industrial introduction were demonstrated.

Keywords: friction stir welding, decomposition technique, MIG/TIG welding, electron beam welding, resistance welding, brazing

Секция 3. Физика конденсированного состояния и электронная техника

УДК 621.383

Коррекция амплитудно-частотной характеристики фотоприемного устройства в области высоких частот

Андреев Дмитрий Владимирович

dmitrii_andreev@bmstu.ru

Цирульников Илья Юрьевич

tsirulnikoviyu@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Объектом исследования является амплитудно-частотная характеристика фотоприемного устройства, способного регистрировать импульсы лазерного излучения наносекундной длительности в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн. Путем схемотехнического моделирования в системе автоматического проектирования NI Multisim 12.0 было проведено исследование зависимости амплитудно-частотной характеристики устройства от величины емкости цепи отрицательной обратной связи. Моделирование проведено для двух коэффициентов передачи: коэффициент передачи усиительной схемы без учета паразитного влияния фотодиода и коэффициент передачи усиительной схемы с учетом этого влияния.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, амплитудно-частотная характеристика, NI Multisim, схемотехническое моделирование

Фотоприемные устройства (ФПУ) предназначены для детектирования оптического сигнала, преобразования его в электрический и проведения последующего усиления, фильтрации и т. д. [1]. Исследуемое в настоящей работе ФПУ разработано для обнаружения сигналов в диапазоне видимого и инфракрасного излучения. При этом длительность импульсов лежит в пределах от 5 до 100 нс. Подобные результаты возможны благодаря использованию в качестве фотоприемника кремниевого фотодиода (ФД) со структурой $p-i-n$, обладающего быстродействием и линейностью достаточными для регистрации сигнала с подобными параметрами.

Учитывая особенности используемого ФД, заключающиеся в большой величине темнового тока, паразитного сопротивления и емкости, усиительная схема должна обеспечивать наибольшую возможную амплитуду выходного сигнала при минимально возможной величине шума. Уменьшение шумовой составляющей необходимо для улучшения порога чувствительности ФПУ.

В большей степени выполнение данных требований обеспечивается связкой входного каскада усилителя с ФД, для чего был выбран малошумящий СВЧ транзистор типа ЗП344Б. Это обусловлено тем, что по величине ток утечки затвора данного транзистора близок к темновому току ФД и не превышает его при малых входной и проходной емкостях. Также транзистор имеет крутизну характеристики не менее 15 мА/В коэффициент шума не более 1 дБ. Таким образом, ЗП344Б обеспечивает достаточное усиление сигнала, поступающего с ФД, низкий уровень шума и согласование по шумам с расположенным далее преобразователем тока в напряжение, построенным

на основе биполярных транзисторов 2T3191A91 и 2T3187A91. Данная часть схемы позволяет уменьшить шунтирующее влияние паразитной емкости ФД для малых длительностей импульсов [2–5].

Для уменьшения входного сопротивления схемы, являющегося одним из источников шума ФПУ, применяется цепь отрицательной обратной связи (ООС), состоящая из резистора R6 и конденсатора C3. С ее помощью усилен-
тия K определяется как отношение выходного напряжения ко входному току согласно формуле

$$K = I_{\text{вх}} Z_{\text{OOC}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}. \quad (1)$$

При увеличении сопротивления ООС Z_{OOC} увеличивается K . Однако чрезмерный рост Z_{OOC} приведет к увеличению входного сопротивления схемы и влияния паразитной емкости. Для изучения этого влияния и способов его компенсации необходимо построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ФПУ с последующим подбором параметров цепи ООС. С этой целью в САПР NI Multisim 12.0 была построена модель ФПУ с использованием аналогов электронных компонентов из встроенной библиотеки. ФД представлен схемой из импульсного источника тока I1, а его паразитное влияние учтено за счет конденсатора C_fd и резистора R_fd. ЗП344Б заменен на виртуальный транзистор с параметрами, отредактированными для соответствия технической документации (VT1). 2T3191A91 и 2T3187A91 заменены на BFT92W (VT2) и BFR92W (VT3) соответственно [6].

Модель ФПУ, построенная в NI Multisim 12.0, представлена на рис. 1.

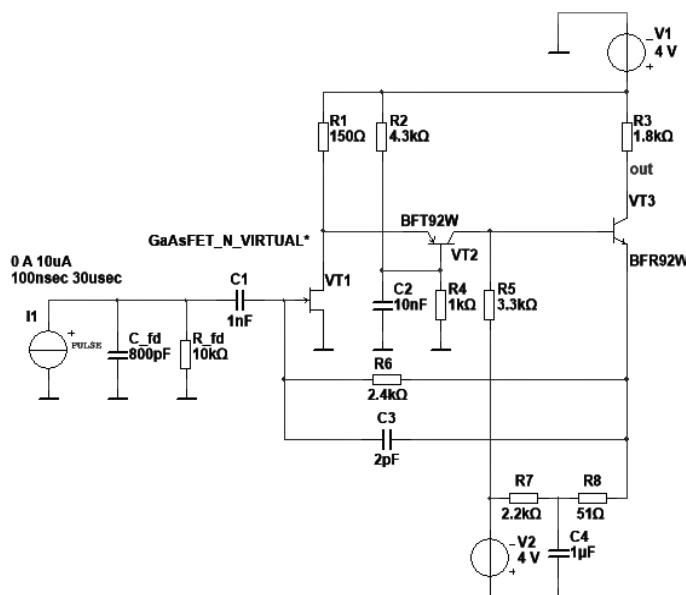


Рис. 1. Модель ФПУ, построенная в NI Multisim 12.0

Для проведения анализа были построены две АЧХ: для коэффициента передачи усилителя без учета паразитного влияния ФД (отношение выходного напряжения к ко входному току усилителя, поступающему на затвор VT1 с конденсатором C1) и для коэффициента передачи с учетом этого влияния (отношение выходного напряжения к ко входному току, всей схемы, поступающему с источника I1).

Результаты моделирования АЧХ представлены на рис. 2.

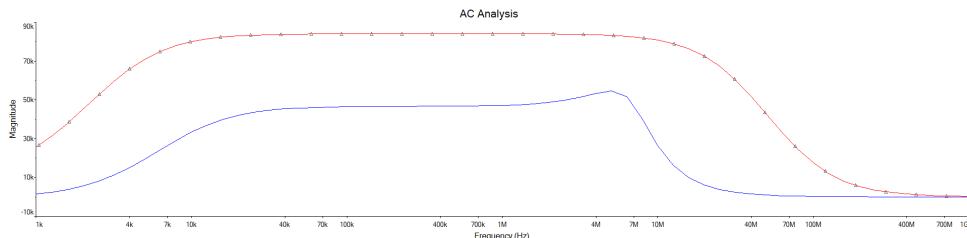


Рис. 2. АЧХ ФПУ

Верхний график соответствует АЧХ усилителя без учета ФД. Из него видно, что наибольший $K \approx 84$ кОм, нижняя граничная частота по уровню $0,7f_h \approx 3$ кГц, а верхняя граничная частота $f_b \approx 33$ МГц.

Нижний график соответствует АЧХ усилителя с учетом ФД. Из него видно, что в области высоких частот присутствует подъем. Следовательно, при повышении частоты принимаемой импульсной последовательности присутствует высокая вероятность возникновения колебаний выходного сигнала с последующей генерацией.

Для устранения подъема АЧХ необходимо провести коррекцию сопротивления цепи ООС в области высоких частот с сохранением величины K . Наиболее простым способом будет увеличение емкости конденсатора С3. Было выявлено, что оптимальная величина составляет 4,7 пФ.

Результаты моделирования АЧХ после корректировки емкости конденсатора С3 представлены на рис. 3.

Из верхнего графика видно, что K и f_h не изменились, а $f_b \approx 14$ МГц.

Из нижнего графика видно, что подъем в области высоких частот практически отсутствует и может считаться незначительным.

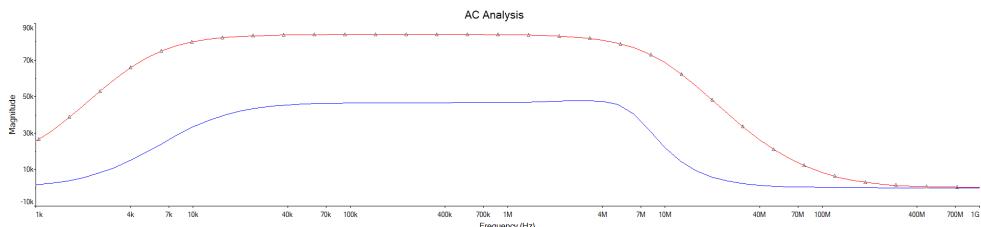


Рис. 3. АЧХ ФПУ после корректировки емкости конденсатора С3

Исходя из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что корректировка АЧХ позволила повысить стабильность работы ФПУ в области высоких частот с сохранением величины K . Однако это также привело к ограничению полосы пропускания устройства.

В статье путем применения САПР NI Multisim 12.0 проведено исследование влияния изменения емкости конденсатора в цепи ООС на АЧХ ФПУ. Представленная схема обеспечивает стабильный коэффициент передачи в широкой полосе частот. Полученные результаты могут быть применимы для практических и учебных целей.

Литература

- [1] Тришенков М.А. *Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов*. Москва, Радио и связь, 1992, 400 с.
- [2] Степаненко И.П. *Основы теории транзисторов и транзисторных схем*. Москва, Энергия, 1977, 672 с.
- [3] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, pp. 102 (1–10). <https://doi.org/10.3390/technologies12070102>
- [4] Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modification of thin oxide films of MOS structure by high-field injection and irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 110, pp. 012041 (1–6). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/110/1/012041>
- [5] Schmidt W. Optimum choice of Si FET or GaAs FET as first stage active device for very low-noise optical receivers with medium bandwidth. *Electronic Letters*, vol. 19, no. 22.
- [6] Разевиг В.Д. *Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0*. Москва, Солон-Р, 2003, 704 с.

Correction of the amplitude-frequency response of a photodetector in the high frequency range

Andreev Dmitry Vladimirovich

dmitrii_andreev@bmstu.ru

Tsirulnikov Iliya Yurjevich

tsirulnikoviyu@student.bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This research considers the amplitude-frequency response of the photodetector designed to register nanosecond laser pulses in the range of visible and infrared wavelength ranges. The study on the amplitude-frequency response of an amplifying circuit on the magnitude of the capacitance in a negative feedback circuit was conducted using circuit simulation in the CAD system NI Multisim 12.0. The simulation was performed for two transmission coefficients: the amplifying circuit without taking into account the parasitic influence of the photodiode and the transmission coefficient of the amplifying circuit taking into account this influence.

Keywords: photodetector, amplitude-frequency response, NI Multisim, circuit simulation

УДК 621.318.1

Миниатюризация дискретных диэлектрических чип-конденсаторов

Лужко Владимир Васильевич luzhkovv@student.bmstu.ru
Адарчин Сергей Александрович adarchin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены современные тенденции миниатюризации дискретных диэлектрических чип-конденсаторов. Представлен обзор существующих технологий и материалов, используемых в производстве чип-конденсаторов. Показано влияние технологических параметров, таких как толщина диэлектрического слоя и точность нанесения электродов, на электрические характеристики и габаритные размеры конденсаторов. Сделаны выводы о необходимости комплексного подхода, включающего разработку новых материалов, оптимизацию технологических процессов и совершенствование методов контроля качества для достижения дальнейшей миниатюризации.

Ключевые слова: миниатюризация, чип конденсатор, диэлектрик, диэлектрическая проницаемость

Миниатюризация электронных компонентов является одной из основных тенденций развития современной электроники. Уменьшение габаритов устройств и повышение плотности компоновки печатных плат напрямую зависят от характеристик и размеров пассивных компонентов, в частности дискретных диэлектрических чип-конденсаторов. В связи с этим, разработка новых материалов и технологий, позволяющих уменьшить размеры конденсаторов без потери их электрических характеристик, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Современные чип-конденсаторы находят широкое применение в различных областях электроники: от мобильных устройств и портативной техники до промышленной автоматики и космической аппаратуры. Общими тенденциями развития конденсаторов является снижение размеров и улучшение эксплуатационных характеристик [1].

Одним из ключевых направлений миниатюризации является использование диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (ϵ). Чем выше значение ϵ , тем меньший объем диэлектрика требуется для достижения заданной емкости. Однако применение материалов с высокой ϵ сопряжено с рядом проблем, таких как повышенные диэлектрические потери, температурная нестабильность и зависимость емкости от напряжения [2].

Другим важным аспектом является совершенствование технологий формирования тонких диэлектрических пленок и точного нанесения электродов. Уменьшение толщины диэлектрического слоя позволяет увеличить эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) и другие параметры [3].

Целью данной работы является анализ современных тенденций в области миниатюризации дискретных диэлектрических чип-конденсаторов и выявление перспективных направлений исследований.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– провести обзор существующих технологий производства чип-конденсаторов, выделив основные материалы и методы, используемые для формирования диэлектрического слоя и электродов;

– ознакомиться с исследованиями о влиянии параметров диэлектрических материалов (диэлектрической проницаемости, диэлектрических потерь, температурной стабильности) на электрические характеристики чип-конденсаторов;

– проанализировать влияние технологических параметров (толщины диэлектрического слоя, точности нанесения электродов, шероховатости поверхности) на размеры и электрические характеристики конденсаторов;

– оценить перспективы применения новых диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, таких как сегнетоэлектрики и материалы на основе оксидов металлов, для дальнейшей миниатюризации чип-конденсаторов.

Чип-конденсатор — это пассивный электронный компонент, предназначенный для накопления электрического заряда и сглаживания пульсаций тока. Он состоит из двух или более металлических обкладок, разделенных диэлектриком, и имеет малые размеры, что позволяет использовать его в интегральных схемах и на печатных платах [4]. Чип-конденсаторы широко применяются в различных электронных устройствах для фильтрации, настройки частоты, блокировки постоянного тока и других целей.

Конденсаторы бывают нескольких типов, в зависимости от их конструкции, применения и технологии производства. Дискретные конденсаторы — это отдельные электронные компоненты, которые устанавливаются на печатную плату или в схему. Дискретные конденсаторы могут быть разных типов, например, электролитические, керамические, пленочные и т. п.

Конденсаторы состоят из смеси тонко измельченных гранул параполимерных или сегнетоэлектрических материалов, соответствующим образом смешанных с другими материалами для достижения желаемых характеристик. Из этих порошковых смесей керамика спекается при высоких температурах. Керамика образует диэлектрик и служит носителем для металлических электродов. Минимальная толщина диэлектрического слоя, которая на сегодняшний день для низковольтных конденсаторов находится в диапазоне размеров 0,5 мкм, ограничена в меньшую сторону размером зерна керамического порошка. Толщина диэлектрика для конденсаторов с более высокими напряжениями определяется диэлектрической прочностью искомого конденсатора.

Электроды конденсатора наносятся на керамический слой путем металлизации [5]. Для многослойных конденсаторов чередующиеся металлизированные керамические слои укладываются друг на друга. Выдающаяся металлизация электродов с обеих сторон корпуса соединена с контактной клеммой.

Лаковое или керамическое покрытие защищает конденсатор от влаги и других воздействий окружающей среды.

В качестве диэлектрических материалов используются различные оксиды металлов, такие как BaTiO_3 , SrTiO_3 , TiO_2 , а также полимерные диэлектрики [6]. Ключевыми характеристиками диэлектрических материалов являются их диэлектрическая проницаемость ϵ , которая определяет способность материала накапливать электрический заряд, а также диэлектрические потери $\text{tg}\delta$, характеризующие потери энергии при поляризации материала. Кроме того, важным параметром является температурная стабильность, которая отражает изменение диэлектрической проницаемости при изменении температуры.

В керамических конденсаторах суммарные потери включают в себя омические потери переменного тока. Потери постоянного тока, которые также называются током утечки или изоляционным сопротивлением, обычно пре-небрежимо малы для переменного тока. Эти потери зависят от частоты, температуры, возраста и, в некоторых случаях, от влажности.

В конденсаторах большего размера наибольшая часть потерь связана с частотно-зависимыми омическими диэлектрическими потерями. В зависимости от требований применения, результаты суммирования резистивных потерь конденсатора могут быть представлены либо как эквивалентное последовательное сопротивление ESR, либо как добротность Q [7].

Исследования показали, что использование материалов с высокой диэлектрической проницаемостью позволяет значительно уменьшить размеры чип-конденсаторов, однако при этом необходимо учитывать влияние диэлектрических потерь и температурной стабильности на характеристики конденсаторов.

Уменьшение толщины диэлектрического слоя приводит к увеличению емкости, но также может приводить к увеличению диэлектрических потерь и снижению напряжения пробоя. Неточность нанесения электродов может приводить к снижению емкости, увеличению эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) и ухудшению температурной стабильности.

Непосредственно уменьшение размеров чип-конденсаторов достигается за счет двух направлений исследований: уменьшения размера зерен керамического порошка и повышения точности контроля производственного процесса.

Использование керамических порошков с более мелкими зернами позволяет формировать более тонкие диэлектрические слои. Это напрямую влияет на габариты конденсатора, поскольку толщина диэлектрического слоя является одним из определяющих параметров. Чем тоньше слой, тем меньше размер конечного компонента [8].

Одновременно с этим, современные производственные технологии обеспечивают более высокий уровень контроля за процессом нанесения и спекания керамических слоев. Это позволяет укладывать большее количество слоев диэлектрика и электродов в одном конденсаторе, не снижая при этом его надежность и электрические характеристики. Увеличение числа слоев при уменьшении их толщины обеспечивает необходимую емкость в меньшем объеме.

Таким образом, анализ современных тенденций в миниатюризации дискретных диэлектрических чип-конденсаторов выявил, что дальнейшее развитие в этой области требует комплексного подхода, включающего совершенствование существующих технологий производства, глубокое понимание влияния параметров диэлектрических материалов и технологических процессов на характеристики конденсаторов. Перспективными направлениями исследований являются изучение и применение новых диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, таких как сегнетоэлектрики и материалы на основе оксидов металлов, с целью достижения еще большей миниатюризации.

Литература

- [1] Макушин М.М., Черепанов И.И. Современные тенденции развития конденсаторов. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2019, № 10, с. 50–55.
- [2] Сенников И.А., Туринов В.И. *Murata: резонаторы, конденсаторы керамические, триммеры*. Москва, Издательский дом «Додэка-XXI», 2003, 96 с.
- [3] Никифоров Д.К., Коржавый А.П., Никифоров К.Г. *Эмиттирующие наноструктуры «металл-оксид металла»: физика и применение*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 156 с.
- [4] Новожилов О.П. *Электроника и схемотехника. Часть 1*. Москва, Юрайт, 2025, 382 с.
- [5] Васильев В.Ю. *Свойства и применение диэлектрических тонких пленок в технологиях микроэлектроники*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2021, 100 с.
- [6] Демидов А.А., Рыбалка С.Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020–2030 гг.). *Прикладная математика и физика*, 2021, т. 53, № 1, с. 53–72.
- [7] Смирнов Ю.А., Соколов С.В., Титов Е.В. *Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники*. Санкт-Петербург, Лань, 2022, 496 с.
- [8] Николаев М.Ю., Мальгин Г.В., Щекочихин А.В., Шкаруба М.В. *Электротехнические и конструкционные материалы*. Нижневартовск, Изд-во НВГУ, 2022, 167 с.

Miniaturization of discrete dielectric chip capacitors

Luzhko Vladimir Vasilyevich

luzhkovv@student.bmstu.ru

Adarchin Sergey Alexandrovich

adarchin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

Modern trends in miniaturization of discrete dielectric chip capacitors are considered. An overview of existing technologies and materials used in the production of chip capacitors is presented. The influence of technological parameters, such as the thickness of the dielectric layer and the accuracy of electrode application, on the electrical characteristics and overall dimensions of the capacitors is shown. Conclusions are drawn about the need for an integrated approach, including the development of new materials, optimization of technological processes and improvement of quality control methods to achieve further miniaturization.

Keywords: miniaturization, capacitor chip, dielectric, permittivity

УДК 621.382

Тонкие пленки в производстве интегральных микросхем

Лужко Владимир Васильевич luzhkovv@student.bmstu.ru

Адарчин Сергей Александрович adarchin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены тонкие пленки как ключевой элемент в производстве интегральных микросхем. Предоставлены основные понятия и определения, связанные с тонкими пленками. Описаны основные методы и технологии нанесения тонких пленок, включая физическое осаждение (PVD) и химическое осаждение из газовой фазы (CVD). Продемонстрировано в чем заключаются сильные и слабые стороны этих методов, а также их ключевые особенности. Особое внимание уделено материалам, которые используются для создания подложек. Сделаны выводы о применение тонких пленок в производстве интегральных микросхем.

Ключевые слова: тонкие пленки, интегральные схемы, CVD, PVD, микроэлектроника, электротехника

Полупроводниковые, диэлектрические и проводящие материалы в виде тонких пленок являются основой для формирования широкого спектра конструктивных элементов изделий микро- и наноэлектронной устройств разного назначения. Тонкая пленка — это слой материала толщиной от одного ряда молекул или атомов до нескольких микрометров, который создается различными методами на поверхности специальных диэлектрических плат произвольной формы — подложках [1].

Целью данной статьи является изучение основных методов и технологий нанесения тонких пленок, а также анализ их преимуществ и недостатков.

Для достижения этой цели был проведен анализ существующих методов нанесения тонких пленок, их преимущества и недостатки. Также рассмотрены перспективы развития технологий нанесения тонких пленок.

Материалы для подложек тонкопленочных ИС (интегральных схем) выбираются исходя из требований к электрическим, механическим и термическим свойствам, а также с учетом процесса нанесения тонких пленок. Некоторые из наиболее часто используемых материалов: стекло, ситалл, сапфир, кварц и кварцевое стекло.

Одним из наиболее распространенных материалов для подложек тонкопленочных ГИС является керамика. Подложки из керамики имеют поликристаллическую структуру и изготавливают их с различным содержанием оксидов: алюминиевая керамика Al_2O_3 и бериллиевая керамика BeO [2]. Керамические подложки обладают рядом преимуществ: низкая стоимость, низкие потери, высокая диэлектрическая проницаемость, незначительное изменение электрофизических параметров при изменении температуры, высокая теплопроводность, что позволяет создавать мощные схемы [2]. Однако у них есть и недостатки:

трудности с полировкой, шероховатая поверхность после спекания, что приводит к повышенному уровню шума по сравнению с ситаллом, и низкая механическая прочность [2].

К настоящему времени для производства интегральных микросхем широко используют два метода получения тонких пленок: метод физического осаждения и метод химического осаждения из газовой фазы. Первый метод, также называемый термином «напыление» или Physical Vapor Deposition (PVD), заключается в переносе на подложку частиц материала путем нагревания поверхности мишени заданного состава и последующей конденсации материала на поверхности подложки [3]. Chemical Vapor Deposition (CVD) — второй метод химического образования нового вещества непосредственно на подложках из исходных химических реагентов, переведенных в парогазовую среду [3].

Качество пленки при PVD-методе сильно зависит от конструкции и материала испарителя. По способу нагрева материала испарители подразделяются на: резистивные с прямым нагревом или косвенным нагревом, электронно-лучевые, импульсные лазерные, индукционные (нагрев осуществляется высокочастотным электромагнитным полем).

Основное влияние на этапе переноса вещества при PVD методе к подложке оказывает степень вакуума в системе, от которой во многом зависит длина свободного пробега до межмолекулярного столкновения [4]. Если молекулы испаряющегося вещества движутся прямолинейно, направленно и не претерпевают на своем пути изменений, то поток называют молекулярным [4]. Скорость конденсации пленки вещества зависит от плотности пучка атомов испаряемого вещества [4].

Преимущества PVD-метода заключаются в его простоте и универсальности, что позволяет использовать его практически для всех элементарных материалов и ряда соединений. Благодаря относительно высокому вакууму, удается получать пленки, практически не загрязненные остаточными газами.

Но метод также обладает рядом недостатков, таких как неоднородность химического состава получаемых пленок и нестабильность их функциональных свойств.

В CVD-методе скорость роста пленки определяется несколькими параметрами, основными из которых являются температура, рабочее давление реактора, а также состав химической состав газовой фазы.

При более низких температурах скорость роста контролируется скоростью протекания химических реакций, протекающих либо в газовой фазе, либо на поверхности подложки [5]. Эта область обычно называется областью кинетического контроля роста, и скорость роста пленки экспоненциально увеличивается с температурой подложки в соответствии с уравнением Аррениуса. Поскольку скорость роста пленки контролируется химической кинетикой, равномерная толщина пленки может быть достигнута за счет минимизации колебаний температуры на поверхности подложки, и именно эта область используется в реакторах периодического действия с горячими стен-

ками, используемых для производства интегральных схем методом CVD низкого давления [5].

По мере повышения температуры скорость роста становится почти независимой от температуры и контролируется массовым переносом реагентов через пограничный слой к поверхности роста, и это называется областью массопереноса или диффузионно-контролируемым ростом [5]. При еще более высоких температурах скорость роста имеет тенденцию к снижению из-за повышенной скорости процесса, при котором молекулы или атомы покидают поверхность твердого тела или жидкости и переходят в окружающую среду с поверхности роста и/или истощения реагентов на стенах реактора из-за паразитных газофазных побочных реакций [5]. Газофазные реакции приобретают все большее значение с повышением температуры и давления.

CVD предлагает множество преимуществ при осаждении тонких пленок и породил широкий спектр связанных технологий. При снижении общего давления можно получить чрезвычайно острые границы раздела с точки зрения химического состава и топографии [6]. Атмосферное давление CVD привлекательно для многих областей применения благодаря высокой скорости напыления и, как следствие, короткому времени обработки. Поскольку процессы CVD основаны на межфазной химии, они чувствительны к загрязнениям, и для поддержания низкого уровня загрязнения необходимо использовать специальные загрузочные системы [6].

Подводя итог можно утверждать, что среди проблем тонкопленочного производства: требование высокой точности и контроля над процессом нанесения слоев, что может усложнить производство, материалы, используемые в тонкопленочных схемах, должны быть высокого качества и чистоты, чтобы обеспечить надежную работу устройства.

Литература

- [1] Поляков В.И., Стародубцев Э.В. *Проектирование гибридных тонкопленочных интегральных микросхем*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2013, 80 с.
- [2] Маскаева Л.Н., Федорова Е.А., Марков В.Ф. *Технология тонких пленок и покрытий*. Екатеринбург, Изд-во Урал, 2019, 236 с.
- [3] Васильев В.Ю. *Введение в технологию химического осаждения из газовой фазы тонких пленок для электроники: оборудование, методология, особенности роста*. Санкт-Петербург, Лань, 2024, 344 с.
- [4] Марков В.Ф., Мухамедзянов Х.Н., Маскаева Л.Н. *Материалы современной электроники*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2014, 272 с.
- [5] Jones A.C., Hitchman M.L. *Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications*. Cambridge, Royal Society of Chemistry, 2009.
- [6] Carlsson J.-O., Marti P.M. *Chemical Vapor Deposition*. Elsevier Inc., 2010.

Thin films in the production of integrated circuits

Luzhko Vladimir Vasilyevich

luzhkova@student.bmstu.ru

Adarchin Sergey Alexandrovich

adarchin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article considers thin films as a key element in the production of integrated circuits. The basic concepts and definitions related to thin films are provided. The main methods and technologies for applying thin films, including physical deposition (PVD) and chemical deposition from the gas phase (CVD), are described. It is demonstrated what the strengths and weaknesses of these methods are, as well as their key features. Special attention is paid in the article to the materials that are used to create substrates. Conclusions are drawn about the use of thin films in the production of integrated circuits.

Keywords: thin films, integrated circuits, CVD, PVD, microelectronics, electrical engineering

УДК 621.317

Оптимизация конструкции печатной платы автоматизированной установки контроля параметров сдвоенного приемопередатчика манчестерского кода для минимизации временных задержек сигналов

Борисов Егор Олегович

borisoveo@student.bmstu.ru

Гришин Григорий Константинович

grishin_gr@mail.ru

Андреев Дмитрий Владимирович

dmitrii_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена задача оптимизации конструкции печатной платы автоматизированной установки контроля параметров сдвоенного приемопередатчика манчестерского кода для минимизации временных задержек сигналов. Описана проблема увеличения времени задержки микросхемы, приведена последовательность конструкции печатной платы, а также предложено решение проблемы. Приведены анализ недостатков предыдущей версии печатной платы и ключевые направления модернизации. Результаты опытных испытаний подтверждают стабильность работы новой конструкции печатной платы и его применимость для различных технических задач в области передачи сигналов.

Ключевые слова: схема, конструкция, измерение, манчестерский код, ГОСТ

Введение. Современные системы передачи данных требуют повышенной надежности, особенно в условиях воздействия внешних помех. Актуальной задачей является разработка устройств, обеспечивающих не только точную передачу информации, но и защиту оборудования от электрических помех. В данной работе рассматривается микросхема, предназначенная для гальванически развязанной передачи данных с использованием сдвоенного манчестерского кода. Этот метод кодирования обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными подходами, такими как NRZ (Non-Return-to-Zero), благодаря повышенной помехоустойчивости и возможности самосинхронизации.

Основная особенность сдвоенного манчестерского кода заключается в том, что каждый бит информации кодируется двумя перепадами уровня сигнала в строго заданные временные интервалы. В отличие от стандартного манчестерского кода, где переход в середине интервала обозначает «1», а его отсутствие — «0», сдвоенный вариант гарантирует переход в начале каждого тактового периода. Логическое значение бита определяется наличием или отсутствием второго перехода в середине интервала: переход соответствует «1», а его отсутствие — «0». Такая избыточность минимизирует риски ошибок, вызванных искажениями сигнала, и упрощает синхронизацию приемника с передатчиком [1–7].

Микросхема включает два функциональных блока: передатчик и приемник. Передатчик преобразует двоичные данные в последовательность перепадов напряжения согласно алгоритму сдвоенного манчестерского кода. В его состав входят высокоскоростной счетчик для генерации тактовых импульсов, логический модуль кодирования и усилитель, регулирующий амплитуду выходного сигнала. Это позволяет адаптировать устройство к различным условиям передачи, например при значительных потерях в линии связи. Для обеспечения гальванической развязки между передающей и принимающей сторонами используется оптоизоляция или трансформаторная развязка, что исключает риск повреждения оборудования из-за высоковольтных помех.

Приемник выполняет обратное преобразование: анализирует входной сигнал, определяя моменты переходов с помощью компаратора, синхронизирует тактовый генератор и декодирует данные. Важной функцией является возможность обнаружения ошибок синхронизации, что позволяет системе своевременно реагировать на потерю данных. Кроме того, микросхема поддерживает режим запрета приема, который активируется внешним сигналом для защиты от ложных срабатываний при превышении допустимых параметров сигнала [8, 9].

Таким образом, рассматриваемая микросхема представляет собой эффективное решение для надежной передачи данных в условиях повышенных электромагнитных помех. Использование сдвоенного манчестерского кода в сочетании с гальванической развязкой и встроенными механизмами защиты обеспечивает высокую точность и устойчивость к внешним воздействиям, что делает ее перспективной для применения в промышленных и телекоммуникационных системах.

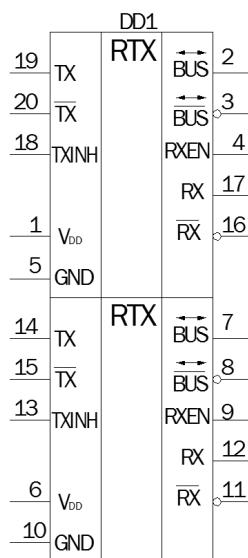


Рис. 1. Схема расположения выводов микросхемы

Таблица 1

Назначения выводов

Номер вывода (канал А / канал В)	Обозначение	Назначение вывода
1 / 6	U _{CC}	Напряжение питания
2 / 7	BUS	Прямой выход передатчика и вход приемника
3 / 8	<u>BUS</u>	Инверсный выход передатчика и вход приемника
4 / 9	RXEN	Вход разрешения приемника
5 / 10	GND	Общий вывод
16 / 11	<u>RX</u>	Инверсный выход приемника
17 / 12	RX	Прямой выход приемника
18 / 13	TXINH	Вход разрешения передатчика
19 / 14	TX	Прямой вход передатчика
20 / 15	<u>TX</u>	Инверсный вход передатчика

Таблица 2

Основные электрические параметры при температуре (25±5) °C

Наименование параметра, единица измерения, режим измерения	Буквенное обозначение	Норма	
		не менее	не более
Выходное напряжение низкого уровня, В при: $I_{OL} = 4$ мА, $U_{CC} = 4,5$ В	$U_{OL\ R}$	–	0,4
Выходное напряжение высокого уровня, В при: $I_{OH} = -0,4$ мА, $U_{CC} = 4,5$ В	$U_{OH\ R}$	2,7	–
Входной ток низкого уровня, мкА, при $U_{CC} = 5,5$ В	I_{IL}	-10	–
Входной ток высокого уровня, мкА, при $U_{CC} = 5,5$ В	I_{IH}	–	10
Ток потребления, мА, при $U_{CC} = 5,5$ В	I_{CC}	–	24
Динамический ток потребления, мА: – рабочий цикл передачи информации 50 % – непрерывная передача информации	I_{OCC1} I_{OCC2}	– –	352 600
Размах выходного напряжения передатчика в режиме непосредственной связи, В	U_{OPP}	6	9

Окончание табл. 2

Наименование параметра, единица измерения, режим измерения	Буквенное обозначение	Норма	
		не менее	не более
Время задержки распространения сигнала при включении, нс, при $U_{CC} = 4,5$ В			
– от BUS до RX	$t_{PHL\ R}$	–	480
– от RXEN до RX	$t_{PHL\ EN}$	–	50
– от TX INH до BUS	$t_{PHL\ INH}$	–	120
– от TX до BUS	$t_{PHL\ T}$	–	200
Время задержки распространения сигнала при выключении, нс, при $U_{CC} = 4,5$ В			
– от BUS до RX	$t_{PLH\ R}$	–	480
– от RXEN до RX	$t_{PLH\ EN}$	–	50
– от TX INH до BUS	$t_{PLH\ INH}$	–	190
– от TX до BUS	$t_{PLH\ T}$	–	200

Минимальная наработка, ч	
– в нормальном режиме	100 000
– в облегченном режиме (рабочий цикл передачи информации не более 50 %)	120 000
Минимальный срок сохраняемости, лет	25

Указания по применению и эксплуатации: допустимое значение статического потенциала 2000 В.

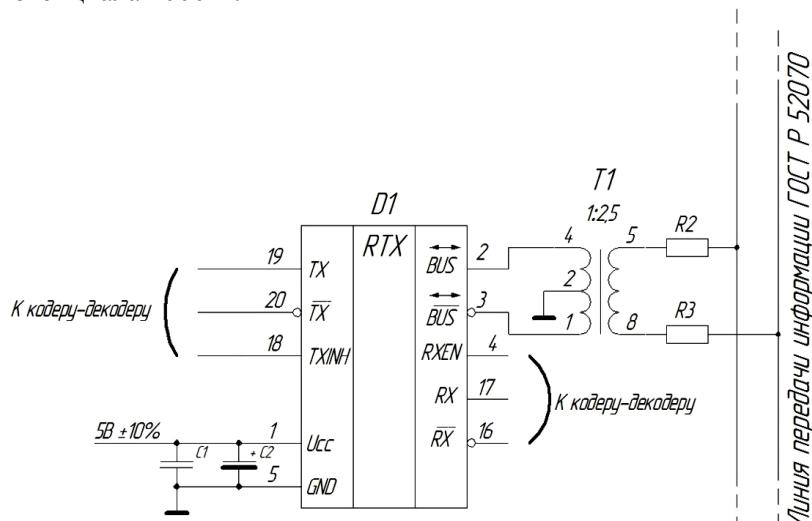


Рис. 2. Схема включения при измерении параметров:

D1 — микросхема; C1 — конденсатор 0,1 мкФ; C2 — конденсатор 10 мкФ; T1 — трансформатор гальванической развязки ТИЛ6B; R2, R3 — резисторы 55 Ом $\pm 0,1\%$

Таблица 3

Электрические режимы эксплуатации

Наименование параметра режима, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма	
		не менее	не более
Напряжение питания, В	U_{CC}	4,5	5,5
Входное напряжение низкого уровня, В	U_{IL}	0	0,8
Входное напряжение высокого уровня, В	U_{IH}	2,0	U_{CC}
Размах дифференциального входного напряжения приемника, В	U_{IR}	—	9,0
Выходной импульсный ток передатчика, А	I_O	—	0,55

Оптимизация конструкции печатной платы для минимизации временных задержек сигналов. В ходе испытаний разрабатываемого устройства была обнаружена погрешность при определении времени задержки распространения сигнала при активации и деактивации приемника. Использование осциллографического оборудования выявило двукратное превышение ожидаемых значений: вместо проектных 15 нс зафиксирован результат 30 нс (рис. 3). Данное несоответствие потребовало модернизации топологии печатной платы (ПП) [10].

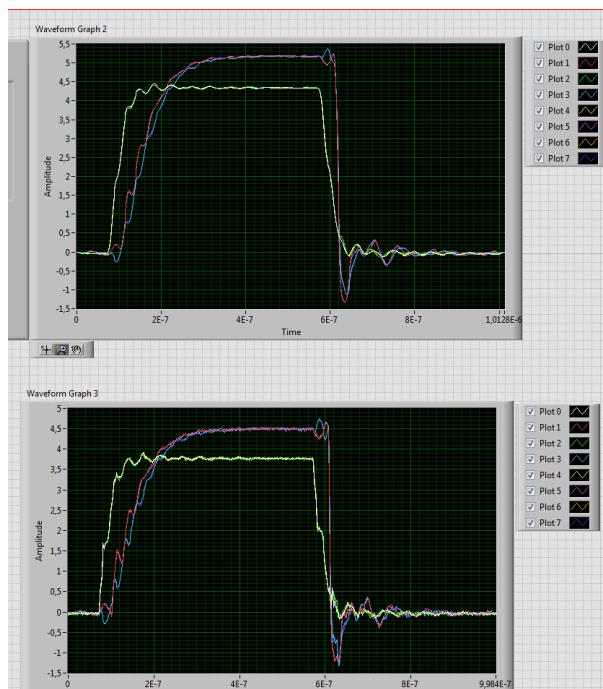


Рис. 3. Осциллограмма сигналов до внесения изменений

Таблица 4

Исходные значения времени задержки $t_{PHL\ EN}$

U_{CC} , В	$t_{PHL\ EN}$, нс
4,5	30,4

Основной причиной отклонения стал некорректный фронт сигнала, характеризующийся увеличенной длительностью перехода. Расширение фронта, зарегистрированное осциллографом, свидетельствовало о наличии паразитных длин проводников и емкостей в трассировке. При этом источник сигнала демонстрировал стабильность параметров, что исключало его влияние на погрешность. Для устранения дефекта выполнена комплексная оптимизация:

- переработана конфигурация проводников с минимизацией их длины;
- внедрены методы контроля целостности сигналов.

Реализация этих мер позволила стабилизировать временные характеристики и повысить надежность устройства [11, 12].

Анализ недостатков предыдущей версии ПП. Исходная конструкция платы обладала рядом ограничений, негативно влияющих на функционал.

1. Компоновка элементов: базовая схема включала микроконтроллер, пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы), трансформатор и разъемы для периферии. Однако плотность монтажа не соответствовала современным стандартам, увеличивая габариты устройства.

2. Технологические аспекты: применение устаревших методов поверхностного монтажа (SMD) ограничивало возможность миниатюризации и повышало вероятность тепловых деформаций.

3. Устойчивость к помехам: схемы обработки манчестерского кода не имели эффективной защиты от электромагнитных наводок, что провоцировало ошибки декодирования.

4. Качество производства: наличие дефектов пайки (холодные соединения, перемычки) снижало надежность контактов.

Ключевые направления модернизации.

1. Модернизация компонентной базы:

- конденсаторы: установлены элементы с низким ESR, что снизило уровень шумов;
- резисторы: внедрены элементы с допуском $\pm 0,1\%$, обеспечивающие стабильность при температурных колебаниях.

2. Изменение архитектуры платы. Разделение монолитной ПП на два модуля (рис. 5–6) позволило:

- сократить длину сигнальных трасс;

– улучшить тепловой режим за счет рационального размещения компонентов;

- обеспечить возможность усовершенствования системы.

3. Защита от помех:

– экранирование: установка заземляющих экранов и экранированных проводов вдоль критических трасс;

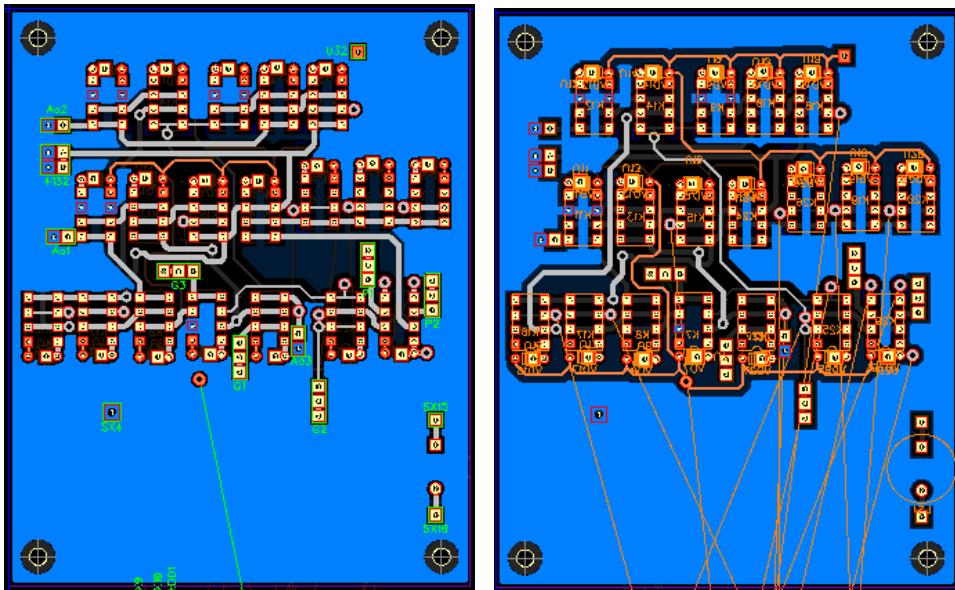


Рис. 4. Исходная версия печатной платы

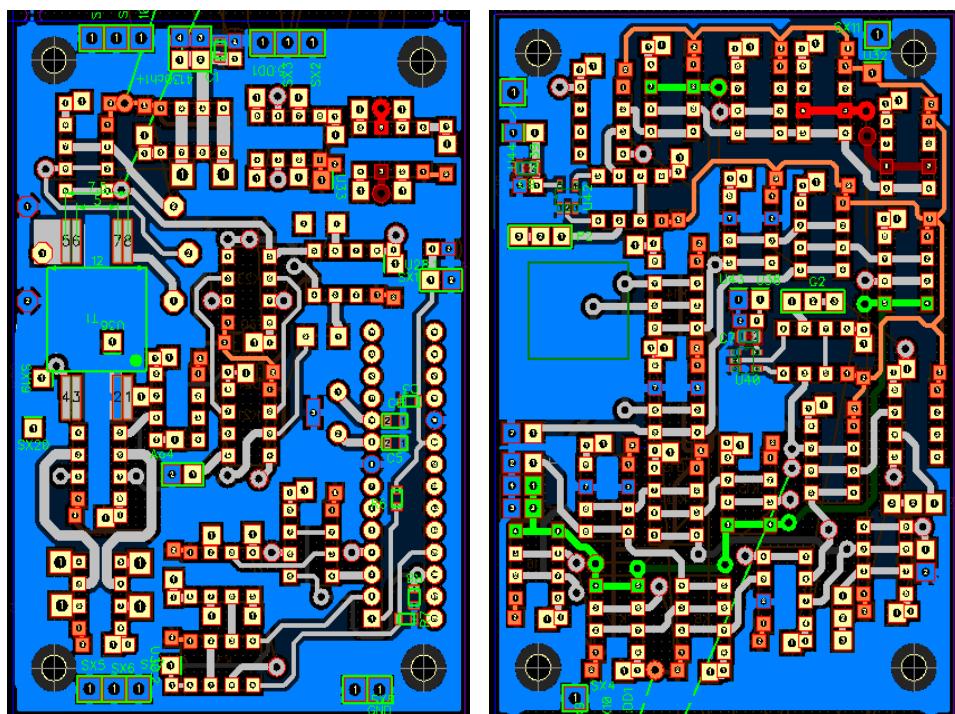


Рис. 5. Верхняя сторона новой ПП

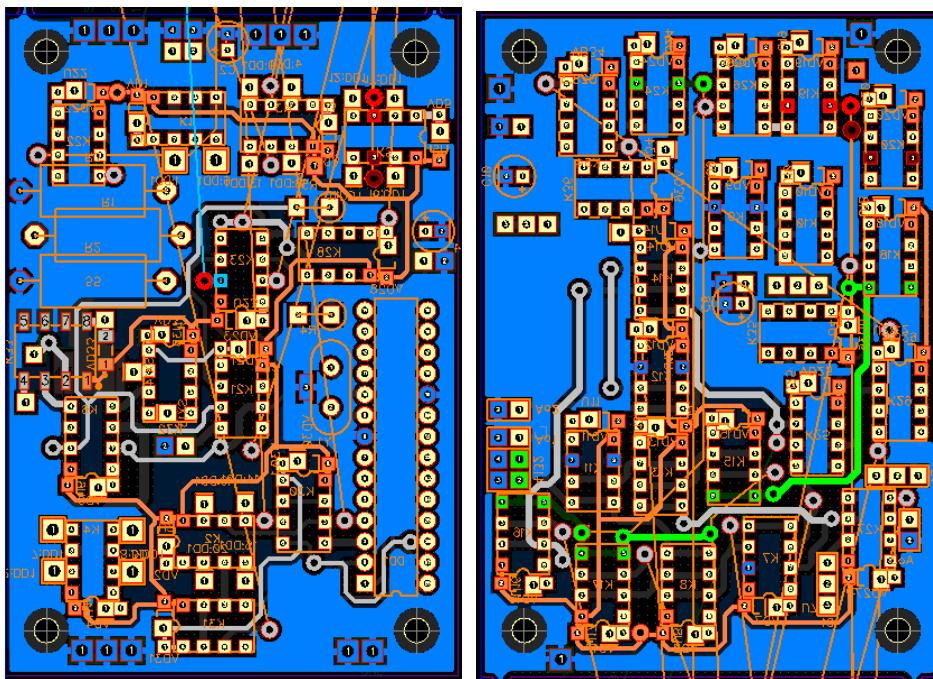


Рис. 6. Нижняя сторона новой ПП

- фильтрация: добавление RC-фильтров на входах/выходах;
- топология: использование дифференциальных пар для передачи высокочастотных сигналов.

Результаты внедрения изменений. После оптимизации время задержки снизилось до 12,8 нс (табл. 5), что соответствует техническому заданию. Осциллограмма демонстрирует четкий фронт сигнала с минимальными искажениями (рис. 7).

Таблица 5

Итоговые значения $t_{\text{PHL EN}}$

$U_{\text{CC}}, \text{В}$	$t_{\text{PHL EN}}, \text{нс}$
4,5	12,8

Заключение. Модернизация печатной платы автоматизированной установки контроля параметров сдвоенного приемопередатчика манчестерского кода позволила устранить ключевые недостатки: снизить чувствительность к помехам, повысить стабильность работы при нагрузках, обеспечить совместимость с современными алгоритмами, а также улучшить показания времени задержки. Внедрение модульной архитектуры создает основу для дальнейшего расширения функционала устройства.

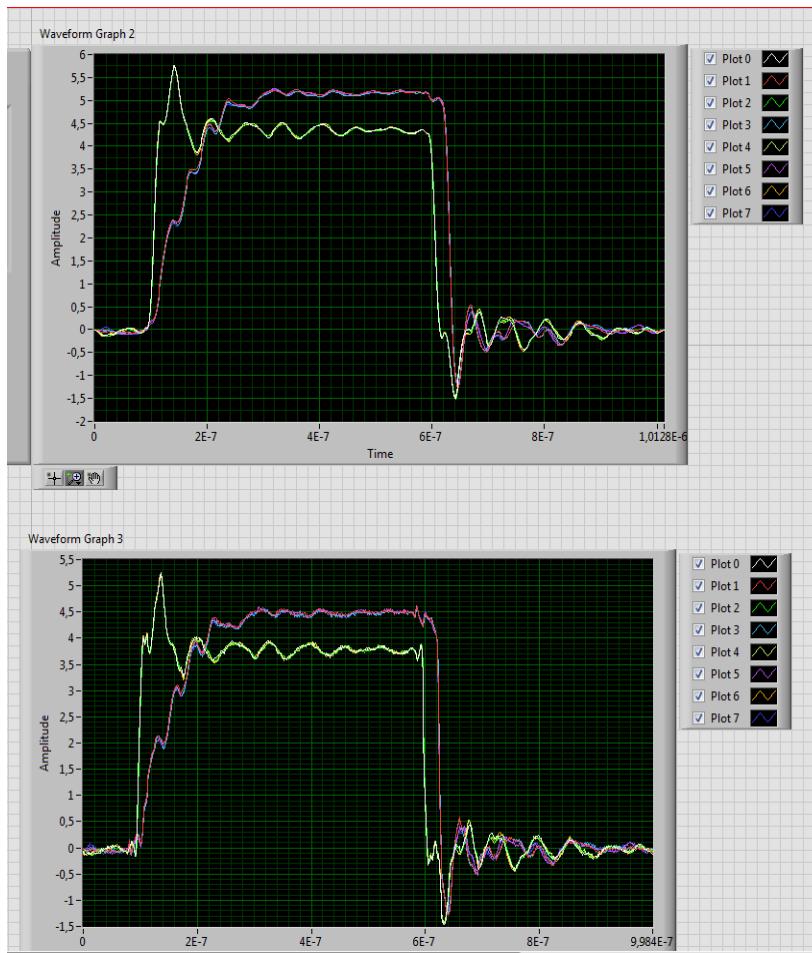


Рис. 7. Временные характеристики после доработок

Литература

- [1] Andreev D.V., Maslovsky V.M., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modi-fied Ramped Current Stress Technique for Monitoring Thin Dielectrics Reliability and Charge Degradation. *Phys. Status Solidi A*, 2022, vol. 219, iss. 9, pp. 2100400 (1–5). <https://doi.org/10.1002/pssa.202100400>
- [2] Андреев В.В., Жалнин В.П., Столяров А.А. *Физические основы микро- и наноэлектроники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 292 с.
- [3] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки. *Микроэлектроника*, 2000, т. 29, № 2, с. 105–112.
- [4] Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В. *LabVIEW: практикум по электронике и микропроцессорной технике*. Москва, ДМК-Пресс, 2014.

- [5] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Loskutov S.A., Stolyarov A.A. The method of the MIS structure interface analysis. *Surface and Interface Analysis*, 1999, vol. 28, pp. 142–145. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9918\(199908\)28:1<142::AID-SIA593>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9918(199908)28:1<142::AID-SIA593>3.0.CO;2-1)
- [6] Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. *Теория передачи сигналов*. Москва, Радио и связь, 2011, 368 с.
- [7] Кузнецов В.В., Андреев В.В. Установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом импульса линии передачи. *Приборы и техника эксперимента*, 2024, № 2, с. 64–69. <https://doi.org/10.31857/S0032816224020087>
- [8] Raymer M. *Design of a Data Demodulator for a Manchester Coded Digital Optical Communication System*. Master's Thesis, University of Dayton, 2019.
- [9] Vasiliev V., Morozov E. *Advanced Mechanics of Composite Materials*. Oxford UK, Elsevier, 2021, 514 p.
- [10] Lu N., Kim D.H. *Handbook of Flexible and Stretchable Electronics*. CRC Press, 2020.
- [11] Новиков Ю.В. *Введение в цифровую схемотехнику*. Москва, БИНОМ, 2007, 343 с.
- [12] Neil H.E., Weste D.M.H. *CMOS VLSI Design. A Circuits and Systems Perspective*. Pearson, Addison-Wesley, 2015.

Optimization of the circuit board design of the automated parameter monitoring unit of the Manchester code dual transceiver to minimize time delays of signals

Borisov Egor Olegovich borisoveo@student.bmstu.ru
Grishin Grigorii Konstantinovich grishin_gr@mail.ru
Andreev Dmitrii Vladimirovich dmitrii_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The paper considers the problem of optimizing the design of a printed circuit board for an automated parameter monitoring system for a dual Manchester code transceiver to minimize time delays in signals. The problem of increasing the delay time of the microcircuit is described, the sequence of the PCB design is given, and a solution to the problem is proposed. The analysis of the shortcomings of the previous version of the printed circuit board and the key directions of modernization are given. The experimental test results confirm the stability of the new PCB design and its applicability to various technical tasks in the field of signal transmission.

Keywords: circuit, design, measurement, Manchester code, GOST

УДК 520.8.054

Фотодиоды с обратной подсветкой

Геращенко Александр Евгеньевич nekros.praim@yandex.ru

Васильев Никита Тимурович kiritokusaki@mail.ru

Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены материалы, применяемые для изготовления фотодиодов, способы повышения эффективности фотодиодов и варианты их корпусов. Описаны способы хранения и транспортировки фотодиодов и защита их от нежелательного воздействия света. Даны рекомендации по использованию материалов, которые лучше всего подходят для производства фотодиодов, корпусов, обеспечивающих наилучшую защиту и удобство использования фотодиодов, повышение чувствительности фотодиодов.

Ключевые слова: фотодиод с обратной подсветкой, транспортировка фотодиода, корпус фотодиода, кремний, германий, арсенид гали

Введение. Фотодиоды — это полупроводниковые электронные приборы, которые преобразуют свет в электрический ток [1]. Они являются одним из фундаментальных компонентов в области оптоэлектроники, соединяя мир света и электричества, и играют критически важную роль в широком спектре современных технологий. Их способность напрямую реагировать на свет делает их незаменимыми в изделиях, требующих обнаружения, измерения и преобразования оптических сигналов в электрические, а также где необходимо чувствительность к свету в широком диапазоне длин волн.

Фотодиоды используются при подаче напряжения в запирающем направлении: при включении прямого смещения в цепи фотодиода течет прямой ток, слабо зависящий от освещенности и опасный из-за большой величины, могущей вызвать перегрев прибора, его работа основана на фотоэлектрическом эффекте [2]. Когда фотон света попадает на полупроводниковый материал он может передать свою энергию электрону в материале. Этот процесс приводит к высвобождению электронов и образованию положительно заряженных «дырок». Внутри фотодиода есть область, называемая $p-n$ переходом, где эти заряды разделяются под действием встроенного электрического поля. Электроны перемещаются в одну сторону, а дырки — в другую, создавая электрический ток, пропорциональный интенсивности падающего света. Этот ток может быть измерен внешней схемой, что позволяет использовать фотодиод в качестве детектора света.

Материалы для изготовления фотодиодов. Чтобы определиться с материалом, который нужно использовать для изготовления фотодиода необходимо знать какие нужны характеристики прибору и в каких условиях он будет работать.

Основными параметрами фотодиода являются: спектральная чувствительность, темновой ток, скорость отклика, линейность, емкость. Темновой ток представляет собой обратный ток $p-n$ перехода. Под воздействием светового облучения кроме темного начинает проходить ток, обусловленный генерацией электронно-дырочных пар и совпадающий по направлению с обратным током [2].

Кремниевые фотодиоды являются самыми распространенными, так как обладают хорошей чувствительностью в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, легко обрабатываются и интегрируются в микрэлектронные схемы, из-за чего имеют хорошую стабильность. Такие параметры привлекли внимание и кремний получил наиболее высокую степень изученности и самые современные технологии обработки и применения, из-за чего снизилась стоимость изготовления приборов. Вместо кремния можно использовать германий, который также хорошо чувствителен в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах. Однако германий имеет более чувствительность в более длинноволновом диапазоне и обладает большим темновым током, что способствует снижению чувствительности при слабом освещении. Также аналогом кремния является арсенид индия-галлия. Он обладает высокой чувствительностью, низким уровнем шума и высоким быстродействием, однако стоит намного больше, нежели кремний [3].

Повышение чувствительности фотодиода в коротковолновом диапазоне. Поскольку в обычном фотодиоде, фотоны, чтобы попасть в область $p-n$ -перехода, должны пройти через металлические контакты, чтобы повысить чувствительность фотодиода к освещению стоит использовать обратную подсветку, которая позволяет минимизировать мертвые зоны на краях устройства и коротковолновому свету проникать непосредственно в активную область, без прохождения по металлическим контактам и сильно легированным слоям у поверхности. В обычном фотодиоде с фронтальной подсветкой свет попадает на верхний слой полупроводника, где расположены управляющие слои. Однако эти слои поглощают или отражают часть света, что снижает эффективность преобразования. В фотодиоде с обратной подсветкой свет попадает на кристалл с противоположной стороны от управляющих слоев. Для улучшения свойств кристалл фотодиода изготавливается очень тонким или подвергается специальной обработке, чтобы минимизировать потери света. Управляющие слои располагаются на задней стороне, обеспечивая путь для сбора генерируемых электронов.

На рисунке красной линей показан коэффициент поглощения у фотодиода с обратной подсветкой, а зеленой — без обратной подсветки. Благодаря обратной подсветке коэффициент поглощения заметно возрастает, что способствует увеличению чувствительности фотодиода к излучению.

Корпуса и транспортировка. Наибольшее распространение получили фотодиоды в металлических корпусах ТО-5, ТО-8, ТО-18, ТО-46, они хоть и обладают высокой стойкостью к физическим воздействиям, но являются слишком громоздкими. Также используются пластиковые DIP-корпуса, кото-

рые более компактны, нежели металлические, но хуже защищают от влаги, физических воздействий и плохо отводят тепло [4]. Для удобства использования фотодиодов следует помещать их в корпуса, максимально приближенных к размерам чипов. Таким образом, возможно эффективно располагать фотодиоды на рабочей поверхности, тем самым оптимизировать используемое пространство, уменьшить габариты прибора, защитить от физических воздействий и от влаги. Тонкий слой металлического покрытия наносится путем погружения фотодиода в электролит, под воздействия на него электричества. Так как необходим слой, который будет способен выдерживать механические воздействия, то необходимо сделать его не около 1–2 мм. Для этого необходимо использовать электролит содержанием хлорида железа и хлорида аммония. Время для создания слоя 1–2 суток.

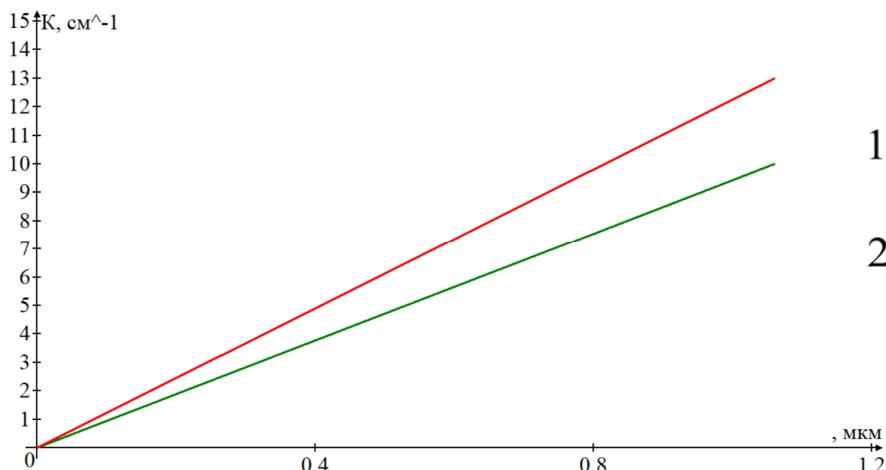


График сравнения коэффициентов поглощения:
1 – фотодиод с обратной подсветкой; 2 – фотодиод без обратной подсветки

Фотодиоды являются достаточно хрупким изделием, они могут выйти из строя при падении или резком сотрясении. Проволочные соединения являются ненадежными и могут отделиться от контактных площадок фотодиода при падении детектора или ином резком физическом ударе. Воздействие на фотодиод экстремально высоких или низких температур при хранении может повлиять на последующую работу. Для обеспечения оптимальной производительности и срока службы необходимо поддерживать условия, в которых не образуется конденсат и избежать влияния статического электричества на приборы. При транспортировке фотодиодов, особенно фотодиодов с обратной подсветкой, следует упаковывать их максимально плотно друг к другу, чтобы избежать нежелательных движений во время доставки. Также стоит заворачивать их в непрозрачную пластиковую пленку, для защиты от света,

а в саму емкость, в которой будут транспортироваться приборы, положить пакетики с силикагелем, чтобы фотодиоды не пострадали от влаги. Контейнер должен быть устойчив к воздействию статического электричества.

Заключение. По результатам статьи были рассмотрены фотодиоды, материалы для их изготовления, был предложен способ увеличения их эффективности в КВ диапазоне и предложен корпус, который будет обеспечивать достаточную защиту, но при этом, не будет обладать большими габаритами.

Литература

- [1] Алейник А.С., Востриков Е.В., Волковский С.А., Дейнека Е.Г., Стригальев Е.В., Мешковский Е.К. *Основы схемотехники приемопередающих электронных устройств*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2021, 74 с.
- [2] Айбатов Л.Р., Кесель Л.Г. *Исследование фотодиодов и фоторезисторов*. Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, 2013, 6 с.
- [3] Горбунов Ю.И., Козырь И.Я. *Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы*. Москва, Высшая школа, 1989, с. 59–60.
- [4] Kasap S.O. *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*. Prentice Hall, 2001, 178 p.

Back-lit photodiodes

Gerashchenko Alexander Evgenievich

nekros.praim@yandex.ru

Vasiliev Nikita Timurovich

kiritokusaki@mail.ru

Andreev Vladimir Viktorovich

vladimir_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses the materials used for the manufacture of photodiodes, ways to increase the efficiency of photodiodes and options for their housings. Methods of storing and transporting photodiodes and protecting them from unwanted light exposure are described. Recommendations are given on the use of materials that are best suited for the production of photodiodes, enclosures that provide the best protection and ease of use of photodiodes, and increase the sensitivity of photodiodes.

Keywords: *back-illuminated photodiode, photodiode transportation, photodiode housing, silicon, germanium, gallium arsenide*

УДК 621.2-76

Сравнительное исследование пенопластов и компаундов для герметизации изделия электроники

Геращенко Александр Евгеньевич

nekros.praim@yandex.ru

Васильев Никита Тимурович

kiritokusaki@mail.ru

Андреев Владимир Викторович

vladimir_andreev@bmstu.ru

Лыков Дмитрий Анатольевич

lykov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведена сравнительная характеристика пенопласта ПЭН-У-300 и компаунда ПЭК-74, применяемых в изделиях электронной промышленности для герметизации приборов. Рассмотрены их физико-механические свойства, химическая стойкость, теплоизоляционные и диэлектрические характеристики. Проведен анализ преимуществ и недостатков каждого материала, а также их области применения в зависимости от эксплуатационных условий. Даны рекомендации по использованию пенопластов и компаундов для герметизации электронных блоков.

Ключевые слова: пенопласт, компаунд, ПЭН-У-300, ПЭК-74, теплоизоляция, механическая прочность, химическая стойкость

Введение. Пенопласты и компаунды находят широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как низкая плотность, высокая прочность, хорошие теплоизоляционные характеристики и устойчивость к химическим веществам [1–3]. Среди наиболее популярных марок выделяют ПЭН-У-300 и ПЭК-74. Эти материалы имеют сходные свойства, но различаются по ряду характеристик, что определяет их конкретные области применения [4].

Физико-механические свойства. ПЭН-У-300 обладает более высокой плотностью (220–320 кг/м³) по сравнению с ПЭК-74, что обеспечивает его повышенную механическую прочность [1]. Он имеет хорошие показатели разрушающего напряжения при сжатии (3,5–5,0 МПа) и изгибе (3,6–5,0 МПа), что делает его подходящим для конструкционных элементов, подвергающихся нагрузкам. ПЭК-74, напротив, характеризуется меньшей плотностью, что делает его более легким, но менее устойчивым к механическим нагрузкам [5].

Теплоизоляционные свойства. Коэффициент теплопроводности у обоих материалов составляет 0,05–0,06 Вт/(м · К), что свидетельствует об их высокой теплоизоляционной способности [6]. Это делает их востребованными в строительстве и производстве теплоизолирующих элементов.

Водопоглощение и химическая стойкость. ПЭН-У-300 имеет низкое водопоглощение (0,045 кг/м² за 24 часа), что делает его устойчивым к воздействию влаги [2]. ПЭК-74 также обладает хорошей влагостойкостью, но менее устойчив к воздействию агрессивных химических сред [7].

Диэлектрические характеристики. ПЭН-У-300 демонстрирует высокую диэлектрическую проницаемость (1,4–1,6 при 10^6 Гц) и низкие диэлектрические потери ($5 \cdot 10^3$), что делает его пригодным для электроизоляционных применений [7]. ПЭК-74, обладая схожими характеристиками, чаще используется в производстве упаковочных и декоративных элементов, где требования к электрическим свойствам не так высоки.

Температурная стойкость. Температурный диапазон эксплуатации ПЭН-У-300 составляет от -60 до $+100$ °C, а температура термодеструкции достигает $+200$ °C [4]. ПЭК-74 имеет меньшую термостойкость, что ограничивает его применение в условиях высоких температур [6].

Методы работы с материалом. При выборе метода работы с пенопластами важно учитывать их структуру и физико-химические свойства. ПЭН-У-300 имеет порошкообразную структуру, тогда как ПЭК-74 обладает смоловидной консистенцией [5]. Эти особенности оказывают значительное влияние на удобство обработки и скорость выполнения работ.

Экспериментальные исследования компаундов и пенопластов. Был проведен эксперимент для ПЭН-У-300 и ПЭК-74, в ходе которого они были помещены в печку на $+60$ °C на 2 часа и резко охлаждены до -60 °C на 2 часа. В результате ПЭН-У-300 покрылся трещинами, а ПЭК-74 выдержал проверку температурами.



Трещины на ПЭН-У-300 после эксперимента

В результате эксперимента было выявлено, что ПЭН-У-300 не выдерживает быстрые перепады температур, в отличие от ПЭК-74.

Заключение. В ходе работы проведен сравнительный анализ ПЭН-У-300 и ПЭК-74, выявлены их основные различия и области применения. ПЭН-У-300 обладает большей механической прочностью, устойчивостью к химическим воздействиям и высокими диэлектрическими характеристиками, что

делает его предпочтительным для промышленных и конструкционных целей. ПЭК-74, в свою очередь, отличается меньшей плотностью и большей легкостью, и выяснено экспериментально лучшей работой в среде с перепадами температур что определяет его использование в экстремальных условиях.

Литература

- [1] ПЭН-У. URL: <https://plkpp.ru> (дата обращения 21.03.2025).
- [2] Пенокомпаунд ПЭК-74. URL: <https://himmax.ru> (дата обращения 21.03.2025).
- [3] Компаунды и герметики. URL: <https://pentasever.ru> (дата обращения 21.03.2025).
- [4] Заливочные компаунды для защиты электротронных компонентов. URL: <https://mirsmazok.ru> (дата обращения 21.03.2025).
- [5] Герметизация корпусов для электроники. Часть 1: пластик и резина. URL: <https://habr.com> (дата обращения 21.03.2025).
- [6] Компаунд герметик. URL: <https://siz-max.ru> (дата обращения 21.03.2025).
- [7] Конструкционные пенопласти. URL: <https://thp.su> (дата обращения 21.03.2025).

Comparative study of foams and compounds for sealing electronic products

Gerashchenko Alexander Evgenievich nekros.praim@yandex.ru
Vasiliev Nikita Timurovich kiritokusaki@mail.ru
Andreev Vladimir Viktorovich vladimir_andreev@bmstu.ru
Lykov Dmitry Anatolyevich lykov@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

A comparative characteristic of PEN-U-300 foam and PEK-74 compound used in electronic industry products for sealing devices is made. Their physical and mechanical properties, chemical resistance, thermal insulation and dielectric characteristics are considered. The advantages and disadvantages of each material are analyzed, as well as their applications depending on the operating conditions. Recommendations on the use of foams and compounds for sealing electronic components are given.

Keywords: foam, compound, PEN-U-300, PEK-74, thermal insulation, mechanical strength, chemical resistance

УДК 621.791.16

Дефекты в ультразвуковой сварке в микроэлектронике

Ботов Артемий Николаевич

botov-2001@mail.ru

Адарчин Сергей Александрович

adarchin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлена информация об основных дефектах в ультразвуковой сварке, которая является одним из самых современных и эффективных методов соединения различных материалов. Ультразвуковая сварка уже успешно применяется в микроэлектронике при производстве микросхем. Выявлены основные причины возникновения дефектов в процессе УЗ микросварки. Приведены основные методы борьбы с ними. Особое внимание уделено дефектам холодной сварки и пережогам точки, как наиболее встречающимся в производстве.

Ключевые слова: ультразвук, ультразвуковая сварка, методы, дефект, технологии сварки

Введение. Ультразвуковая сварка (УЗ-сварка) — один из ключевых методов соединения материалов в микроэлектронике, применяемый для сборки микросхем, датчиков, MEMS-устройств и других миниатюрных компонентов. Этот метод ценится за бесконтактность, отсутствие нагрева и возможность работы с тонкими металлическими и полимерными структурами. Однако, как и любой технологический процесс, УЗ-сварка подвержена возникновению дефектов, которые могут ухудшить качество соединения и надежность изделия [1].

Основные дефекты в УЗ микросварке и методы их решения.

Холодная сварка. Брак холодной сварки в ультразвуковой сварке (УЗС) микроэлектроники — это дефекты соединений, возникающие из-за нарушения технологического процесса и приводящие к ухудшению механической прочности, электрической проводимости или долговечности контактов. Основные виды брака включают: непровары, пережоги, разрушение проводников, повышенное контактное сопротивление и коррозионную нестабильность. Эти дефекты особенно критичны в микроэлектронике, где размеры элементов составляют единицы микрометров, а требования к надежности крайне высоки. Основные причины брака связаны с неправильными параметрами сварки (недостаточная амплитуда колебаний, избыточное давление, неверное время воздействия) или неподходящими свойствами материалов (толщина проводников, степень окисления, наличие примесей). Например, при сварке алюминиевых проводников толщиной 20 мкм недостаточное давление (менее 0,3 МПа) приводит к слабому контакту, а слишком высокая амплитуда (свыше 30 мкм) — к разрыву металла. Дополнительные факторы — загрязнение поверхности, влажность и вибрации оборудования [2].

Для минимизации дефектов необходимо:

- оптимизировать параметры сварки (амплитуда, давление, время) под конкретные материалы;
- очищать поверхности от оксидов и загрязнений (плазменная обработка, химическое травление);
- использовать автоматизированные системы с обратной связью для контроля силы и энергии ультразвука;
- проводить ускоренные испытания (термоциклирование, виброиспытания) для проверки надежности [3].

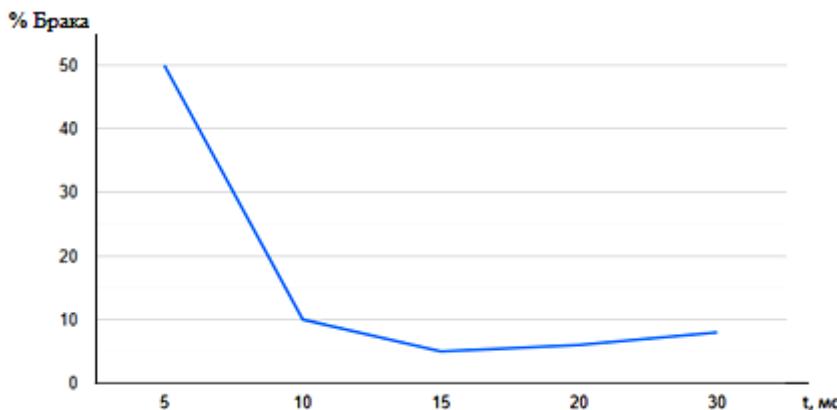


Рис. 1. Влияние времени сварки (амплитуда 5 мкм, давление 0,5 Н) на процент выхода бракованных соединений

Брак пережатия точки. Брак пережатия точки (англ. over-compression bond defect) — это дефект ультразвуковой сварки, возникающий при чрезмерном механическом давлении на соединяемые элементы, приводящий к:

- деформации проволоки сверх допустимых пределов (более 35 % от исходного диаметра);
- повреждению подложки (кремниевой основы или контактных площадок);
- образованию микротрещин в зоне соединения.

Методы устранения.

- Оптимизация параметров сварки, рекомендуемые параметры для Au 25 мкм:

- давление: 0,5–0,7 Н/мм²;
- амплитуда: 20–25 мкм;
- время: 80–120 мс;
- мощность: 0,8–1,2 Вт.

Совершенствование инструмента: использование керамических наконечников:

- срок службы в 3 раза больше стальных;
- точность позиционирования $\pm 0,5$ мкм.

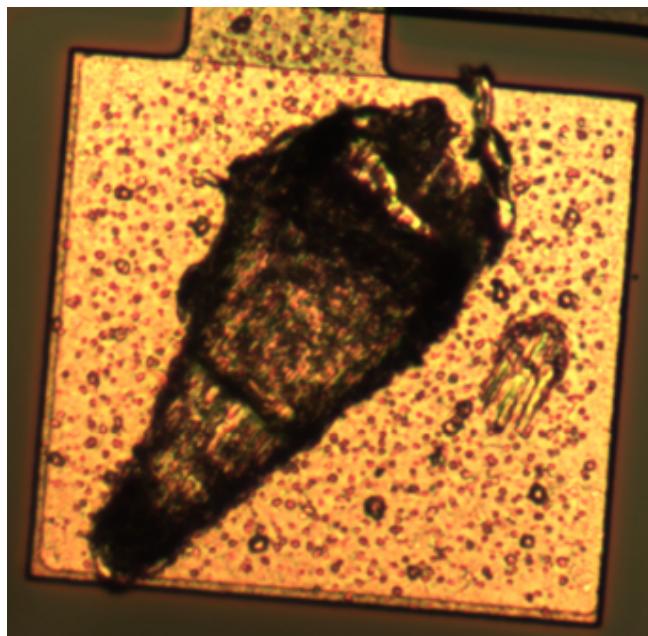


Рис. 2. Пережатие точки

Перегрев. Перегрев при ультразвуковой сварке — один из ключевых видов брака, который может привести к деградации материалов, разрушению соединений и снижению надежности микрэлектронных компонентов [4].

Причины перегрева:

— чрезмерная мощность ультразвука. Слишком высокая амплитуда колебаний инструмента (сонатрона) вызывает избыточное трение и локальный нагрев. Приводит к плавлению или термическому повреждению контактных площадок;

— длительное время сварки. Превышение оптимального времени воздействия ультразвука ведет к накоплению тепла. Особенно критично для термочувствительных материалов (например, алюминиевых проводников или полимерных подложек);

— неоптимальное давление прижима. Слишком высокое давление увеличивает трение и нагрев. Слишком низкое — приводит к плохому контакту и необходимости дольше воздействовать ультразвуком.

Оптимизация параметров сварки:

— подбор амплитуды, времени и давления под конкретный материал;
— использование автоматизированных систем контроля (например, мониторинг импеданса).

Заключение. В ходе работы был проведен анализ основных дефектов в ультразвуковой сварке, рассмотрены причины их возникновения, были предложены методы устранения дефектов.

Литература

- [1] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев С.С., Цыганок С.Н. *Ультразвук. Аппараты и технологии*. Бийск, Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015, 688 с.
- [2] Петухов И.Б., Ланин В.Л., Емельянов В.А. *Технология и оборудование микросварки в производстве изделий электронной техники*. Минск, Интегралполиграф, 2021, 164 с.
- [3] Достанко А.П. *Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионнолучевые, ультразвуковые*. Минск, Бестпринт, 2009, 202 с.
- [4] Кундас С.П., Ланин В.Л., Достанко А.П. *Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т. 2*. Минск, Бестпринт, 2003.

Defects in ultrasonic welding in microelectronics

Botov Artemy Nikolaevich botov-2001@mail.ru
Adarchin Sergey Alexandrovich adarchin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article provides information about the main defects in ultrasonic welding, which is one of the most modern and effective methods of joining various materials. Ultrasonic welding has already been successfully used in microelectronics in the manufacture of microchips. The main causes of defects in the process of ultrasonic micro-welding have been identified. The main methods of dealing with them are given. Special attention is paid to the defects of cold welding and pinching points, as the most common in production.

Keywords: ultrasound, ultrasonic welding, methods, defect, welding technology

УДК 621.3.049

Схема начального сброса при включении напряжения питания на основе КМОП-технологии

Корнев Сергей Александрович s.kornev.tov@gmail.com
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена схема начального сброса при подаче питания на основе КМОП технологии. Показан принцип ее действия и процесс настройки параметров для обеспечения заданного порогового напряжения питания, при котором срабатывает схема начального сброса, а также установки задержки перед выходом из состояния сброса, после стабилизации напряжения питания. Проведено сравнение предлагаемой схемы начального сброса при подаче питания с аналогами на основе RC-цепочек. Рассмотрены преимущества и недостатки предлагаемой схемы.

Ключевые слова: начальный сброс, напряжение питания, схема начального сброса при подаче напряжения питания, МДП-прибор, КМОП микросхемы

Схемы начального сброса при включении питания (Power-on-Reset, PoR) важны для инициализации цифровых блоков в цифровых и аналого-цифровых интегральных схемах [1]. Они препятствуют функционированию цифровых схем в неправильных условиях, таких как неизвестное состояние внутренних регистров, слишком низкое напряжение питания и др.

Также такие схемы могут использоваться и для подачи разрешающего сигнала для аналоговых блоков, обеспечивая задержку их включения после подачи питания [2]. Она нашла широкое применение в различных микросхемах: микроконтроллерах, системах на кристалле, процессорах, блоках цифровой обработки сигналов и многих других [3].

Как следует из названия, схемы начального сброса обеспечивают подачу активного сигнала сброса, пока напряжение питания микросхемы не достигнет заданного уровня, а также некоторое время после — тем самым обеспечивая задержку выхода схемы из начального состояния до момента стабилизации питания [4]. Напряжение питания, при котором схема выходит из начального состояния сброса, называется пороговым напряжением питания (V_T).

Классической схемой начального сброса является схема на основе RC-цепочки и двух инверторов (буфера) [5]. Вначале напряжения на конденсаторе и напряжения питания (V_{CC}) одинаковы и равны нулю. После того, как V_{CC} начинает возрастать, конденсатор С заряжается через резистор R. Достигнув порогового напряжения КМОП-транзисторов в инверторах V_T , сигнал с конденсатора переводит выходной сигнал сброса в состояние логической единицы и процесс сброса заканчивается (в примере рассматривается активный низкий сигнал сброса).

В работе предлагается более надежная схема начального сброса, использующая только КМОП-транзисторы. Основным ее элементом являются перекрестно-связанные КМОП инверторы, транзисторы которых имеют разную ширину каналов: если p -канальный транзистор первого инвертора имеет ширину канала x , то p -канальный транзистор второго инвертора $2x$. Для n -канальных транзисторов используется обратное соотношение: для второго инвертора используется ширина канала y , а для первого $2y$. Такое соотношение размеров необходимо для предотвращения состояния метастабильности после подачи напряжения питания [1, 2]. Напряжение на инверторы подается через источник тока на основе полевого транзистора, а дополнительная задержка контролируется с помощью КМОП-конденсатора.

Для получения сигнала сброса выходы перекрестно-связанных инверторов подключаются к двухвходовому элементу ИЛИ-НЕ (активный высокий сигнал сброса), а для получения обратного сигнала может использоваться дополнительный инвертор (активный низкий сигнал сброса) [3, 4].

Пока напряжение питания не достигнет порогового напряжения транзистора V_T , используемого в качестве источника тока для инверторов, их выходные сигналы будут равны логическому нулю, а конденсатор не будет заряжаться.

После того как напряжение питания достигнет V_T , начинается зарядка конденсатора, с помощью которого можно контролировать время задержки выхода из состояния сброса.

До того как напряжение на конденсаторе не достигнет порогового напряжения инверторов, их выходы будут в состоянии логического нуля, тем самым обеспечивая высокий сигнал сброса на выходе элемента ИЛИ-НЕ.

После того как напряжение на конденсаторе станет выше порогового напряжения инверторов, один из них перейдет в состоянии логической единицы и тем самым выведя микросхему из состояния начального сброса: выход ИЛИ-НЕ перейдет в состояние логического нуля.

Контроль времени задержки выхода схемы из начального состояния производится настройкой емкости конденсатора, а также изменением параметров источника тока [5]. Для увеличения задержки, можно как увеличить емкость конденсатора, так и уменьшить силу тока источника.

По сравнению с схемой на основе RC-цепочки, такой блок позволяет добиться лучшей температурной стабильности параметров времени задержки выхода из состояния сброса, путем использования более сложных КМОП схем для источника тока. Также она менее восприимчива к отклонениям технологического процесса и имеет меньший размер, чем схемы на основе RC-цепочки.

Литература

- [1] Xie R., Zhao Q., Ma Y., Xie F., Lin F. and Zhang S. A power-on-reset circuit with precisely triggered threshold voltages. *International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, 2017, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2017.8126498>

-
- [2] Zhang J., Jiang L. and Zeng Z. Design of a Novel Power-on-Reset Circuit Based on Power Supply Detector. *International Conference on Scalable Computing and Communications; Eighth International Conference on Embedded Computing*, 2009, pp. 355–359.
<https://doi.org/10.1109/EmbeddedCom-ScalCom.2009.70>
 - [3] Kornev S.A., Andreev V.V. Development of On-Chip Debugging Module for RISC-V Processor. *Science, Engineering and Business: Collection of materials V Interacademic Conference for Graduate Students and Young Researchers*. Moscow, 2023, pp. 148–149.
 - [4] Curty J.P., Joehl N., Dehollain C., Declercq M.J. Remotely powered addressable UHF RFID integrated system. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, vol. 40, pp. 2193–2202.
<https://doi.org/10.1109/JSSC.2005.857352>
 - [5] Dieguez A., Arbat A., Sanuy A., Casanova R., Rossinyol M. and Samitier J. A Wake-Up circuit with temperature compensated Clock In 1.2V-0.13 μ m CMOS Technology. *14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 2007, pp. 367–370.
<https://doi.org/10.1109/ICECS.2007.4511006>

CMOS Power-on-Reset Circuit

Kornev Sergey Alexandrovich

s.kornev.tov@gmail.com

Andreev Vladimir Victorovich

vladimir_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The Power-on-Reset Circuit based on CMOS technology is discussed. The principle of operation of the circuit and the process for setting the parameters to provide a given threshold supply voltage at which the initial reset circuit is triggered, as well as the setting of the delay before leaving the reset state after stabilization of the supply voltage, are presented. Comparison of the proposed Power-on-Reset circuit with analogues based on RC chains is shown. The advantages and disadvantages of the proposed scheme are discussed.

Keywords: Power-on-Reset, supply voltage, power-on-reset circuit, MIS-structure, CMOS chip

УДК 621.317

Исследование частотных характеристик конденсаторов

Чубурков Александр Евгеньевич chuburkov2015@mail.ru
Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено поведение реальных конденсаторов в высокочастотных цепях, отличающееся от идеальной модели из-за паразитных параметров. Представлены результаты экспериментального исследования частотной зависимости импеданса керамического конденсатора в диапазоне 1–60 МГц с использованием анализатора импедансов. Показано, что импеданс конденсатор имеет резонанс на частоте около 46 МГц. Сделан вывод, что игнорирование паразитных параметров приводит к неточности проектирования радиоэлектронной аппаратуры. Полученные данные можно применять для оптимизации проектирования импульсных источников питания, ВЧ-устройств и цифровых систем, где критична точность моделирования компонентов.

Ключевые слова: конденсаторы, импеданс, паразитные параметры, частотная зависимость

Современная электроника немыслима без конденсаторов — этих незаменимых компонентов, выполняющих ключевые функции в фильтрации, стабилизации питания и обработке сигналов. Однако на практике инженеры часто сталкиваются с неочевидными проблемами при работе конденсаторов в реальных схемах: повышенным нагревом, неэффективной фильтрацией помех или внезапным падением эффективности на определенных частотах [1]. Эти явления объясняются тем, что реальные конденсаторы ведут себя иначе, чем их идеальные теоретические модели.

Главными характеристиками, определяющими работу конденсатора в цепи переменного тока, являются комплексный импеданс и эквивалентное последовательное сопротивление (ESR). Эти параметры напрямую зависят от частоты сигнала и конструкции компонента [2]. Понимание их взаимосвязи позволяет правильно выбирать конденсаторы для конкретных применений — будь то высокочастотные цифровые схемы, импульсные источники питания или прецизионные аналоговые устройства.

Как правило, идеальный конденсатор рассматривается в теории как компонент, обладающий только емкостью (C) без каких-либо паразитных параметров. Его реактивное сопротивление (X_C) зависит исключительно от частоты и описывается формулой $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$.

В такой модели отсутствуют потери энергии, индуктивность, утечки и температурные зависимости.

Электрофизическая структура физического конденсатора сложна и включает в себя, помимо основной емкости, паразитные параметры. К ним относятся: эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), обусловленное потерями в диэлектрике, обкладках и утечками тока, а также паразитная индуктивность (ESL), возникающая вследствие конечных размеров компонента [3]. Из-за этих факторов импеданс (Z) конденсатора определяется не только емкостью, но и частотными характеристиками и описывается формулой:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2},$$

где $X_L = 2\pi fL$.

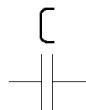


Рис. 1. Идеальный конденсатор

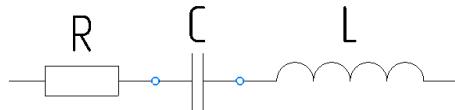


Рис. 2. Реальный конденсатор

В качестве объекта исследования был использован выводной керамический конденсатор К10-17Б номиналом 220 пФ. Данные о паразитных параметрах отсутствуют в документации, предоставляемой производителем. Частотные зависимости импеданса конденсатора были измерены в диапазоне частот от 1 до 60 МГц при помощи антенного анализатора и измерителя импедансов MINI1300. Номинальное выходное сопротивление измерителя составляет 50 Ом. Схема подключения прибора показана на рис. 3. Тестируемый конденсатор подключается без кабеля к выходу прибора через переходную плату с разъемом SMA. Таким образом, минимизируется паразитные емкости кабелей и присоединительного устройства [4].

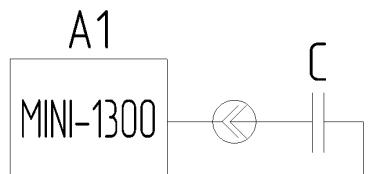


Рис. 3. Схема измерения паразитных параметров конденсатора:
A1 — прибор MINI1300; XW1 — коаксиальный соединитель SMA; C — тестируемый конденсатор

Результаты измерений импеданса для керамического конденсатора К10-17Б показаны на рис. 4. Из графика частотных зависимостей видно, что активная часть импеданса R_s практически не зависит от частоты. Реактивная

часть импеданса X_S указывает на то, что резонансная точка 46 МГц имеет чисто активный импеданс. Далее происходит монотонный рост X_S с увеличением частоты. Данный график демонстрирует классическое поведение реального конденсатора с ярко выраженным индуктивным характером. Таким образом, полный импеданс резистора с некоторой степенью погрешности можно считать полностью активным. График зависимости модуля импеданса $|Z|$ от частоты имеет характерную V-образную форму с четко выраженным минимумом. Диапазон частот от 0 до 45 МГц составляет емкостную область, в которой импеданс определяется X_C , уменьшаясь с ростом частоты. На частоте 46 МГц резонансная частота, где импеданс минимальен и равен ESR. С последующим увеличением частоты доминирует ESL, импеданс растет пропорционально частоте.

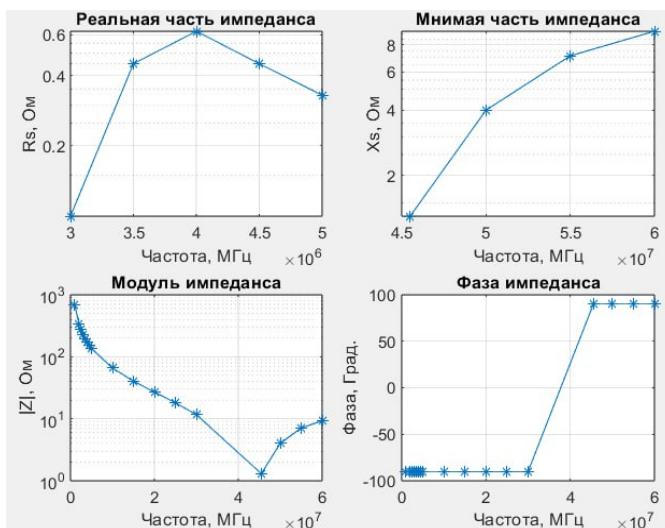


Рис. 4. Результаты измерения паразитных параметров керамического конденсатора К10-17Б номиналом 220 пФ

Проведенное исследование подтвердило, что реальные конденсаторы обладают сложной частотной зависимостью импеданса, обусловленной паразитными параметрами — эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) и индуктивностью (ESL). В отличие от идеальной модели, где импеданс определяется только емкостным сопротивлением, реальный конденсатор демонстрирует три характерных режима работы:

- емкостной (ниже резонансной частоты) — импеданс уменьшается с ростом частоты;
- резонансный — наблюдается минимум импеданса, равный R ;
- индуктивный (выше резонансной частоты) — импеданс возрастает из-за влияния L .

Результаты измерений показали, что даже у керамического конденсатора малой емкости (220 пФ) паразитные параметры существенно влияют на его поведение в высокочастотных схемах. Это подчеркивает важность учета ESR и ESL при проектировании электронных устройств, особенно в импульсных источниках питания, ВЧ-цепях и цифровых схемах, где неидеальность конденсаторов может привести к нестабильности работы, потерям энергии и электромагнитным помехам [5].

Для точного расчета схем необходимо использовать реальные частотные характеристики конденсаторов, а не только их номинальные параметры. В противном случае возможны ошибки, приводящие к снижению эффективности фильтрации, перегреву компонентов и даже выходу устройств из строя.

Литература

- [1] Джонсон Г., Грэхем М. *Конструирование высокоскоростных цифровых устройств. Начальный курс черной магии*. Москва, Вильямс, 2016, 624 с.
- [2] Murthy B.S.S. *Passive Components for Circuit Design*. Newnes, 2001, 288 p.
- [3] Vishay. *Ceramic Capacitors — General Technical Information. Application Note*, 2018. URL: <https://www.vishay.com/docs/22019/cergenin.pdf> (accessed 15.02.2025).
- [4] Титце У., Шенк К. *Полупроводниковая схемотехника*. Москва, ДМК Пресс, 2014, 942 с.
- [5] Murata. *Chip Monolithic Ceramic Capacitor Characteristics. Technical Note*, 2020. URL: https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MLCC_Murata.pdf (accessed 15.02.2025).

Frequency characteristics of capacitors

Chuburkov Alexander Evgenyevich

chuburkov2015@mail.ru

Kuznetsov Vadim Vadimovich

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article examines the behavior of real capacitors in high-frequency circuits, which differs from the ideal model due to parasitic parameters. The paper presents experimental results of frequency-dependent impedance characteristics for a ceramic capacitor measured in the 1–60 MHz range using an impedance analyzer. The study demonstrates that the impedance shows a resonant frequency around 46 MHz. The findings confirm that neglecting the capacitor parasitics leads to precision loss of the circuit analysis. The obtained results can be applied to optimize the design of switch-mode power supplies, RF devices, and digital systems where accurate component modeling is critical.

Keywords: capacitors, impedance, parasitic parameters, frequency dependence

УДК 537.221

Исследование воздействия термоциклизации на стойкость ИМС к электростатическому разряду

Ефременко Егор Иванович

efremenko.egor@bk.ru

Кузнецов Вадим Вадимович

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено воздействие термоциклизации на стойкость микросхем (ИМС) к электростатическому разряду (ЭСР). Проведены испытания ИМС, которые проверялись на устойчивость к ЭСР после воздействия повышенной (+125 °C) и пониженной температуры (-60 °C) отдельно, а также термоциклизации при разном количестве циклов от 0 до 200. В результате испытаний зафиксированы закономерные изменения стойкости ИМС к ЭСР после температурного воздействия. Сделаны выводы о необходимости улучшения защиты ИМС и разработке новых материалов, способных минимизировать потери эффективности под воздействием термоциклизации.

Ключевые слова: электростатический разряд, термоциклизование, интегральные микросхемы, пробой

Электростатический разряд является распространенным фактором, приводящим к выходу из строя интегральной схемы, и стал большой проблемой для надежности изделия. Статическое электричество присутствует повсюду во время изготовления, тестирования, упаковки и использования микросхемы. Когда электростатический разряд достигает определенной степени, он может легко повредить микросхему. В производстве ИЭТ ЭСЗ чаще всего возникают вследствие трения поверхностей различных материалов [1, 2]. Причиной возникновения ЭСЗ является передвижение свободных электронов или движение ионов в результате соприкосновения двух поверхностей, разностей диэлектрических постоянных, тепловых пьезоэлектрических эффектов и т. п. При исследовании стойкости ИМС к воздействию ЭСР важно учитывать внешние факторы такие как термонагрузка, которой подвергаются компоненты в течение всего времени эксплуатации.

В ходе работы были осуществлены серии испытаний с целью выявления зависимости уровня электростатического пробоя ИМС от термоциклизации. Тесты проводились на тестовых микросхемах, которые были подвержены циклическому нагреву и охлаждению в камерах КТХ серии 160-03В3.

Замеры стойкости микросхем к электростатическому разряду были проведены на установке СИСЭ-5.0, представленной на рис. 1, по модели человеческого тела. Для подключения ИМС к установке использовалась специальная вставка, которая как раз и отвечает за модель импульса. Далее к вставке подключается контактирующее устройство, в которое помещена микросхема, выводы которой выбираются по необходимости протестировать тот или иной

узел. В ходе работы использовался автоматический режим подачи импульса, который представляет собой 5 отрицательных и 5 положительных импульсов подряд.

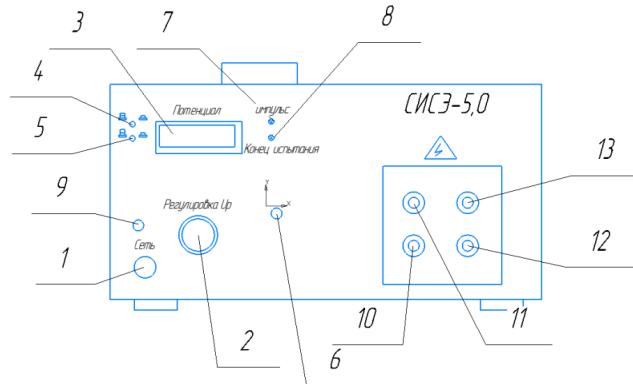


Рис. 1. Внешний вид стенда СИСЭ-5.0:

1 — кнопка включения/выключения (сеть); 2 — резистор регулировки Up; 3 — индикатор потенциала заряженного конденсатора Up, В; 4 — кнопка переключения режима ручной/автоматический; 5 — кнопка переключения потенциала полож./отриц.; 6 — кнопка пуска; 7 — светодиод импульса; 8 — светодиод конца испытаний; 9 — кнопка контроля Up; 10 — общая клемма; 11 — клемма контроль; 12 — клемма вход; 13 — клемма выход

Функциональная схема подключения стенда показана на рис. 2.

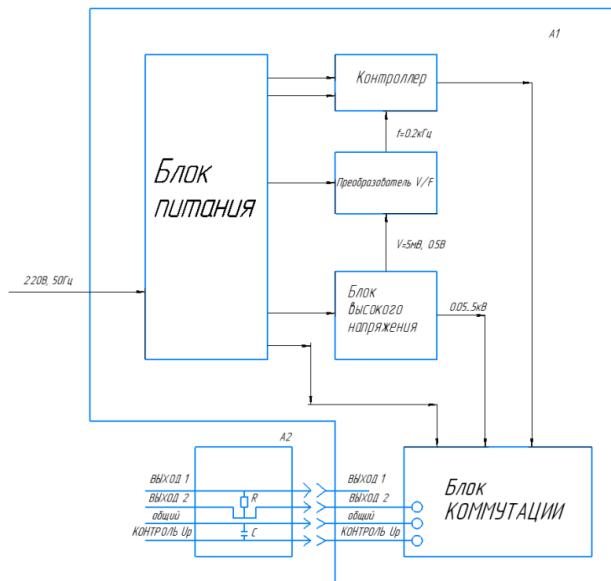


Рис. 2. Схема подключения: А1 — стенд; А2 — вставка

После проведения испытаний микросхема замерялась на автоматической системе контроля (ACK) с помощью программы LabVIEW.

Вначале фиксировались параметры пробоя при стабильной температуре, что служило контрольным показателем для последующих измерений. Испытанию подвергались 20 образцов ИМС. В результате получено среднее напряжение пробоя 1,06 кВ.

В дальнейшем часть ИМС была подвержена нагреву в 125 °C, а часть охлаждению в -60 °C с выдержкой в 30 мин. В ходе исследования было замечено, что при значительном нагреве ИМС пробивное напряжение уменьшается, а при охлаждении увеличивается. Существуют доказательства деградации материалов, возникающей в результате многократных температурных циклов. Увеличение температуры способствует восстановлению неупорядоченной структуры в кристаллах, в то время как резкое охлаждение может вызывать их разрушение. На микроскопическом уровне это проявляется в виде микротрещин и дефектов кристаллической решетки, что может увеличить риск пробоя. Нагревание может приводить к более высокой дислокации зарядов, в то время как охлаждение, напротив, может уменьшать подвижность носителей заряда, что теоретически должно снижать вероятность пробоя [3].

На следующем этапе исследования ИМС были подвергнуты термоциклированию [4]. Циклы термообработки варьировались от 0 до 200 циклов, с температурами -60 и +125 °C. Вначале было проведено 50 циклов, после которых схемы подвергались электростатическому воздействию, среднее значение напряжения пробоя составило 1,03 кВ. Аналогично было проведено большее количество циклов. После 200 циклов среднее напряжение пробоя составило 0,98 кВ. Также стоит заметить, что в среднем стойкость ИМС к воздействию ЭСР упала на 100 В (рис. 3).

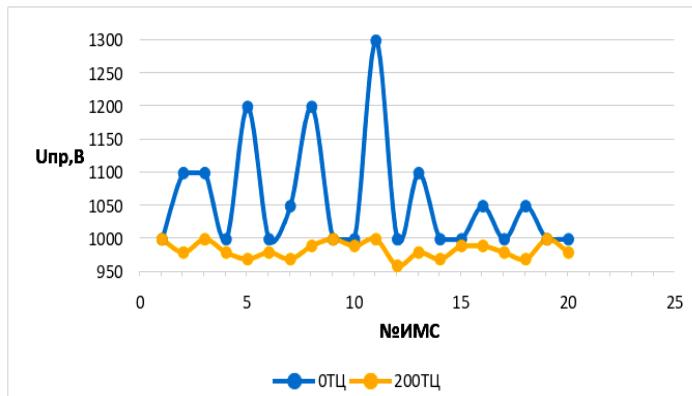


Рис. 3. График $U_{\text{пр}}$ при проведении 0 и 200 термоциклов

В ходе экспериментов установлена зависимость стойкости ИМС к воздействию ЭСР от температуры, которое приводит к снижению пробивного

напряжения ИМС в пределах 10 %. Эксперимент выявил закономерности, которые могут стать основой для будущих исследований по улучшению защиты интегральных схем [5]. На основе результатов можно предложить изменения в конструкции микросхем для повышения защиты от электростатических разрядов и разработку новых материалов для минимизации потерь эффективности при термоциклировании.

Литература

- [1] Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. *Защита электронных средств от воздействия статического и электрического разряда*. Москва, Издательский Дом «Технологии», 2018, 352 с.
- [2] Кузнецов В.В., Андреев В.В. Установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом импульса линии передачи. *Приборы и техника эксперимента*, 2024, № 2, с. 64–69.
<https://doi.org/10.31857/S0032816224020087>
- [3] Абрамешин А.Е., Галухин И.А., Кечиев Л.Н. Воздействие ЭСР на полупроводниковые компоненты: моделирование схем защиты, методов и средств испытаний. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2012, № 3 (42), с. 44–58.
- [4] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, no. 7, art. no. 102. <https://doi.org/10.3390/technologies12070102>
- [5] Максимов И.В., Кузнецов В.В., Андреев В.В. Исследование модернизированной схемы защиты от электростатического разряда КМОП ИМС серии 1564. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2017, № 4, с. 35–41.

The research of IC ESD robustness dependency on thermal impact

Efremenko Egor Ivanovich

efremenko.egor@bk.ru

Kuznetsov Vadim Vadimovich

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The paper considers the effect of thermal cycling on the resistance of microcircuits to electrostatic discharge (ESD). IC tests were carried out, which were tested for the effects of ESD after exposure to elevated (+125 °C) and low temperatures (-60 °C) separately, as well as thermal cycling with a different number of cycles from 0 to 200. As a result of the tests, regular changes in the resistance of IC to ESD after temperature exposure were recorded. Conclusions are drawn about the need to improve the protection of ICS and the development of new materials capable of minimizing efficiency losses under the influence of thermal cycling.

Keywords: electrostatic discharge, thermal impact, microelectronics, breakdown

УДК 621.3.049.774

Оценка влияния состава проявителя на качество воспроизведения топологического рельефа в фотолитографическом процессе

Перевозчикова Дарья Сергеевна rerevozckovadara10888@gmail.com

Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проанализированы особенности процесса проявления, его влияние на точность и качество воспроизводимого топологического рельефа при проведении фотолитографии в технологическом процессе изготовления интегральных микросхем. Описана специфика взаимодействия проявителей при выполнении фотолитографических процессов с разными методами экспонирования фоторезистивной пленки. Определены условия, влияющие на скорость и равномерность проявления фоторезистивной пленки. Оценено влияние добавок на стабильность и селективность проявителя при использовании позитивного фоторезиста.

Ключевые слова: фотолитография, проявление, проявитель, фоторезист

Фотолитографические операции играют ключевую роль в обеспечении высокого качества изготовления интегральных микросхем (ИС) и определяют научно-технический уровень производства в целом. Важность данных процессов особенно велика, поскольку фотолитография, в первую очередь, влияет на точность и качество изготовления компонентов ИС. Процесс литографии включает в себя несколько важных этапов, среди которых особое место занимает использование фоточувствительных материалов, таких как фоторезисты. Фоторезист наносится на подложку, после чего подвергается воздействию ультрафиолетового излучения через маску. Это позволяет сформировать на поверхности подложки требуемый микрорельеф. Чтобы удалить лишний фоторезист и оставить только необходимые участки, используется химический раствор — проявитель. Состав проявителей играет решающую роль в точности формирования микрорельефа и в эффективности всего процесса фотолитографии. При использовании позитивного фоторезиста проявители используются для удаления тех участков фоторезиста, которые подверглись воздействию света, при этом оставляя на подложке лишь те участки, которые не подвергались экспонированию. В зависимости от типа фоторезиста — позитивного или негативного — состав проявителей имеет разные химические характеристики [1].

Для позитивных фоторезистов применяют щелочные растворы, обычно на основе гидроксида калия. Эти растворы растворяют засвеченные участки фоторезиста, оставляя на поверхности только те участки, которые не подверглись ультрафиолетовому воздействию. Щелочные проявители могут также содержать органические растворители и дополнительные компоненты, которые способствуют улучшению точности и эффективности проявления [2].

Для эффективной работы проявителя, необходимо чтобы скорость растворения засвеченных участков преобладала над скоростью растворения участков, не подвергшихся действию ультрафиолета. Чем больше будет разница между ними, тем точнее будет перенос изображения на пластину [1]. Этот эффект может быть также достигнут оптимизацией индукционного периода, т. е. увеличением времени, в течение которого необлученные участки пленки не демонстрируют внешне обнаруживаемых признаков взаимодействия с проявителем.

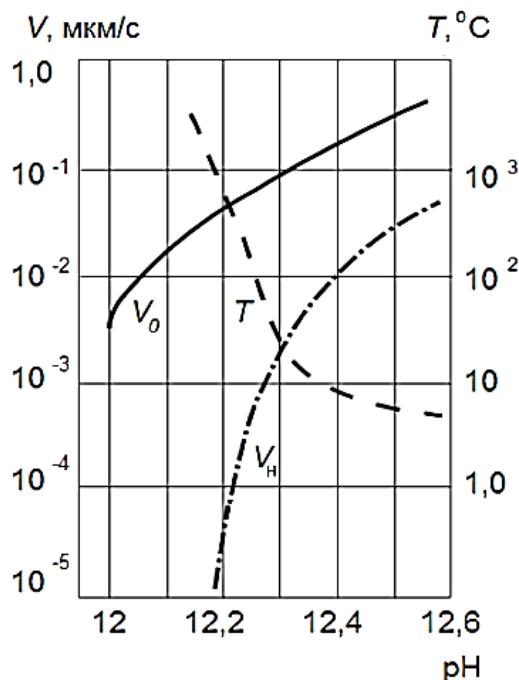


Рис. 1. Скорость растворения засвеченных участков V_0 и необлученной V_h пленки фоторезистов в проявителе

Профиль пленки фоторезиста также зависит от метода экспонирования, поскольку разные методы накладывают свои требования к составу проявителя.

Оптимальным вариантом профиля является вертикальный наклон, он гарантирует точный перенос размеров, четкий топологический рельеф и минимизирует риск возникновения проблем с травлением [1].



Рис. 2. Профиль фоторезиста:
а — отрицательный наклон; б — вертикальный наклон; в — положительный наклон

Контактный метод экспонирования определяется меньшей мощностью засветки, однако благодаря тому, что процесс проводится по всей пластине одновременно, позволяет увеличить время экспонирования и вместе с ним дозу облучения. Контактное экспонирование позволяет получить резкое и четкое изображение, поскольку фотошаблон плотно прижат к пластине. Перенос изображения производится по всей пластине одновременно и с минимальными искажениями [3]. Особенности процесса позволяют использовать слабые или средние проявители, которые позволяют избежать подтравливания.

Проекционная фотолитография характеризуется большей мощностью засветки, но из-за пошагового метода экспонирования не позволяет сильно увеличивать время засветки, так как это сильно увеличит время обработки пластины. Поэтому доза облучения у этого метода меньше, чем при контактной фотолитографии [4]. Четкость изображения варьируется в зависимости от качества настройки оптических систем. Особенности процесса требуют применения более агрессивных проявителей, чем при контактной фотолитографии.

Различия между сильным и слабым проявителем заключается в их химическом составе, который влияет на скорость растворения и селективность, а также на профиль фоторезиста.

Слабые проявители содержат низкую концентрацию активного вещества (в случае для позитивных фоторезистов это щелочные растворы), которые позволяют понизить скорость растворения, обеспечивая медленный и контролируемый процесс. В слабых проявителях содержится около 0,1–0,4 % активного вещества. Контролируемость процесса одно из основных качеств слабого проявителя, поскольку он дает больший спектр решений в отличие от более агрессивного проявителя. При использовании слабых проявителей уменьшается риск переэкспонирования, поскольку проявление позволяет откорректировать процесс, также при использовании слабых проявителей процесс менее чувствителен к адгезии фоторезиста к подложке.

Сильные проявители содержат высокие концентрации активного вещества, что ускоряет проявление и делает процесс менее контролируемым. В состав сильных проявителей обычно входит от 0,8–3,0% активного вещества. Такие проявители имеют высокую скорость проявления, позволяют компенсировать размытость изображений при экспонировании и улучшить воспроизведение мелких деталей, однако имеют меньшую контролируемость процесса в отличии от слабых проявителей [5].

Кроме активного вещества в состав проявителей добавляют различные добавки для улучшения необходимых характеристик. Например, смачиватели, которые улучшают равномерность проявления, предотвращают образование пузырей, их применяют при работе с мелкими структурами, где неравномерность распределения проявителя приводит к значительным дефектам. Для улучшения селективности может применяться изопропиловый спирт, однако при большой концентрации он может вызывать нежелательные химические реакции и способствовать нестабильности рисунка. Для снижения чувстви-

тельности процесса ко времени проявления используют буферные вещества, они поддерживают стабильный pH, предотвращая колебания активности проявителя.

Заключение. Состав проявителя значительным образом влияет на качество воспроизведенного рельефа. Кроме активных веществ, непосредственно участвующих в процессе в состав проявителя могут входить добавки, позволяющие управлять характеристиками процесса проявления. Состав проявителя во многом подбирается в зависимости от особенностей процессов нанесения и экспонирования, а также исходя из требований, предъявляемых к кристаллу микросхемы в целом.

Литература

- [1] Кручинин Д.Ю., Фарафонова Е.П. *Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2014.
- [2] Андреев В.В. Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Метод многоуровневой токовой нагрузки для исследования генерации и релаксации положительного заряда в МДП-структуратах. *Микроэлектроника*, 2003, т. 32, № 2, 152 с.
- [3] Андреев Д.В., Курносенко А.Е., Макарчук В.В., Соловьев В.А. *Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения. Т. 1*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 388 с.
- [4] Андреев Д.В., Масловский В.М., Андреев В.В., Столяров А.А. Модифицированный метод линейно нарастающего тока для контроля надежности тонких диэлектриков и деградации заряда. *Phys. Status Solidi A*, 2022, т. 219, вып. 9, с. 2100400(1–5). <https://doi.org/10.1002/pssa>
- [5] Трапашко Г. Контроль микроразмеров в производстве ИС задачи и особенности. *Электроника, наука, технология, бизнес*, 2011, № 3, с. 96–103.

Evaluation of the influence of the developer composition on the quality of reproduction of the topological relief in the photolithographic process

Perevozchikova Darya Sergeevna perevozchikovadara10888@gmail.com

Andreev Vladimir Victorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The features of the development process, its influence on the accuracy and quality of the reproduced topological relief during photolithography in the technological process of manufacturing integrated circuits are analyzed. The specifics of the interaction of developers during photolithographic processes with different methods of exposing the photoresist film are described. The conditions affecting the speed and uniformity of the development of the photoresist film are determined. The influence of additives on the stability and selectivity of the developer when using a positive photoresist is estimated.

Keywords: photolithography, development, developer, photoresist

УДК 621.385.69

Проектирование полосового сумматора сверхвысокочастотного сигнала в диапазоне частот 600–1200 МГц

Платошин Владимир Олегович platoшинvo@student.bmstu.ru

Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены сумматоры сверхвысокочастотного сигнала, осуществлено проектирование и моделирование в среде Multisim данного устройства. Рассмотрены преимущества использования пассивных компонентов в данных устройствах. Приведены амплитудно-частотные характеристики трех полосовых фильтров пятого порядка в диапазонах частот 600–800, 800–1000, 1000–1200 МГц, входящих в состав сумматора, а также амплитудно-частотная характеристика самого сумматора сверхвысокочастотного сигнала для работы в диапазоне частот 600–1200 МГц.

Ключевые слова: полосовой фильтр, СВЧ-диапазон, моделирование, пассивные элементы, порядок фильтра, сумматор

В настоящее время большое внимание уделяется улучшению качества обработки сигналов, в таких областях как связь и телекоммуникация, что приводит к необходимости анализа и совершенствования устройств, предназначенных для этих целей. К таким устройствам также относятся сверхвысокочастотные полосовые фильтры и сумматоры сверхвысокочастотных сигналов [1].

Полосовые фильтры предназначены для пропускания определенной полосы частот, отсекая остальные составляющие. Они являются обязательными компонентами для систем передачи данных.

Работа сверхвысокочастотных фильтров основана на преобразовании сигнала на входе и последующей фильтрации этого сигнала в соответствии с заданными требованиями. Такие устройства выполняют важные функции в высокочастотных системах за счет защиты от помех других систем и обеспечения избирательности по частоте.

В данной работе проведена разработка сумматора сверхвысокочастотного сигнала для работы в диапазоне частот 600–1200 МГц. Требования к устройству: невысокая стоимость и высокая надежность. Спроектированный сумматор представляет собой три полосовых фильтра пятого порядка, собранных на пассивных компонентах, к каждому из которых на входе подключен свой источник сигнала. Каждый из фильтров предназначен для работы в диапазонах 600–800, 800–1000, 1000–1200 МГц для получения необходимой полосы пропускания на каждой ветке. На выходе сигналы с каждой ветки фильтра суммируются и подаются на общий выход для дальнейшей передачи в излучающую антенну.

Конструкция фильтров на пассивных компонентах выбрана с учетом, что такие фильтры обладают большей надежностью и меньшей стоимостью

по сравнению с их аналогами, выполненными на активных компонентах. Они просты по конструкции и позволяют обеспечить точную подстройку характеристик. Пятый порядок фильтров выбран, так как такие фильтры имеют более высокий коэффициент затухания и передачи, что повышает их избирательность по частоте и уменьшает вносимые потери [2].

К основным характеристикам сверхвысокочастотных фильтров относятся амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) [3, 4]. Для построения анализа данных характеристик использован инструмент AC Analysis в среде NI Multisim [3, 4]. Схема электрическая принципиальная разработанного устройства представлена на рис. 1.

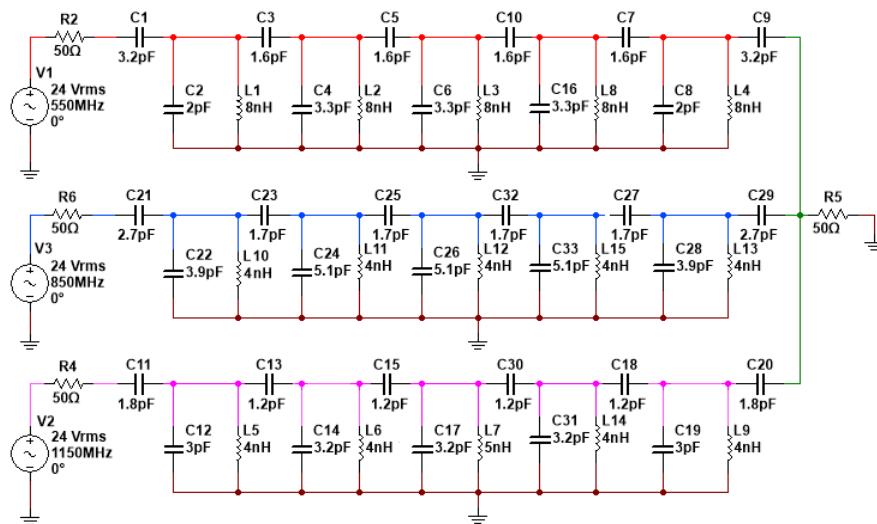


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная пассивного сумматора сверхвысокочастотного сигнала в диапазоне частот 600–1200 МГц в среде NI Multisim

Наибольший интерес для моделирования представляет АЧХ [5]. При изменении номиналов компонентов изменяется и АЧХ сумматора. Номиналы пассивных элементов подобраны с целью получения наиболее оптимальной полосы пропускания и угла спада амплитудно-частотных характеристик каждой фильтрующей ветки сумматора. Экспериментально установлено, что наибольшее влияние на АЧХ проектируемого сумматора оказывают следующие компоненты:

- изменение номиналов компонентов L1, L2, L3, L4, L8, C4, C6, C16 приводит к смещению полосы пропускания фильтра влево или вправо;
- увеличение или уменьшение номиналов компонентов C1, C9, C2, C8 влияют на согласование фильтра;
- номиналы конденсаторов C3, C5, C7, C10 влияют на ширину полосы пропускания.

Изменение номиналов остальных компонентов не оказывают значительного влияния на характеристики фильтра.

Для согласования на вход и выход фильтров подключены нагрузки 50 Ом. Для симуляции сигналов в диапазонах 600–800, 800–1000, 1000–1200 МГц использованы источники AC_POWER. При последующей сборке устройства настройка на диапазон каждого фильтра осуществляется перемещением «холодного» конца катушек вправо–влево относительно заданного маркировкой на плате. АЧХ каждого фильтра сумматора представлены на рис. 2.

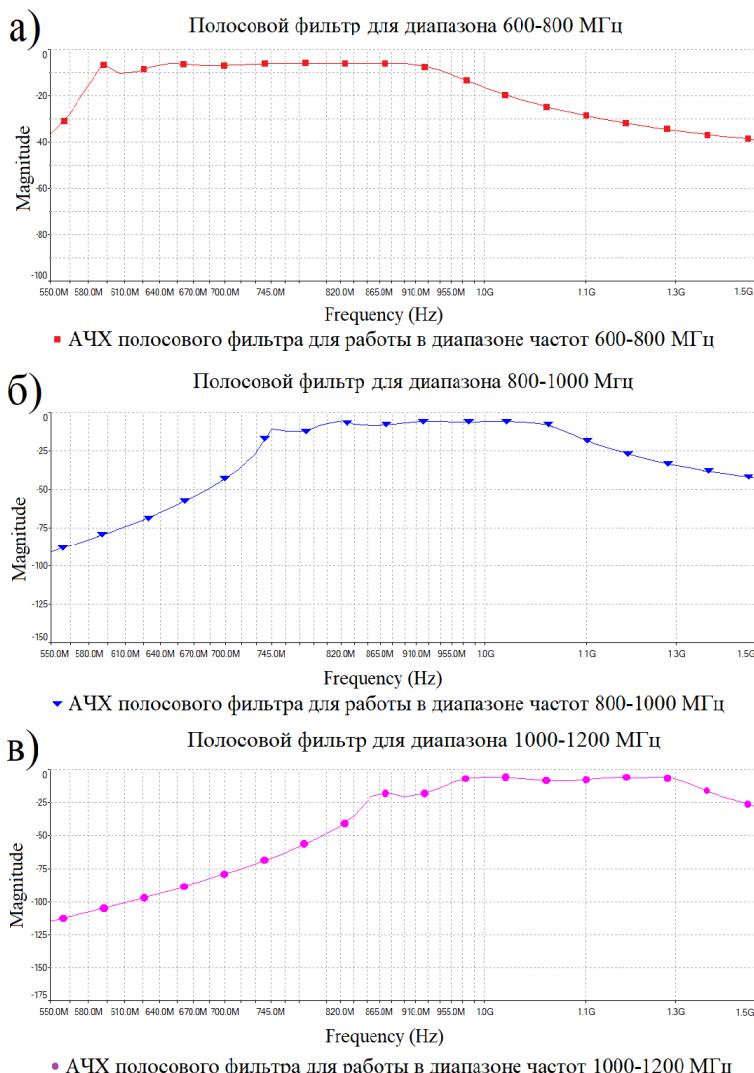
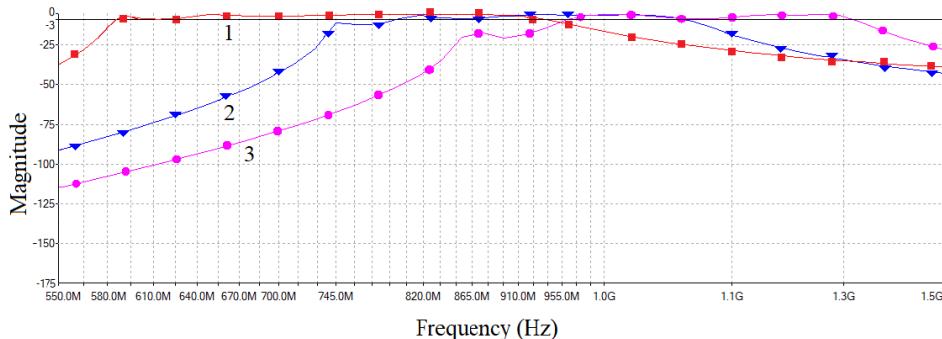


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики полосовых фильтров пятого порядка для диапазонов частот 600–800 МГц (а), 800–1000 МГц (б), 1000–1200 МГц (в)

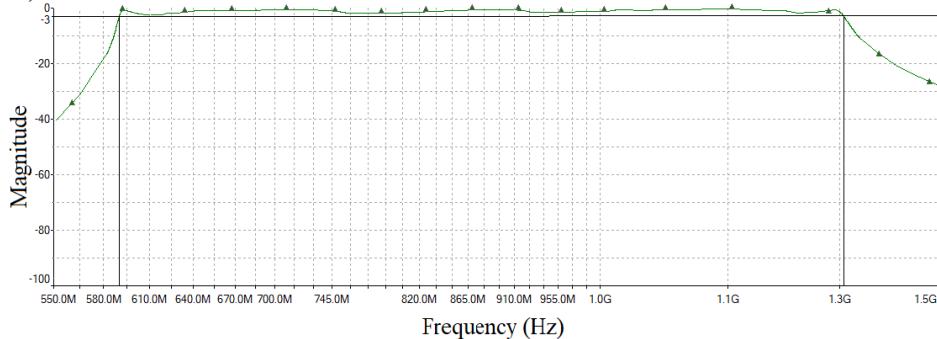
При суммировании сигналов каждой ветки полосы пропускания фильтров накладываются друг на друга, что приводит к образованию широкой полосы пропускания в необходимом диапазоне. АЧХ сумматора представлены на рис. 3. Ширина полосы пропускания определяется по уровню ослабления — 3 дБ.

а) АЧХ полосовых фильтров 600-800 МГц, 800-1000 МГц, 1000-1200 МГц



- 1 ■ АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 600-800 МГц
- 2 ▼ АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 800-1000 МГц
- 3 ● АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 1000-1200 МГц

б) АЧХ полосового фильтра 600-1200 МГц



- ▲ АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 600-1200 МГц

Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики СВЧ-сумматора в диапазоне частот 600–1200 МГц до суммирования сигналов на выходе (а) и после суммирования на выходе (б)

Заключение. Приведены основные преимущества использования сверхвысокочастотных полосовых фильтров пятого порядка. Осуществлено моделирование трех полосовых фильтров в диапазоне 600–800, 800–1000, 1000–1200 МГц и представлены их АЧХ. Экспериментально установлены наиболее оптимальные номиналы компонентов элементов. Осуществлено моделирование полосового сумматора сверхвысокочастотного сигнала в диапазоне частот 600–1200 МГц и представлена его АЧХ.

Литература

- [1] Драч В.Е., Кондрашов П.В., Саввин М.А. Анализ конструкции фильтра для подавления помех с помощью компьютерного моделирования. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2021, т. 26, № 1, с. 71–79.
- [2] Андреев Д.В., Курносенко А.Е., Макарчук В.В., Соловьев В.А. *Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 467 с.
- [3] Дьяконов В.П. *MATLAB 6.5 SP 1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров*. Москва, Изд-во СОЛОН-Пресс, 2009.
- [4] Романовский М.Н. *Полосовые фильтры на ПАВ. Методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Интегральные устройства радиоэлектроники»*. Томск, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022.
- [5] Андреев В.В., Жалнин В.П., Столяров А.А. *Физические основы микро- и наноэлектроники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 292 с.

Designing a band-pass adder for an ultrahigh frequency signal in the frequency range of 600–1200 MHz

Platoshin Vladimir Olegovich

platoshinvo@student.bmstu.ru

Andreev Vladimir Viktorovich

vladimir_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

In this paper, the adders of the ultrahigh frequency signal are considered, the design and modeling of this device in the Multisim environment are carried out. The advantages of using passive components in these devices are considered. The amplitude-frequency characteristics of three fifth-order bandpass filters in the frequency ranges 600–800, 800–1000, 1000–1200 MHz, which are part of the adder, as well as the amplitude-frequency characteristics of the UHF adder itself for operation in the frequency range 600–1200 MHz are given.

Keywords: bandpass filter, microwave range, modeling, passive elements, filter order, adder

УДК 621.317

Влияние концентрации примеси в области кармана на электрофизические параметры измерительного усилителя

Серов Илья Евгеньевич serovie@student.bmstu.ru

Адарчин Сергей Александрович adarchin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Описано влияние дозы при ионной имплантации примесей в полупроводниковую пластину при формировании микросхемы измерительного усилителя. Представлены зависимости между быстродействием готовой микросхемы и концентрацией примесных атомов в области кармана полевого р-канального транзистора. Улучшение этих параметров путем совершенствования технологии производства полупроводниковой пластины на этапах формирования структуры элементов полевого транзистора позволило двукратно повысить быстродействие всей микросхемы усилителя. Данные качественные изменения позволяют в перспективе расширить область применения измерительных усилителей и повысить их надежность.

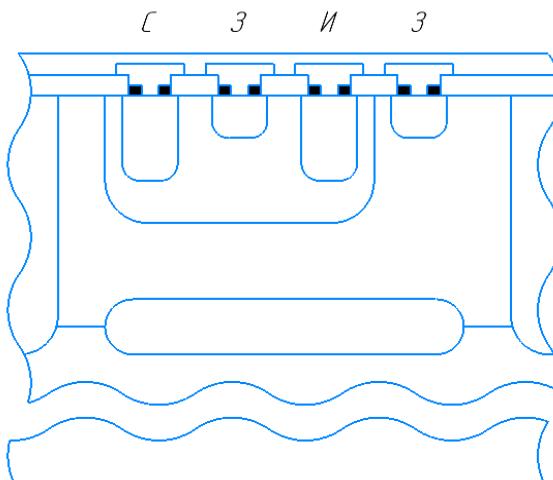
Ключевые слова: ионная имплантация, технология, динамические параметры, полевой транзистор, улучшение, исследование, примеси

Измерительные усилители широко применяются в системах, где требуется высокоточное и оперативное усиление слабых сигналов. Они находят применение в различных сферах, включая медицинскую технику, промышленную автоматику и научные исследования.

В медицинских приборах, таких как ЭКГ и ЭЭГ, важна способность усилителя мгновенно реагировать на изменения сигналов, что напрямую влияет на точность диагностики. В промышленных и научных измерительных системах, где осуществляется контроль параметров среды (давления, температуры и других величин), высокая скорость отклика позволяет достоверно фиксировать изменения даже в условиях внешних помех. Кроме того, измерительные усилители активно применяются в лабораторном оборудовании, предназначенном для регистрации кратковременных изменений сигналов, что минимизирует возможные искажения измерений.

Структурные элементы на полупроводниковой пластине микросхемы измерительного усилителя формируются преимущественно методом ионной имплантации на ионнолучевых установках. Рабочие пластины вместе с пластинаами-спутниками загружаются в приемную камеру установки для ионной имплантации, после чего производят процесс легирования согласно заданному режиму. После этого пластины проходят операцию активации примеси, а затем серию контрольных мероприятий для определения степени легирования области и соответствия полученных результатов заданным требованиям, от чего зависит дальнейший технологический процесс [1].

После разделения кристалла измерительного усилителя на области, первой легируется область кармана p -канального полевого транзистора (см. рисунок). Данная область легируется трехфтористым бором (флюбором), который является акцепторной примесью. Процесс имплантации примеси определяется дозой имплантируемой примеси. С повышением дозы легирования примеси наблюдается закономерное изменение электрофизических параметров пластины. Увеличивается концентрация акцепторов в области кармана, что можно проследить, произведя контроль параметров после операции активации примеси. Активация (отжиг), для получения более наглядных результатов влияния дозы легирования, производится при одинаковых условиях: 4 часа в азотной среде.



Полевой транзистор измерительного усилителя

Концентрация примеси — это количество атомов примеси на единицу объема полупроводникового материала. Концентрация определяется плотностью ионного тока и временем имплантации и влияет на электрические свойства полупроводника, а также на глубину проникновения примеси.

По пластине-спутнику, параметры которой идентичны рабочей пластине усилителя, контролируется два электрофизических параметра: поверхностное сопротивление пластины (ρ_s) и глубина залегания примеси (X_i) [2].

Поверхностное сопротивление — это сопротивление квадратного участка поверхности материала толщиной d . Оно не зависит от величины сторон этого квадрата и характеризует электропроводящие свойства материала.

Глубина залегания диффузионного слоя — это расстояние от поверхности полупроводниковой пластины до границы между областями с различным типом проводимости, образованной в результате диффузии примесей. Эта глубина также зависит от параметров процесса имплантации примесей [3].

В результате серии имплантаций разными дозами были определены оптимальные параметры легирования, при которых достигается наибольшее быстродействие микросхемы. Поверхностное сопротивление области выросло до 4000 Ом/□м (против изначальных 2000 Ом/□м), глубина залегания диффузионного слоя увеличилась до 4 мкм (против 3 мкм). При таких параметрах наблюдается наименьшее время отклика микросхемы (t_r), которое сократилось до 100 нс (против первоначальных 200 нс). Это было вызвано ростом тока стока ($I_{стока}$) полевого транзистора [4].

Ток стока полевого транзистора — это электрический ток, протекающий через канал полевого транзистора от истока к стоку. Управление током осуществляется изменением проводимости канала, которая зависит от напряжения между затвором и истоком. Этот ток определяется проводимостью канала, который образуется приложении напряжения на затвор. Изменение концентрации примеси (в данном случае бора) в области кармана влияет на проводимость канала и, следовательно, на величину тока стока.

Однако, несмотря на положительный эффект от таких мер, ток стока нельзя неконтролируемо повышать ввиду того, что его рост сказывается также на одновременном увеличении токов потребления, которые должны оставаться в установленных пределах. В случае данного измерительного усилителя, токи потребления должны находиться в интервале от 2 до 5 мА, при увеличении дозы легирования ток потребления достигает 4 мА. Дальнейшее повышение дозы легирования приводит к выходу за данные пределы, поэтому продолжать увеличение нецелесообразно [5].

Экспериментально было установлено, что результатом таких мер станет двукратное сокращение времени отклика микросхемы. В совокупности эти изменения в технологии положительно скажутся на управляемости полевого транзистора, что, в свою очередь, существенно увеличит быстродействие усилителя в целом.

Литература

- [1] Зацепин Д.А., Вайнштейн И.А., Чолах С.О. *Ионная модификация функциональных материалов*. Екатеринбург, УрФУ, 2014, с. 21–23.
- [2] Курносов А.И., Юдин В.В. *Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем*. Москва, Высшая школа, 1986, с. 202–207.
- [3] Берикашвили В.Ш., Воробьев С.А. *Твердотельная электроника и микроэлектроника*. Москва, РГУ МИРЭА, 2023, с. 214–215.
- [4] Волович Г.И. *Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств*. Саратов, Профобразование, 2017, с. 62–65.
- [5] Жмудь В.А. *Электронные системы управления лазерным излучением: специальные главы*. Новосибирск, Новосиб. гос. ун-т, 2010, с. 12–17.

Influence of impurity concentration in the pocket region on the electrophysical parameters of the measuring amplifier

Serov Ilya Evgenievich serovie@student.bmstu.ru

Adarchin Sergey Alexandrovich adarchin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The effect of dose at ion implantation of impurities into a semiconductor wafer during the formation of a measurement amplifier chip is described. Dependences between the speed of the finished chip and the concentration of impurity atoms in the pocket region of the field p-channel transistor are presented, which are expressed by means of changes in specific electrophysical quantities caused by the growth of the doping dose. Improvement of these parameters by improving the technology of semiconductor wafer production at the stages of formation of the structure of the field-effect transistor elements, allowed doubling the speed of the whole amplifier chip. These qualitative changes will allow in the future to expand the application area of measuring amplifiers and increase their reliability.

Keywords: ion implantation, technology, dynamic parameters, field-effect transistor, improvement, research, impurities

УДК 621.317

Особенности проектирования источника опорного тока

Гришин Григорий Константинович

grishingk@bmstu.ru

Кузин Матвей Максимович

matvey.kuzin.17@mail.ru

Андреев Дмитрий Владимирович

dmitrii_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены особенности проектирования источника опорного тока, включая применение многоэмиттерных транзисторов и резисторов с лазерной подгонкой. Приведена схема разрабатываемого источника тока. Приведено моделирование схемы источника опорного тока, получены оптимальные значения подгоняемых резисторов для получения целевого значения выходного тока. Приведена топология многоэмиттерного транзистора. Описан метод подгонки с помощью изменения площади эмиттера. Сделан вывод о количестве используемых эмиттеров в разрабатываемой схеме.

Ключевые слова: источник опорного тока, лазерная подгонка, температурная компенсация, источник тока на биполярных транзисторах, проектирование интегральных схем

Введение. В современной электронике есть потребность в точных источниках опорного тока. Они напрямую влияют на эффективность и стабильность разрабатываемого устройства.

В работе рассматриваются особенности проектирования источника опорного тока, включая применение многоэмиттерных транзисторов и резисторов с лазерной подгонкой.

Целью данной работы является описание особенностей проектирования схемы источника опорного тока.

На рис. 1 приведена схема разрабатываемого источника опорного тока.

Приведенная на рис. 1 схема источника опорного тока поддерживает стабильный выходной ток в диапазоне температур от -60 до 125 $^{\circ}\text{C}$ [1].

В разрабатываемой схеме может быть реализовано два способа подгонки: за счет изменения сопротивления резисторов и за счет изменения площади эмиттера. Эти особенности введены ввиду возможной неидеальности технологического процесса и вероятного разброса параметров транзисторов.

Метод лазерной подгонки заключается в нагревании и последующем испарении резистивного материала с помощью воздействия мощного импульса лазерного излучения. Сопротивление резистора после подгонки увеличивается, соответственно при проектировании следует это учитывать и разрабатывать резистор с заведомо меньшим сопротивлением [2].

Резисторы 5 и 6 являются подгоняемыми. До процедуры лазерной подгонки резисторы имеют следующие номиналы: $R5 = 3$ кОм, $R6 = 10$ кОм.

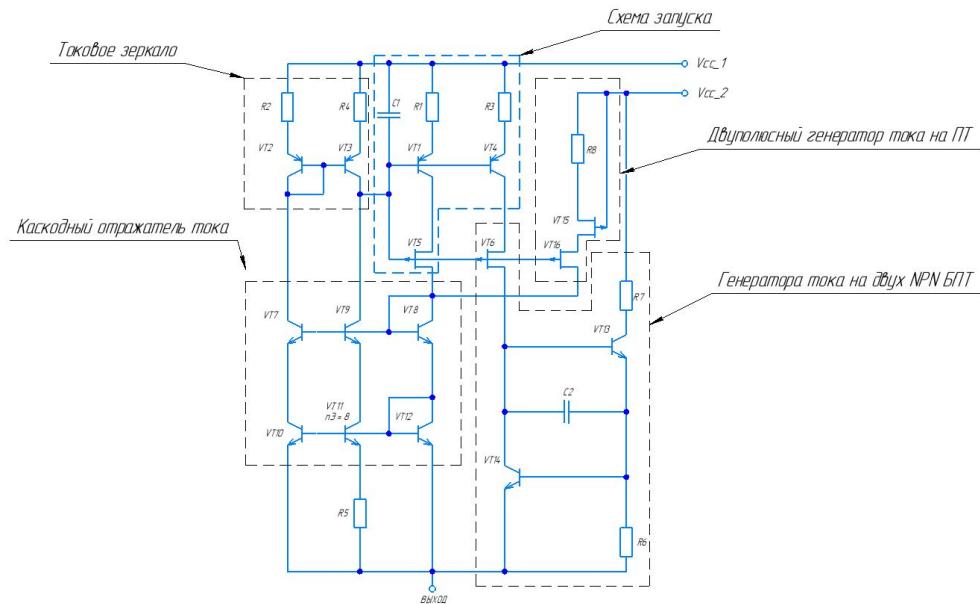


Рис. 1. Схема источника опорного тока

Исследования характеристик резисторов при лазерной подгонке с разными формами реза приведены в работе [3]. В работе определены режимы подгонки тонкопленочных резисторов, не приводящие к последующей деградации.

На рис. 2 приведена схема моделирования источника опорного тока.

Моделирование направлено на получение работоспособной модели разрабатываемого источника опорного тока, а также на подбор возможных со- противления резисторов $R5$ и $R6$ в ходе лазерной подгонки.

Номинальное значение выходного тока левого плеча схемы — 85 мА. На рис. 3 приведена зависимость выходного тока левого плеча схемы от сопротивления $R5$.

Маркером отмечена точка, где ток принимает наиболее близкое к номинальному значение. Таким образом, сопротивление резистора $R5$ после лазерной подгонки должно составлять около 3,84 кОм.

Номинальное значение выходного тока правого плеча схемы — 115 мА. На рис. 4 приведена зависимость выходного тока правого плеча схемы от сопротивления $R6$.

Маркером отмечена точка, где ток принимает наиболее близкое к номинальному значение. Таким образом, сопротивление резистора $R6$ после лазерной подгонки должно составлять 10,2 кОм.

Используя полученные значения резисторов, проведено полное моделирование схемы. Полученное значение выходного тока — 200,023 мА, что попадает в допустимый разброс значений выходного тока.

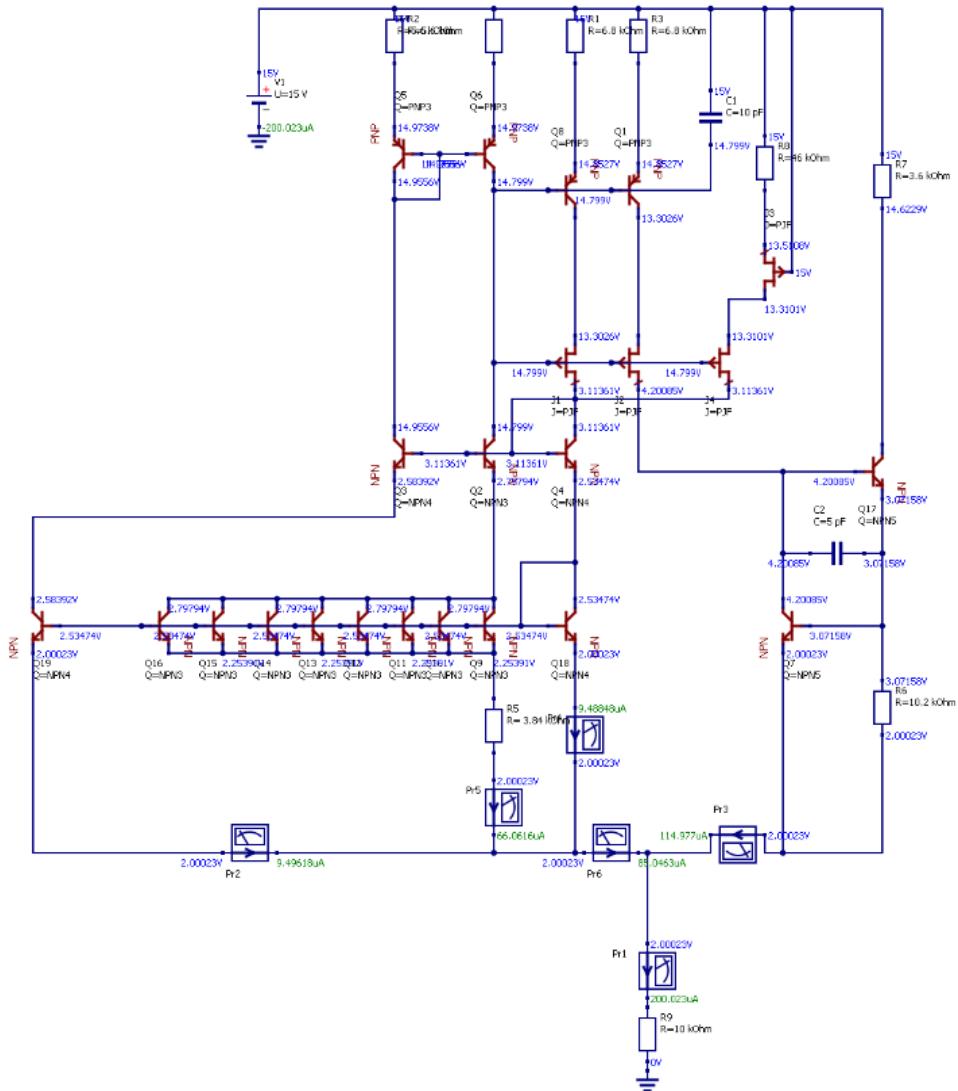


Рис. 2. Схема моделирования источника опорного тока

В случае если технологического разброса резисторов недостаточно для получения номинального значения выходного тока, используется метод подгонки схемы с помощью изменения площади эмиттера. При уменьшении площади эмиттера увеличивается плотность тока, проходящего через него, что влечет за собой уменьшения тока в ветви [4].

В разрабатываемой схеме реализован многоэмиттерный транзистор, необходимый для подгонки такого вида. Топология данного транзистора приведена на рис. 5.

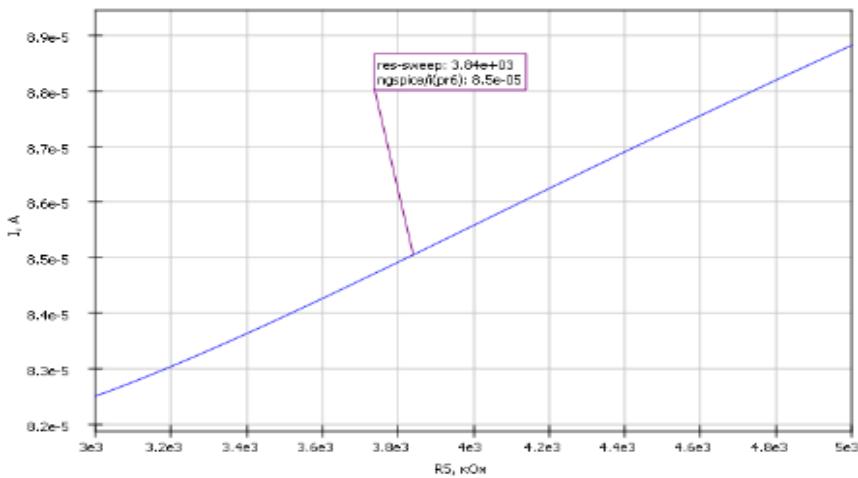


Рис. 3. Зависимость выходного тока левого плеча схемы от сопротивления $R5$

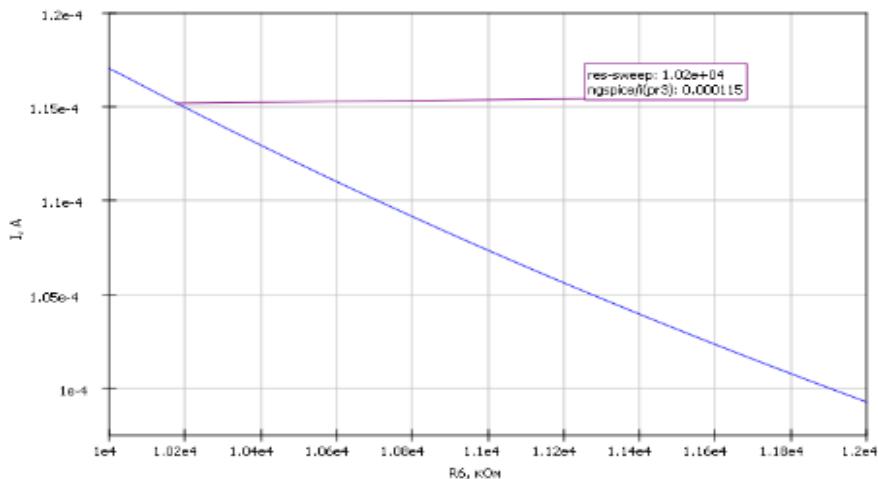


Рис. 4. Зависимость выходного тока правого плеча схемы от сопротивления $R6$

В разрабатываемой схеме используются два таких транзистора, включенных параллельно друг другу. Таким образом, суммарное количество эмиттеров — 8.

Данный способ подгонки проводится перед лазерной подгонкой резисторов, так как вносит существенные корректировки в выходной ток. Преимуществом использования данного способа является возможность сместить начальную точку номинала выходного тока перед подгонкой, что позволяет упростить лазерную подгонку резисторов.

При отделении с помощью лазера одного эмиттера от общей структуры выходной ток разрабатываемого источника снижается на 6 мкА. В таблице приведены значение выходного тока при разном количестве отделенных эмиттеров.

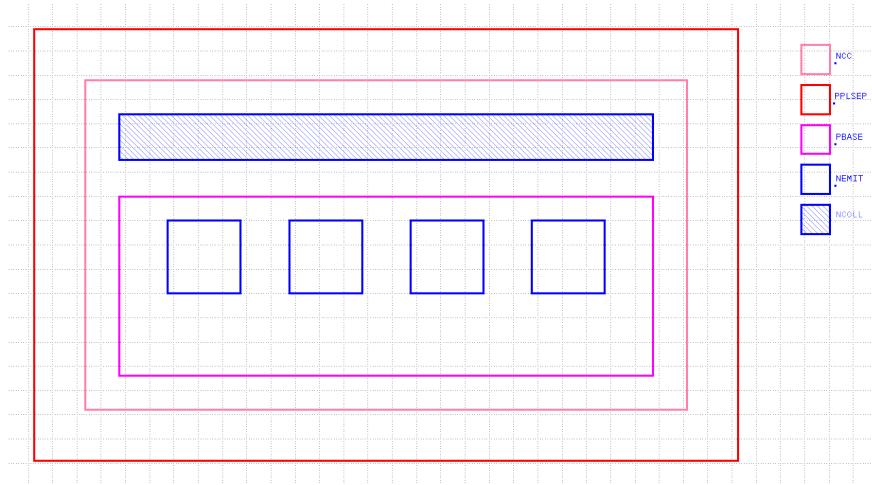


Рис. 5. Топология многоэмиттерного биполярного $n-p-n$ транзистора

Значение выходного тока при разной площади эмиттера

Количество отделенных эмиттеров	Выходной ток, мкА
1	194,022
2	188,012
3	182,005
4	176,003

На рис. 6 приведена микрофотография лазерного реза по эмиттеру.

Лазерная подгонка в данном методе проводилась лишь в экспериментальных целях. При производстве лазерная подгонка по металлу применяется в случае подгонки с помощью резки перемычек. Такой способ является более грубым и для его реализации требуются большие площади на кристалле.

В разрабатываемой схеме реализация данного метода осуществляется путем изменения фотошаблона металла, что, в случае ошибки в проектировании, позволяет существенно удешевить процесс исправления схемы.

При проектировании схемы потребовалось использовать все 8 эмиттеров, чтобы технологический разброс резисторов обеспечивал полное покрытие всех требований к подгонке токов в ветвях схемы.

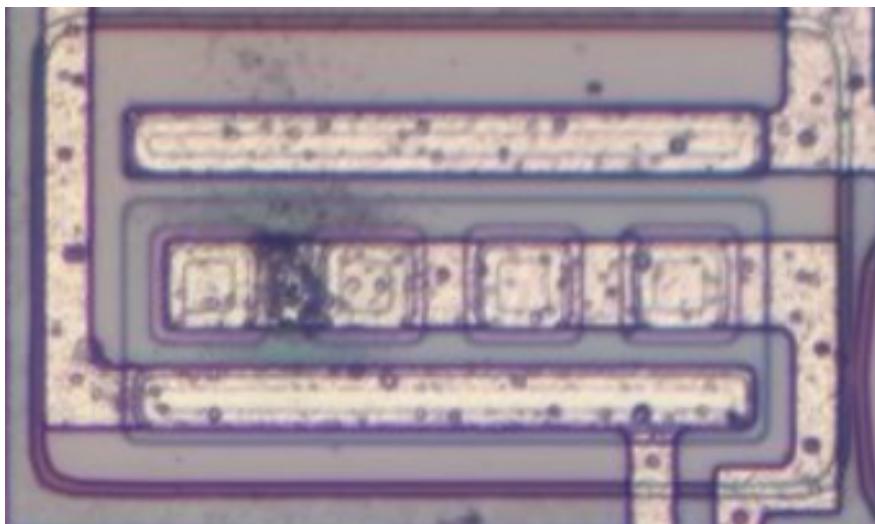


Рис. 6. Микрофотография лазерного реза по эмиттеру

Заключение. В ходе работы проведено моделирование разрабатываемой схемы источника опорного тока, подобраны номиналы подгоняемых резисторов, описана возможность альтернативного способа подгонки схемы с помощью изменения площади эмиттера.

Литература

- [1] Гришин Г.К., Борисов Е.О., Андреев Д.В. Исследование температурной зависимости источника опорного тока REF200. *Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Всерос. науч.-техн. конф.: сб. матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, с. 234–240.
- [2] Бурухин М.К., Рыжов С.В., Андреев Д.В., Романов М.В. Метод электрической подгонки ИМС на основе пережигаемых поликремниевых перемычек. *Вестник РГРТУ*, 2023, т. 86, № 2, с. 186–195. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2023-86-186-195>
- [3] Андреев Д.В., Лутовин Е.А. Исследование деградационных процессов в ИС операционных усилителей при подгонке тонкопленочных резисторов. *Электронный журнал: наука, техника и образование*, 2019, № 1 (23), с. 119–125. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38213926_78805673.pdf (дата обращения 15.02.2025).
- [4] Harrison L.T. *Current sources and voltage references: a design reference for electronics engineers*. Elsevier, 2005.

Design features of the reference current source

Grishin Grigorii Konstantinovich

grishingk@bmstu.ru

Kuzin Matvey Maksimovich

matvey.kuzin.17@mail.ru

Andreev Dmitry Vladimirovich

dmitrii_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The paper considers the design features of a reference current source, including the use of multi-emitter transistors and laser-tuned resistors. The diagram of the current source being developed is given. A simulation of the reference current source circuit is given, and optimal values of the adjustable resistors are obtained to obtain the target value of the output current. The topology of a multi-emitter transistor is given. A method of fitting by changing the emitter area is described. A conclusion is made about the number of emitters used in the developed circuit.

Keywords: reference current source, laser adjustment, temperature compensation, current source on bipolar transistors, integrated circuit design

УДК 621.3.049.77

Зависимость КМОП транзистора от энергии ионного легирования области стока и истока

Радзышевская Виктория Витальевна
Андреев Владимир Викторович

vikuharad13@gmail.com
vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен процесс ионной имплантации кремниевых полупроводниковых пластин. Проанализировано влияние параметров ионного легирования на характеристики микросхем. Исследованы электрические параметры интегральных микросхем, зависящие от правильности проведения и контроля процесса ионного легирования. Предложен метод корректировки процесса ионного легирования для устранения дефектов, возникающих во время имплантации примеси и сохранения необходимых параметров микросхемы в допустимом диапазоне значений.

Ключевые слова: ионная имплантация, дефекты, электрофизические параметры, энергия ионного легирования, пороговое напряжение

Ионная имплантация — это процесс, при котором атомы примеси внедряются в кристаллическую решетку полупроводника с целью изменения его электрических свойств. Ключевыми параметрами ионного легирования являются энергия и доза ионов. Энергия — это величина, с которой примесь бомбардирует поверхность. Доза ионов — количество ионов, которое проходит через единицу площади поверхности материала. Большое значение энергии ионов способствует более глубокому проникновению загоняемой примеси в материал, что может приводить к более выраженным изменениям свойств изделия. В ходе ионного легирования могут возникать различные виды дефектов, которые существенно сказываются на качестве и характеристиках микросхемы [1].

Основными примесями для кремниевых полупроводниковых пластин в процессе ионного легирования являются бор и фосфор. Бор используется для создания полупроводников *p*-типа (*p*-канальных), а фосфор для создания *n*-типа (*n*-канальных) полупроводников. Во процессе внедрения ионов может произойти повреждение решетки, что спровоцирует образование дефектов, смещений и др. Дефекты оказывают значительное влияние на параметры и характеристики микросхем, что в итоге приводит к ухудшению их свойств. Эти преобразования могут изменить электрические свойства изделия, среди них и пороговое напряжение [2].

Пороговое напряжение — это напряжение, при котором канал между истоком и стоком начинает проводить ток. Этот параметр критически важен, так как именно от него зависит включение и выключение устройства. Пороговое напряжение транзистора определяется количеством носителей заряда в канале. Если процесс ионного легирования проводился эффективно, то это

может привести к увеличению концентрации носителей, что, в свою очередь, понижает пороговое напряжение. Энергия, используемая при ионном легировании, сильно влияет на кристаллическую решетку полупроводника [2].

Если значение порогового напряжения будет ниже допустимого, транзистор может включаться при меньшем напряжении, что может приводить к «паразитным» состояниям, и в последствии вызвать неустойчивую работу и «шум» в сигнале. Если значение порогового напряжения выше нормы, транзистор может не включаться при предполагаемых уровнях сигнала, что приведет к потере функциональности и разрушению логики схемы. Отклонение порогового напряжения от допустимого диапазона может повлиять на скорость переключения транзистора: высокое может замедлить процесс включения и выключения. В исследуемой микросхеме значение порогового напряжения должно быть 1–1,5 В [2, 3].

Рассмотрим почему некорректно подобранные параметры процесса ионной имплантации могут повлиять на электрофизические параметры кристаллов микросхем.

Таблица 1

Параметры процесса ионной имплантации для *n*-канального транзистора

Доза, мкКл/см ²	U_{np} , В	Энергия, В
1000	0,89	75
1000	0,95	60
1000	1,53	45

Таблица 2

Параметры процесса ионной имплантации для *p*-канального транзистора

Доза, мкКл/см ²	U_{np} , В	Энергия, В
600	0,921	75
600	1,32	55
600	1,4	40

В ходе исследования замеры снимались с пластины-спутника, повторяющей структуру полевого транзистора. В процессе анализа получившихся параметров, включая поверхностное сопротивление, был сделан вывод о том, что ионы примеси благодаря сильной энергии имплантации смогли пробить сквозь подзатворный диэлектрик, образуя паразитный канал в транзисторе между стоком и истоком, что нарушает работоспособность микросхемы. По графикам зависимости порогового напряжения транзистора от энергии ионного легирования видно, что при меньшей энергии легирования пороговое напряжение повышается и входит в допустимый предел значений.

Путем оптимизации процесса имплантации, то есть подбором необходимых параметров, позволяющих уменьшить количество дефектов, полу-

лось сохранить необходимые параметры микросхемы в нужном диапазоне значений.

Для снижения негативного влияния, оказываемого на характеристики микросхем, применяют отжиг при 1000 °С. Данный метод позволяет минимизировать возникшие при ионной имплантации дефекты, устраниить нежелательные напряжения в материале и восстановить кристаллическую структуру полупроводника, а также равномерно распределить атомы примеси [4, 5].



Рис. 1. Зависимость порогового напряжения n -канального транзистора от энергии ионного легирования



Рис. 2. Зависимость порогового напряжения p -канального транзистора от энергии ионного легирования

Заключение. Высокая энергия ионного легирования сток-истоковых областей МОП транзисторов может привести к повреждению структуры кристалла и увеличению концентрации дефектов, что может повлиять на электрические характеристики и соответственно пороговое напряжение. Для достижения необходимых характеристик транзисторов важно оптимизировать процесс ионного легирования, чтобы контролировать влияние на поро-

говое напряжение и обеспечить стабильную работу устройства. Подбор правильного метода устранения дефектов и контроль процесса позволяют повысить выход годных и надежность КМОП интегральных микросхем.

Литература

- [1] Никифоров А.Ю. *Основы физики процессов в полупроводниковых приборах*. Санкт-Петербург, Лань, 2018.
- [2] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки. *Микроэлектроника*, 2000, т. 29, № 2, с. 105–112.
- [3] Строгонов А.В. Долговечность субмикронных БИС и ПЛИС. *Микроэлектроника*, 2005, т. 34, № 2, с. 138–158.
- [4] Глудкин О.П., Черняев В.Н. *Анализ и контроль технологических процессов производства РЭ*. Москва, Радио и Связь, 1983, 296 с.
- [5] Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Influence of temperature on high-field injection modification of MIS structures with thermal SiO₂ films doped with phosphorus. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2019, vol. 23, is. 4, pp. 303–312.
<https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2019031840>

Dependence of the CMOS transistor on the ion doping energy of the drain and source regions

Radzyshevskaya Victoria Vitalievna

vikuharad13@gmail.com

Andreev Vladimir Victorovich

vladimir_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The process of ion implantation of silicon semiconductor wafers is considered. The influence of ion doping parameters on the characteristics of microcircuits is analyzed. The electrical parameters of integrated circuits, which depend on the correctness and control of the ion doping process, are investigated. A method for correcting the ion doping process is proposed to eliminate defects that occur during impurity implantation and maintain the necessary parameters of the microcircuit in an acceptable range of values.

Keywords: *ion implantation, defects, electrophysical parameters, ion doping energy, threshold voltage*

УДК 621.311.69

Моделирование импульсных источников питания при помощи свободного программного обеспечения

Кузнецов Вадим Вадимович

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Рогов Даниил Михайлович

rogovdm@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Импульсные источники питания широко применяются в электронике, но требуют тщательного моделирования для оптимизации параметров. Исследовано применение свободного ПО Qucs-S для проектирования. Qucs-S сочетает графический интерфейс с поддержкой SPICE-симуляторов, что позволяет анализировать ключевые параметры: КПД, пульсации, стабильность. Рассмотрено моделирование выходного каскада и генерация ШИМ-сигналов. Отмечены ограничения: упрощенные модели силовых компонентов MOSFET, трансформаторов и отсутствие встроенных ШИМ-контроллеров. Несмотря на это, Qucs-S остается эффективным инструментом для проектирования ИИП, делая процесс доступным без использования коммерческого ПО.

Ключевые слова: *Qucs-s, схемотехническое моделирование, импульсные источники питания, импульс*

Введение. Импульсные источники питания [1] широко применяются в различных областях электроники благодаря их высокой эффективности, компактности и возможности работы в широком диапазоне входных напряжений. Однако их разработка требует детального анализа и моделирования, что позволяет избежать ошибок на этапе проектирования и оптимизировать параметры схемы. В этом процессе значительную роль играет использование свободного программного обеспечения, которое позволяет инженерам разрабатывать и тестировать схемы без необходимости приобретения дорогостоящих коммерческих решений.

Одним из популярных инструментов для моделирования является Qucs-S [2], который сочетает в себе удобный графический интерфейс и поддержку различных симуляторов, включая Ngspice, Хусе и др. Qucs-S позволяет моделировать сложные схемы, анализировать их параметры и проводить исследования работы компонентов в различных режимах.

Описание среды Qucs-s. Qucs-S представляет собой расширенную версию оригинального Qucs, поддерживающую модели SPICE. Это делает его особенно полезным для моделирования импульсных источников питания, так как в таких схемах часто используются сложные полупроводниковые компоненты, такие как MOSFET-транзисторы, диоды Шоттки и ШИМ-контроллеры, для которых доступны точные SPICE-модели.

Основные особенности Qucs-S:

– графический интерфейс — удобное создание схем без необходимости написания кода;

– поддержка SPICE — возможность моделирования с использованием Ngspice и Xusc;

– анализ различных параметров — временной, частотный, гармонический, параметрический анализы;

– импорт SPICE-моделей — позволяет использовать модели реальных компонентов от производителей;

– гибкость и расширяемость — поддержка пользовательских компонентов и скриптов.

Qucs-S имеет интуитивно понятный интерфейс, который включает:

– рабочую область для создания схем;

– библиотеку компонентов, содержащую пассивные, активные и управляемые элементы;

– панель параметров, где можно изменять свойства компонентов;

– консоль сообщений, отображающую результаты симуляции и возможные ошибки.

Использование Qucs-S для моделирования ИИП позволяет получить точные данные о работе схемы, оценить потери, КПД и стабильность выходного напряжения. Благодаря открытой архитектуре и поддержке различных симуляторов, этот инструмент становится мощным решением для инженеров и разработчиков.

Выполнение моделирования в Qucs-s. В данной работе было выполнено моделирование выходной ступени импульсного источника питания [3].

Выходная ступень импульсного источника питания играет ключевую роль в формировании стабильного напряжения/тока на нагрузке с минимальными пульсациями и высоким КПД. Выходная часть обычно включает диоды, фильтры низких частот состоящий из дросселя и конденсатора, а также дополнительные элементы.

Поскольку в программе Qucs-s нету встроенного ШИМ-контролера соберем эквивалентную схему полумоста способную выдать необходимый ШИМ-сигнал [4].

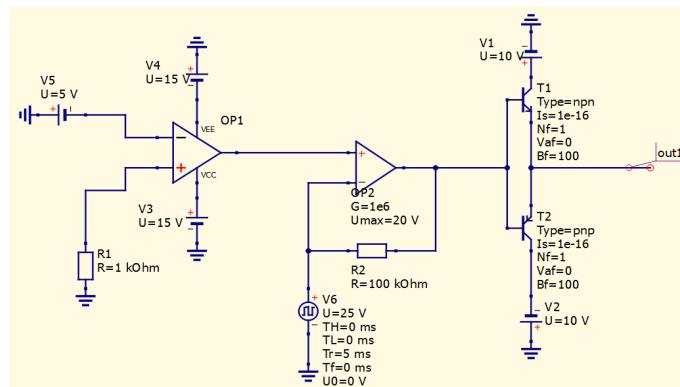


Рис. 1. Схема выдающая ШИМ-сигнал

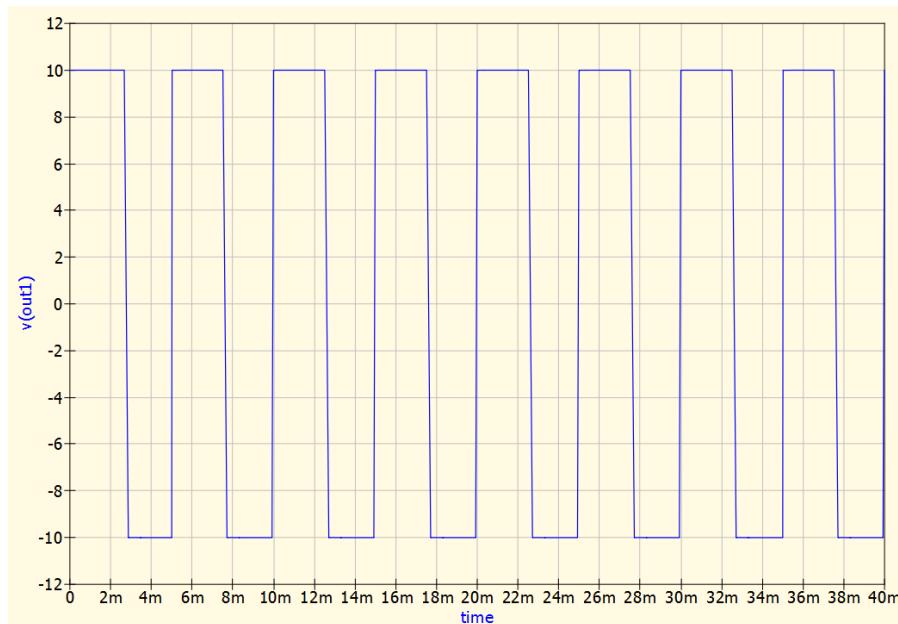


Рис. 2. Выдаваемый ШИМ сигнал

Полученную схему можно использовать в основной схеме. Построим выходную ступень импульсного источника и получим сигнал, выдаваемый на нагрузку.

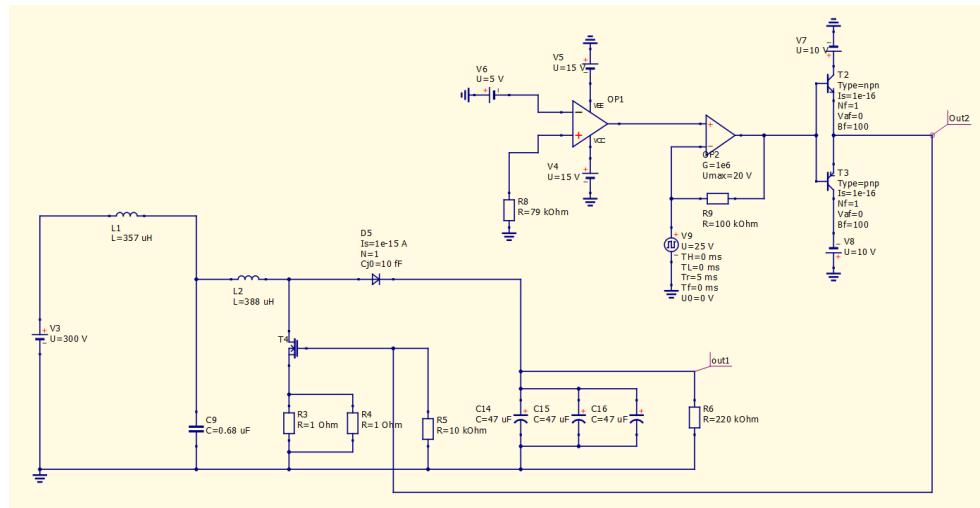


Рис. 3. Выходная ступень импульсного источника питания

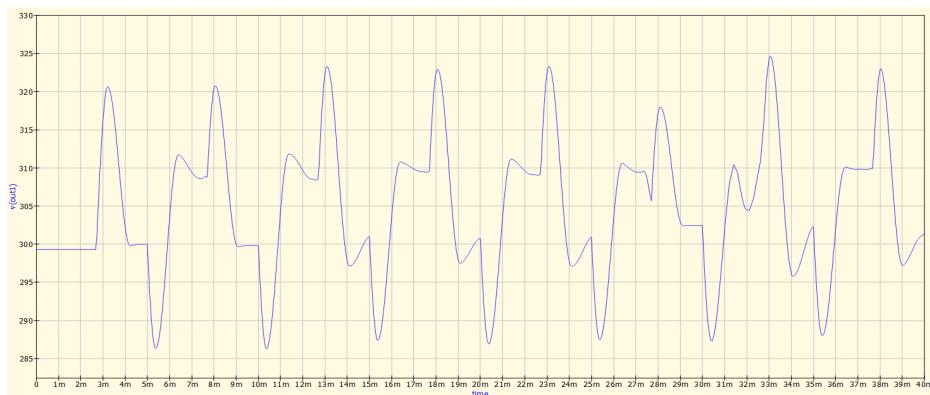


Рис. 4. Сигнал выдаваемый на нагрузку

Проблемы и ограничения Qucs-S при моделировании импульсных источников питания. Хотя Qucs-S — мощный инструмент для моделирования электронных схем, при работе с импульсными источниками питания пользователь может столкнуться с рядом сложностей, таких как недостаточная детализация моделей компонентов:

- библиотеки силовых элементов MOSFET, IGBT, быстрые диоды часто представлены упрощенными моделями, не учитывающими динамические потери;
- модели трансформаторов и дросселей могут не поддерживать насыщение, что критично для обратноходовых и прямоходовых преобразователей;
- отсутствие готовых моделей ШИМ-контроллеров, например, таких как UC3844, TL494, — их приходится заменять эквивалентными схемами или описывать вручную.

Заключение. Применение свободного программного обеспечения для моделирования импульсных источников питания позволяет инженерам и разработчикам эффективно проектировать и анализировать схемы, не тратя значительные средства на коммерческие инструменты. Хотя выбор подходящей программы и зависит от требований к проекту и специфики моделируемой схемы, но в любом случае использование свободного программного обеспечения открывает широкие возможности для оптимизации и тестирования электронных устройств. Делая процесс проектирования доступным для инженеров и радиолюбителей, экономия бюджета без потери качества анализа.

Литература

- [1] Смирнов Ю.А. *Импульсные источники питания: от простого к сложному*. Москва, ДМК Пресс, 2020.
- [2] Кузнецов В.В. Симулятор электронных схем с открытым исходным кодом Qucs: основные возможности и основы моделирования. *Компоненты и технологии*, 2015, № 3 (164), с. 114–120.

-
- [3] Семенов Б.Ю. *Силовая электроника: профессиональные решения*. Москва, СОЛОН-Пресс, 2011, 416 с.
 - [4] Долин Г.А., Бажин А.В. *Цифровая схемотехника. Исследование формирователей ШИМ-сигналов*. Москва, МТУСИ, 2021, 34 с.

Circuit simulation of a switched-mode power supply

Kuznetsov Vadim Vadimovich

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Rogov Daniil Mikhailovich

rogovdm@student.bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The research objective is to compare measurements of ripple and noise from a switched-mode power supply (SMPS) with data collected from an actual product. These measurements were conducted through circuit simulation using the Qucs-S software.

Keywords: *Qucs, circuit simulation, switched-mode power supply, pulse*

УДК 621.385.69

Схемотехническое моделирование СВЧ-устройства на микрополосковых линиях

Кузнецов Вадим Вадимович

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Лукашов Дмитрий Игоревич

dimitriluckashov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Описан процесс разработки микрополоскового полосового фильтра на 10 ГГц с применением современных САПР. Для моделирования использовалась программа QUCS, позволяющая анализировать электромагнитные характеристики, а для создания точной 3D-модели печатной платы — система KiCad. Особое внимание уделено теоретическим аспектам работы микрополосковых структур, включая анализ различных топологий. Обоснован выбор конфигурации на связанных линиях, которая обеспечивает оптимальное сочетание высоких селективных свойств и компактных размеров устройства.

Ключевые слова: микрополосковый фильтр, 10 ГГц, QUCS, KiCad, S-параметры, 3D-моделирование, печатная плата

Введение. Фильтры на микрополосковых линиях играют ключевую роль в современных радиоэлектронных системах, обеспечивая селекцию частот и формирование необходимых спектральных характеристик сигналов. Постоянно растущие требования к миниатюризации, повышению производительности и расширению функциональных возможностей радиоэлектронных устройств стимулируют развитие новых технологий в этой области [1].

В данной статье рассмотрен процесс проектирования полосового микрополоскового фильтра на частоту 10 ГГц с использованием программы QUCS-S для моделирования и KiCad для создания 3D-модели печатной платы.

Теоретические основы микрополосковых фильтров. Микрополосковый фильтр состоит из резонансных элементов (отрезков линий передачи), соединенных между собой. В данном случае был выбран полосовой фильтр на связанных линиях, поскольку он обеспечивает хорошую избирательность и может быть реализован на печатной плате [2].

Основные параметры фильтра: центральная частота: 10 ГГц; полоса пропускания: 1 ГГц (9,5–10,5 ГГц); затухание в полосе задерживания: >20 дБ вне рабочей полосы.

Проектирование фильтра в QUCS. Моделирование схемы. В QUCS была собрана схема микрополоскового фильтра на связанных линиях. Основные этапы: выбор типа подложки (FR-4, Rogers, др.) — в данном случае использовался FR-4 ($\epsilon_r = 2,56$, толщина 0,76 мм); расчет геометрических параметров линий (ширина, длина, зазоры) с учетом требуемого волнового сопротивления (50 Ом для согласования); настройка связи между резонаторами для обеспечения нужной полосы пропускания [3].

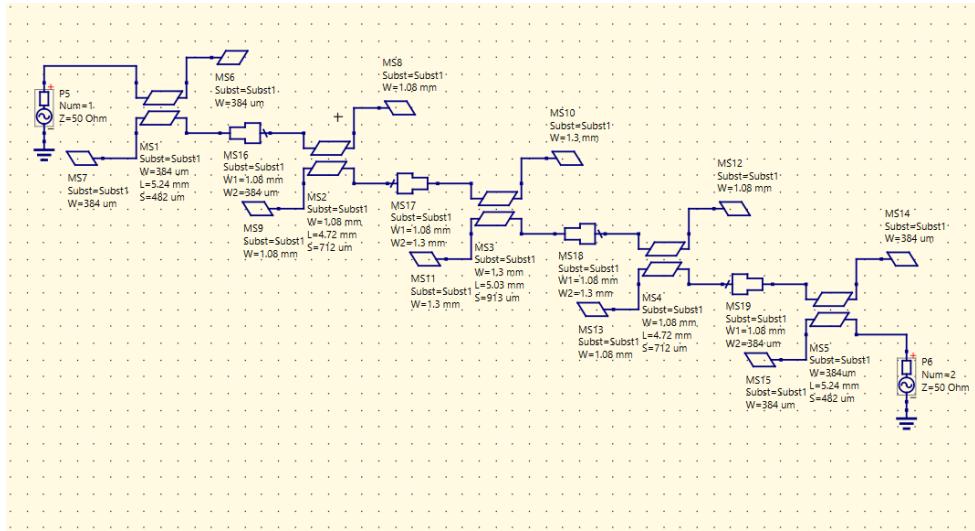
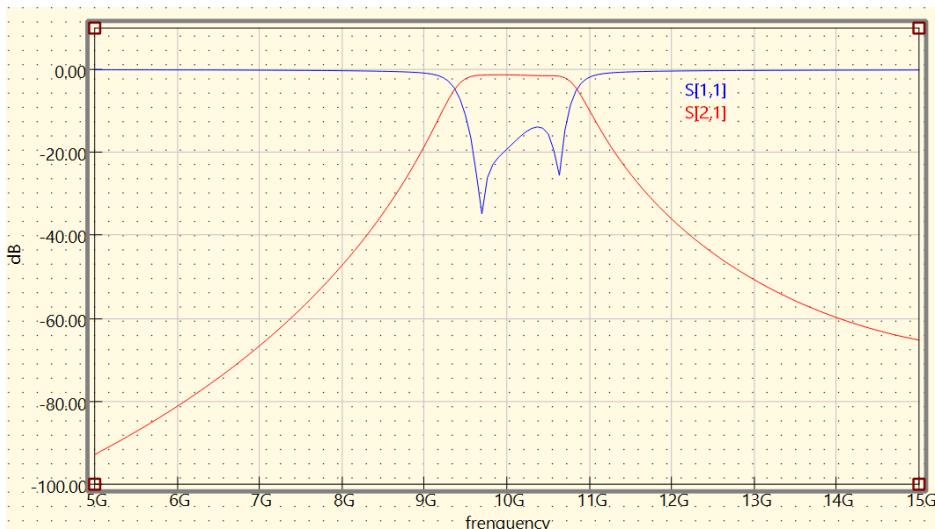


Рис. 1. Схема фильтра на микрополосковых линиях

Получение S -параметров. После настройки модели были проведены частотные расчеты в диапазоне 5–15 ГГц. Получены графики S_{11} (коэффициент отражения) и S_{21} (коэффициент передачи):

– S_{21} близок к 0 дБ в полосе 9,5–10,5 ГГц, что соответствует требуемой полосе пропускания;

S_{11} ниже —10 дБ в рабочей полосе, что говорит о хорошем согласовании.

Рис. 2. Графики S параметров

Разработка топологии в QUCS. На основе рассчитанных параметров в Qucsrlayout была создана топология фильтра: определены точные размеры микрополосковых линий и зазоров, проведена оптимизация для минимизации паразитных эффектов (изгибы линий, переходные отверстия и др.) [4].

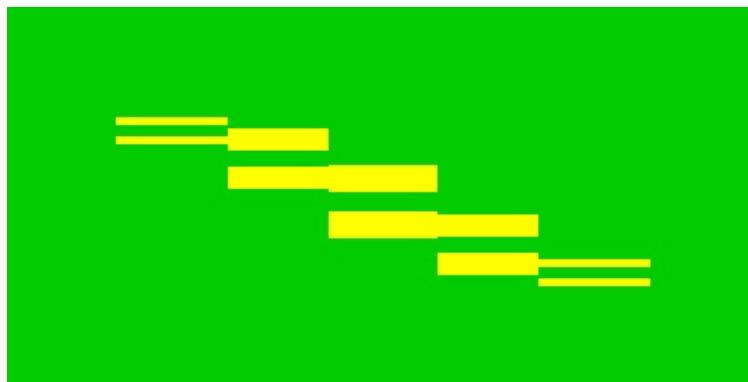


Рис. 3. Топология фильтра на микрополосковых линиях, сделанная при помощи Qucsrlayout

Создание 3D-модели в KiCad. Для визуализации и проверки конструкции фильтра была разработана 3D-модель печатной платы в KiCad:

- экспорт топологии из QUCS в формат Kicad_PCB;
- импорт в KiCad и размещение на плате;
- настройка 3D-визуализации с учетом материала подложки и металлизации.

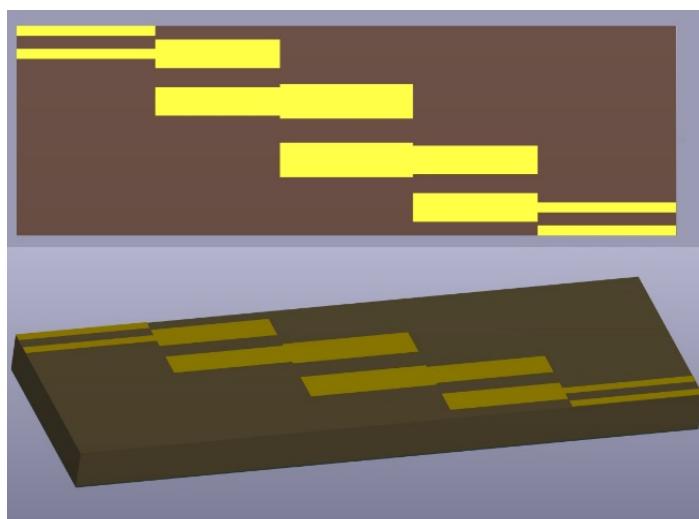


Рис. 4. Топология и 3D-вид фильтра разработанные при помощи KiCad

Заключение. В результате работы был спроектирован микрополосковый полосовой фильтр на 10 ГГц с использованием QUCS и KiCad. Получены:

- графики S-параметров, подтверждающие работоспособность фильтра;
- топология для изготовления печатной платы;
- 3D-модель для визуальной проверки конструкции.

Данный подход позволяет эффективно проектировать СВЧ-устройства с последующим изготовлением на печатных платах [5].

Дальнейшие улучшения:

- использование материалов с меньшими потерями (Rogers, керамика);
- оптимизация конструкции для уменьшения размеров;
- изготовление и измерение реального образца для сравнения с моделированием.

Таким образом, сочетание QUCS и KiCad является мощным инструментом для проектирования микрополосковых фильтров и других СВЧ-компонентов.

Литература

- [1] Сидоров Б.С. Моделирование СВЧ-фильтров на основе метаматериалов. *Современные проблемы электродинамики*, 2021, с. 120–135.
- [2] Кузнецов В.В. Моделирование высокочастотных схем в частотной области при помощи САПР Qucs. *Компоненты и технологии*, 2015, № 8, с. 120–126.
- [3] Иванов В.А. *Микроволновая электроника: основы и приложения*. Москва, Лань, 2022, с. 55–61.
- [4] Гуляев Ю.В. *Новые материалы для СВЧ-фильтров*. Москва, Наука, 2022, с. 55–62.
- [5] Смирнов В.Г. *Сравнительный анализ программных комплексов для моделирования СВЧ-фильтров*, 2023, с. 58–77.

Schematic modeling of a microwave device on microstrip lines

Kuznetsov Vadim Vadimovich

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Lukashov Dmitry Igorevich

dimitrilukashov@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article describes in detail the process of developing a 10 GHz microstrip bandpass filter using modern CAD. For modeling, the QUCS program was used, which allows analyzing electromagnetic characteristics, as well as for creating accurate 3D models of the printed circuit board — the KiCad system. Particular attention is paid to the theoretical aspects of the operation of microstrip structures, including the analysis of various topologies. A justified choice of limitation on the line boundaries, which provides a combination of high selective characteristics and compact dimensions of the device.

Keywords: microstrip filter, 10 GHz, QUCS, KiCad, S-parameters, 3D modeling, printed circuit board

УДК 621.383

К вопросу о моделировании работы фотоприемных устройств специального назначения

Пузиков Кирилл Алексеевич kirillkapuzikov@yandex.ru

Адарчин Сергей Александрович adarchin@bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э.Баумана, Калуга, Россия

Цель статьи — анализ изучения принципа функционирования фотоприемных устройств, а также моделирование их работы на примере вновь разработанного изделия. Проанализированы методы фотодетектирования, усиления фототока, изложен принцип определения суммарной дисперсии и отображен график изменения дисперсии в зависимости от длины волны. Разработана структурная схема устройства и методика расчета вольтовой монохроматической импульсной чувствительности, ее разброс и плоского угла зрения первого ФЧЭ. В заключение приводятся осциллограммы выходных сигналов, что подтверждает работоспособность изделия в целом.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, приемник, фото, оптический, лазерный, сигнал, детектирование, тепловизор, тепловизионное, шум, осциллограмма, помеха

В настоящее время номенклатура используемых в тепловизионных каналах фотоприемных устройств чрезвычайно мала, особенно в условиях импортозамещения.

Для эффективного противодействия лазерным системам наведения, целеуказания, дальнометрирования возникает необходимость разработки и модернизации станций обнаружения излучений. Основным элементом подобных систем, во многом определяющим их технические характеристики и возможности, а также полностью формирующие рабочий диапазон длин волн, является фотоприемное устройство (ФПУ). ФПУ принимает оптическое излучение, преобразует его в электрический сигнал, осуществляет усиление и, при необходимости, преобразование формы, а затем передает сигнал на следующее за ним пороговое устройство. При этом создание подобных ФПУ связано со множеством технических сложностей, вызванных как априорной неопределенностью параметров поступающих сигналов, так и требованиями к обеспечению высоких технических характеристик во всем рабочем диапазоне длин волн. При создании такого рода оптико-электронных устройств приходится решать противоречивые задачи. Для получения высоких показателей чувствительности ФПУ должно обладать минимальным уровнем собственных шумов и при этом работать с короткими импульсными сигналами, длительность которых может меняться более чем на порядок, в условиях сложной помеховой и фоновой обстановки. Учитывая объект установки, зачастую требуется максимальное снижение массы и энергопотребления при сохранении количества каналов и высокой обнаружительной способности [1].

Среди методов фотодетектирования различают прямое детектирование и детектирование с преобразованием, подразделяемое на гомодинное и гетеродинное.

При этом, при прямом детектировании оптический сигнал направляется на фотодетектор и на выходе изделия фиксируется электрический сигнал (рис. 1).



Рис. 1. Прямое детектирование оптического сигнала

Электрический сигнал образуется в виде изменяющегося электрического тока (фототока), который далее поступает на оконечный каскад и усиливается с малым собственным шумом.

При детектировании с преобразованием оптический сигнал направляется на фотодетектор вместе с сигналом опорного оптического генератора (ООГ), который должен быть согласован с генератором — передатчиком. На выходе ФПУ получаем фиксированный электрический сигнал или сигнал радиочастоты, содержащий информационный сигнал (рис. 2).

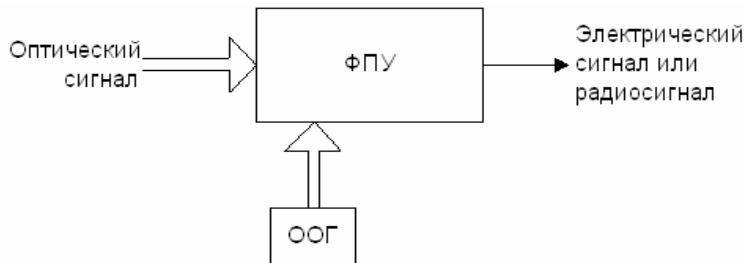


Рис. 2. Детектирование с преобразованием

При гомодинном детектировании частота несущей оптического сигнала совпадает с частотой ООГ и на выходе ФПУ выделяется информационный электрический сигнал. При гетеродинном детектировании частота несущей отличается от частоты ООГ. Разность этих частот представляет радиочастотный сигнал, модулированный информационным сигналом [2].

Всего существует два вида дисперсии: волноводная и материальная — зависимость фазовой скорости от частоты при распространении колебаний в материале. Суммарная дисперсия определяется как сумма двух видов дисперсий:

$$\delta_{\tau\Sigma} = \delta_{\tau_{\text{в}}} + \delta_{\tau_{\text{м}}}.$$

Величина этих составляющих имеет одинаковый порядок, а функциональная зависимость от длины волны у них имеет разный знак. В результате на некоторой частоте сумма этих двух величин дает ноль — дисперсия отсутствует.

График изменения дисперсии в зависимости от длины волны представлен на рис. 3.

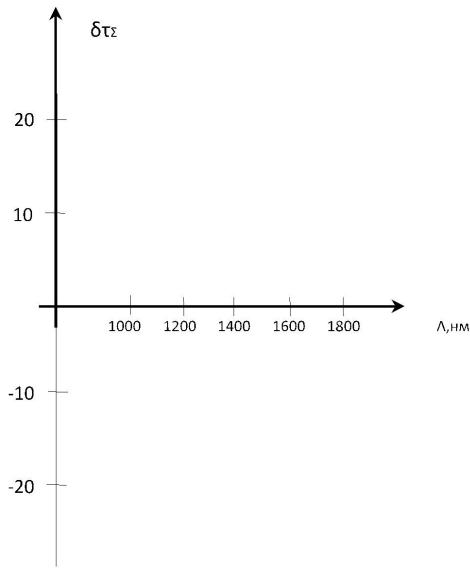


Рис. 3. График изменения дисперсии в зависимости от длины волны

Исходя из графика в данной системе, выбрана длина волны 1,3 мкм. Величина дисперсии в связи с разбросом спектральных параметров, обычно равна 2–5 нс/мкм. В соответствии с этим ощутимого ослабления сигнала из-за полной дисперсии не ожидается [3].

Структурная схема разрабатываемого фотоприемного устройства приведена на рис. 4.

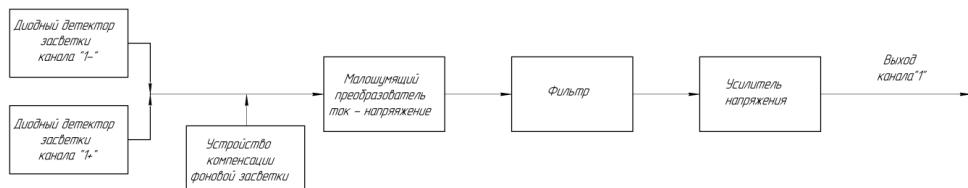


Рис. 4. Структурная схема ФПУ

В качестве приемников излучения в каждом канале последовательно включены фотодиоды. Подобная схема включения позволяет формировать в одном канале полезные сигналы положительной и отрицательной полярности (так называемый «№+» и «№-») в зависимости от засвечиваемого фотодиода. Также последовательное включение фотодиодов позволяет частично компенсировать фоновые токи, возникающие от внешних источников помех (например, фоновая солнечная засветка) и расширить динамический диапазон работы устройства [4].

Для исключения влияния на работу прибора фоновых токов, как постоянных, так и модулированных низкой частотой, служит устройство компенсации фоновой засветки. Данная схема позволяет компенсировать фоновые токи и поддерживать постоянный уровень смещения на фотодиодах. Для снижения шумового вклада от устройства компенсации оно выполнено на базе операционного усилителя 744УД1, обладающего низким уровнем собственных шумов и высоким входным сопротивлением, что позволяет исключить его влияние на работу дальнейшей схемы [5].

Согласно техническому заданию, требуется включить излучатель с длиной волны излучения λ_2 , мкм, подключить выход контактного устройства к входу осциллографа и настроить по максимуму сигнала положение маски 1 на один из ФЧЭ первого канала ФПУ.

После этого облучается первый ФЧЭ первого канала ФПУ излучением с плотностью энергии $(1 \times 10^{k+3} + 20\%) \text{ Дж/см}^2$. Вводя дополнительные фильтры-ослабители, можно добиться на выходе значения амплитуды сигнала $U_c = 0,5 \text{ В}$.

Значение плотности энергии импульсного потока излучения $E_{\text{осл}}$ после установки набора ослабителей фиксируется по формуле:

$$E_{\text{осл.}} = K \cdot E',$$

где K — коэффициент плотности энергии; E' — значение плотности энергии, измеренное средством измерения СИ-свидетелем.

По осциллограмме измеряется амплитуда импульса фотосигнала U_{ci} при облучении установленной плотностью энергии $E_{\text{осл.}}$.

Далее можно вычислить вольтовую монохроматическую импульсную чувствительность i -го ФЧЭ $S_{u\lambda i}$ ($\text{В}\cdot\text{см}^2/\text{Дж}$) по формуле:

$$S_{u\lambda i}(i) = \frac{U_{ci}(i)}{E_{\text{осл.}}},$$

где U_{ci} — амплитуда импульса фотосигнала при облучении установленной плотностью энергии $E_{\text{осл.}}$, мВ; $E_{\text{осл.}}$ — фактическое значение плотности энергии импульсного потока излучения, Дж/см^2 ; i — номер ФЧЭ от 1 до 8.

Для второго ФЧЭ первого канала последовательность операций выполняется в том же порядке, что и для первого ФЧЭ первого канала.

Разброс вольтовой монохроматической импульсной чувствительности $\delta S_{u\lambda}$ в процентах вычисляют по формуле

$$\delta S_{U\lambda} = \frac{|S'_{U\lambda(max)} - S''_{U\lambda(min)}|}{S'_{U\lambda(max)} + S''_{U\lambda(min)}} \cdot 100\%,$$

где $S'_{U\lambda(max)}$ — максимальное значение вольтовой монохроматической импульсной чувствительности ФПУ, В·см²/Дж; $S''_{U\lambda(min)}$ — минимальное значение вольтовой монохроматической импульсной чувствительности ФПУ, В·см²/Дж.

Согласно руководству по эксплуатации выключить излучатель с длиной волны излучения λ_2 , мкм.

При помощи поворотного столика, плавно поворачивая ФПУ влево и вправо относительно оси светового пучка, определяют соответственно углы β_1 и β_2 , при которых амплитуда импульса фотосигнала уменьшится в 5 раз по сравнению с амплитудой импульса фотосигнала, измеренной до поворота столика [3].

Плоский угол зрения первого ФЧЭ первого канала ФПУ β в градусах вычисляют по формуле

$$2\beta = \beta_1 + \beta_2,$$

где β_1, β_2 — углы поворота столика влево и вправо соответственно, град.

Для второго ФЧЭ первого канала последовательность операций выполняется в том же порядке, что и для первого ФЧЭ первого канала.

Аналогичную подготовку к контролю $\beta(i)$ и измерения $\beta(i)$ производят для всех каналов (i — номера ФЧЭ, от 1 до 8).

Плоский угол зрения 2β должен быть не менее 130°.

В результате моделирования были получены осциллограммы выходных сигналов при положительном и отрицательном потенциале напряжения питания.

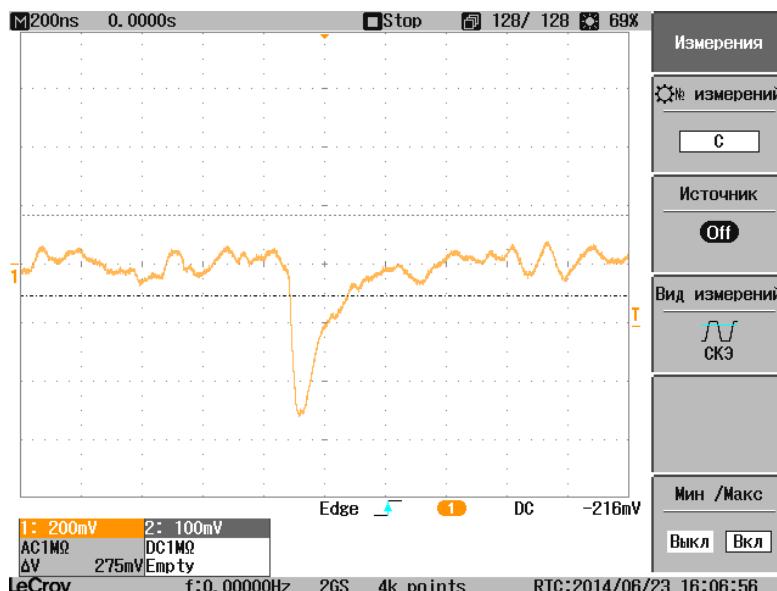


Рис. 5. Осциллограмма выходного сигнала при положительном потенциале входного сигнала

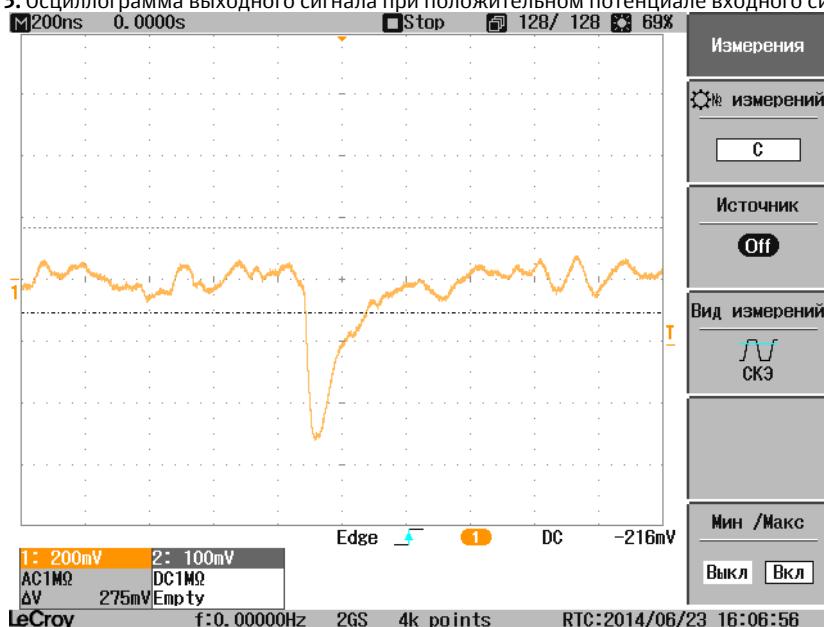


Рис. 6. Осциллограмма выходного сигнала при отрицательном потенциале входного сигнала

В результате проведенной работы было спроектировано и испытано устройство приемника импульсов лазерного излучения видимого и инфракрасного диапазона (фотоприемное устройство) [4].

Литература

- [1] Швецов Э.А., Белкин М.Е. *Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи*. Москва, Радио и связь, 1992.
- [2] Войшвилло Г.В. *Усилительные устройства*. Москва. Радио и связь, 1989.
- [3] Гонда С., Сэко Д. *Оптоэлектроника в вопросах и ответах*. Ленинград, Энергоиздат, 1989.
- [4] Окоси Т. *Волоконно-оптические датчики*. Ленинград, Энергоиздат, 1991.
- [5] Гауэр Д. *Оптические системы связи*. Москва, Радио и связь, 1989.

On the issue of modeling the operation of special-purpose photodetectors

Puzikov Kirill Alekseevich kirillkapuzikov@yandex.ru

Adarchin Sergey Alexandrovich adarchin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The purpose of the article is to analyze the study of the principle of functioning of photodetector devices, as well as modeling their operation using the example of a newly developed product. The paper analyzes photodetection methods, photocurrent amplification, outlines the principle of determining the total dispersion and displays a graph of variation in dispersion depending on the wavelength. The author has developed a structural diagram of the device and a method for calculating the voltaic monochromatic pulse sensitivity, its spread and the flat angle of view of the first PCE. In conclusion, the waveforms of the output signals are given, which confirms the operability of the product as a whole.

Keywords: photodetector, device, receiver, photo, optical, laser, signal, detection, thermal imager, thermal imaging, noise, oscilloscope, interference

УДК 621.317

Исследование влияния выходного каскада на работу интегральной микросхемы — компаратор напряжений

Пузиков Кирилл Алексеевич kirillkapuzikov@yandex.ru
 Адарчин Сергей Александрович adarchin@bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э.Баумана, Калуга, Россия

Необходимость исследования выходного каскада стала на производстве после того, как результаты измерений изготовленных схем не удовлетворяли параметрам, указанным в техническом задании на проектирование. В частности, критическим параметром были напряжение низкого уровня U_{OL} и время задержки выключения t_{DHL} . Данные параметры являются взаимосвязанными и принципиально зависят от параметров выходного транзистора $VT45$. Эти два параметра связаны временем рассасывания объемного заряда транзистора при переходе из режима насыщения в режим отсечки. Вследствие чего, было принято решение провести исследование влияния выходного каскада на работу схемы, а также подобрать такое схемотехническое решение, которое удовлетворяло бы заданным требованиям. С целью сохранения финансовых средств, времени, людских затрат было проведено моделирование микросхемы компаратора в программе EWB Multisim 8.

Ключевые слова: выходной каскад, параметры схемы, выходной транзистор, время рассасывания объемного заряда, моделирование, исследование, улучшение

В данной схеме в качестве главного переключающего элемента представлен транзистор $VT45$ (рис. 1), который является многоэмиттерным, что уменьшает его быстродействие, но увеличивает пропускную способность [1, 2]. Временные диаграммы «Напряжение низкого уровня» и «Время задержки выключения» приведены ниже на рис. 2 и 3.

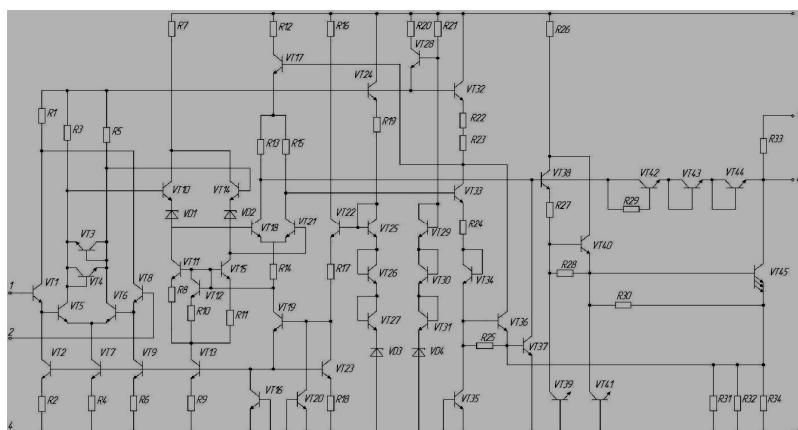
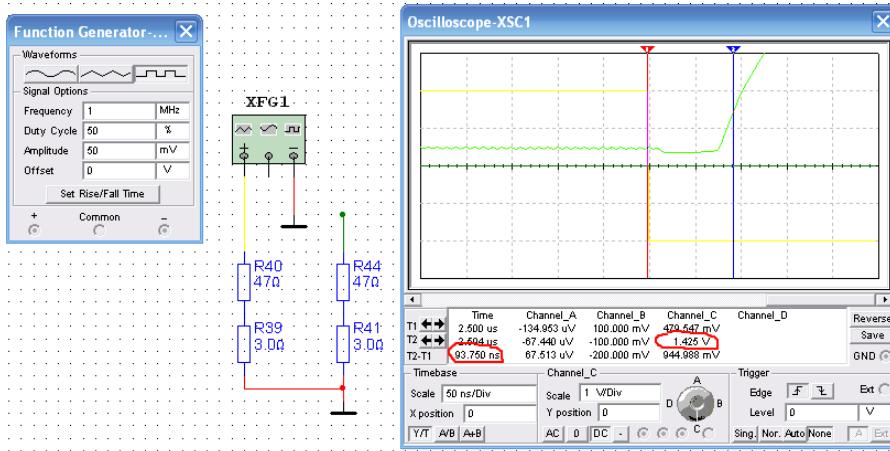
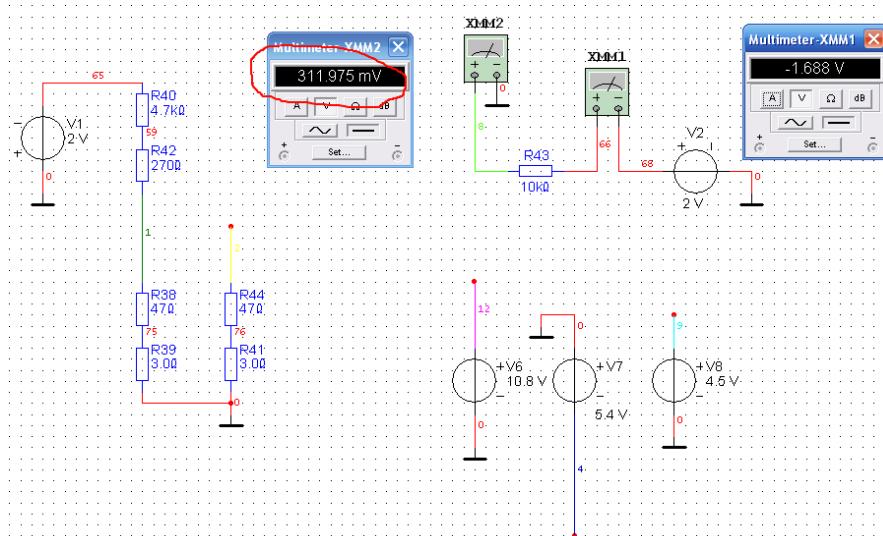


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная (исходный вариант)

Рис. 2. Осциллограмма «Время задержки выключения t_{DLH} »Рис. 3. Напряжение низкого уровня U_{OL}

Результат, показанный на рис. 2, 3, получен после моделирования схемы и снятия параметров U_{OL} и t_{DLH} по схемам измерения и режимам, приведенным в ТУ, ГОСТ 18638.1–83 и ГОСТ 23089.14–88. Как отмечено на рисунках, видно, что по напряжению смещения нуля схема удовлетворяет заданным параметрам, но по времени задержки выключения выходит за пределы. Технологически, уменьшив толщину базы, вогнать эти параметры не получилось, так как они оба находятся на границе пределов ($t_{DLH} \approx 93$ нс, а $U_{OL} \approx 312$ мВ), что привело к уменьшению одного, но при этом критически увеличился дру-

гой. Как вывод, такой результат привел к тому, что необходимо было изменить схемотехнику выходного каскада [3, 4].

В данной схеме (рис. 4) для того, чтобы увеличить быстродействие была изменена форма транзистора с многоэмиттерного на обычный. С изменением формы VT45, стало возможным убрать дополнительные транзисторы VT42, VT43, которые создавали необходимое падение напряжения для VT45, чтобы ввести его в насыщение. На рис. 5 и 6 показаны диаграммы времени задержки выключения и напряжение низкого уровня.

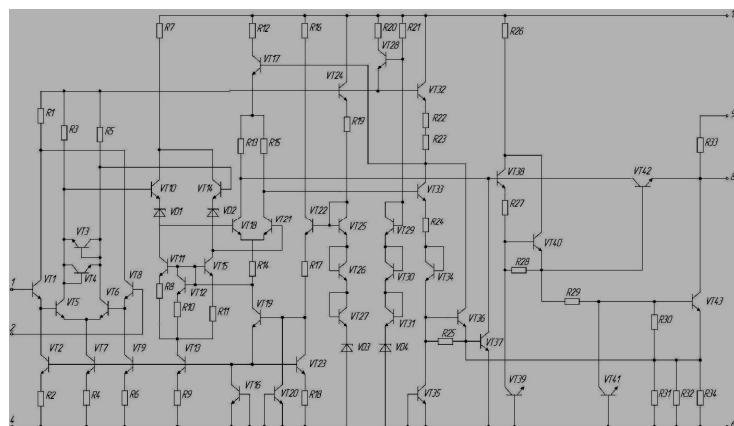


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная (промежуточный этап вариант)

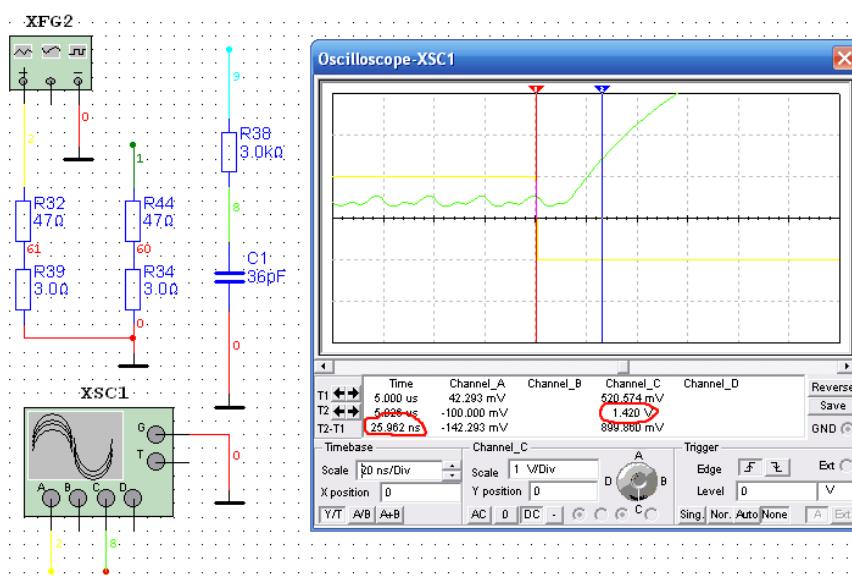


Рис. 5. Осциллограмма «Время задержки выключения t_{DHL} »

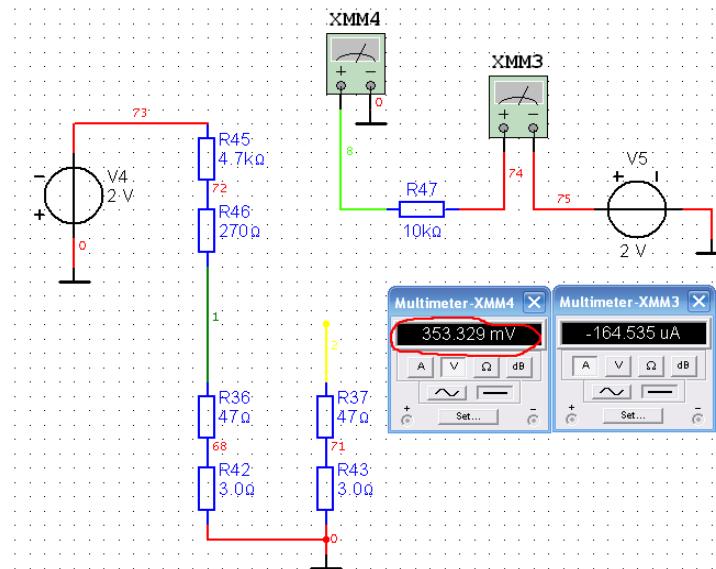


Рис. 6. Напряжение низкого уровня U_{0L}

В данной схеме, по сравнению с предыдущей, был улучшен такой параметр, как время задержки выключения, но другой параметр несколько ухудшился, поэтому был предпринят еще один шаг по модернизации выходного каскада [5].

Литература

- [1] Иванов А.В. Основы проектирования интегральных микросхем. *Электроника и связь*, 2020, № 3, с. 12–20.
- [2] Смирнов П.И. Компараторы напряжения: принципы работы и применения. *Радиоэлектронные устройства*, 2019, № 4, с. 45–52.
- [3] Кузнецов В.М., Сидоров А.Е. Интегральные схемы для измерений электрических величин. *Наука и техника*, 2021, т. 19, с. 78–85.
- [4] Петрова А.Ю. Особенности работы компараторов в цифровых схемах. *Журнал фундаментальной и прикладной электроники*, 2022, № 2, с. 34–41.
- [5] Лебедев М.Р. Современные подходы к проектированию компараторов. *Системы управления и вычислительная техника*, 2023, т. 15, с. 23–30.

Investigation of the effect of the output stage on the operation of an integrated circuit voltage comparator

Puzikov Kirill Alekseevich kirillkapuzikov@yandex.ru

Adarchin Sergey Alexandrovich adarchin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The need to study the output stage arose in production after the measurement results of the manufactured circuits did not meet the parameters specified in the design terms of reference. In particular, the critical parameter was the low-level voltage U_{OL} and the delay time for switching off t_{DHL} . These parameters are interrelated and fundamentally depend on the parameters of the VT45 output transistor (see Appendix). These two parameters are related to the resorption time of the transistor's volumetric charge during the transition from saturation mode to cut-off mode. As a result, it was decided to conduct a study of the effect of the output stage on the operation of the circuit, as well as to select a circuit design solution that would meet the specified requirements. In order to save financial resources, time, and human resources, a comparator chip was simulated in the EWB Multisim 8 program.

Keywords: *output stage, circuit parameters, output transistor, volume charge resorption time, modeling, research, improvement*

УДК 621.317

Влияние технологического процесса изготовления компаратора на его электрические характеристики и их стабильность

Лыков Андрей Дмитриевич

lyukovad@student.bmstu.ru

Полпудников Сергей Викторович

polpud@bmstu.ru

Андреев Владимир Викторович

vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э.Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено исследование работы быстродействующего компаратора после внесения корректировки в технологический процесс изготовления. Был проведен анализ принципа работы компаратора, моделирование времени задержки выключения в программе Multisim. Оценены влияния глубокого слоя коллектора на повышение токов потребления. Результаты исследования позволяют оценить влияние технологического процесса изготовления компаратора на его электрические характеристики и их стабильность.

Ключевые слова: интегральная микросхема, компаратор, время задержки выключения, Multisim, ток потребления

Компаратор — это прибор для сравнения двух или нескольких напряжений с определенной точностью и выдачи результата с минимальной задержкой.

Схема компаратора сравнивает два напряжения и выводит либо 1 (напряжение на положительной стороне), либо 0 (напряжение на отрицательной стороне), чтобы указать, какое из них больше. Компараторы часто используются, например, для проверки того, достиг ли вход некоторого предопределенного значения [1–3].

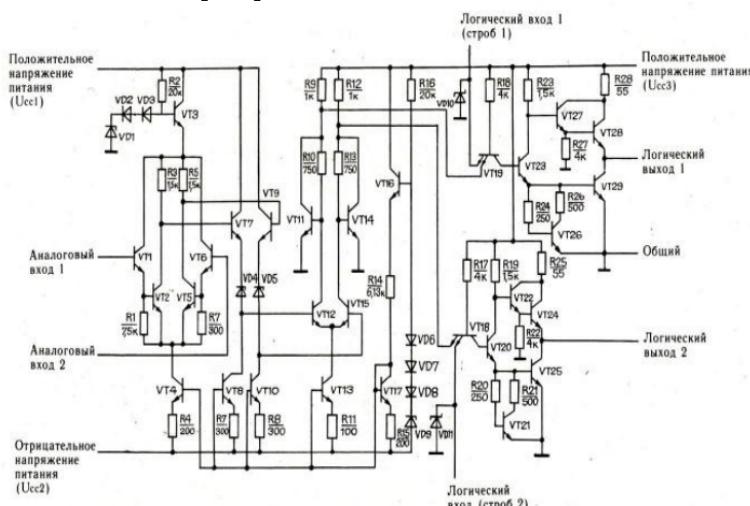


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

Опишем работу компаратора (аналог зарубежного компаратора NE527), разделив схему на функциональные блоки.

1. Аналоговые входы и дифференциальные усилители:

1) аналоговые входы 1 и 2: подают напряжения, которые необходимо сравнить;

2) дифференциальные усилители (VT1–VT7 и VT4–VT10): эти каскады являются основой схемы. Они усиливают разность потенциалов между аналоговыми входами. На транзисторах VT1, VT2, VT6 образуется первый дифференциальный усилитель, обрабатывающий вход 1. Транзисторы VT4, VT5, VT8 образуют второй дифференциальный усилитель для входа 2;

3) нагрузочные резисторы (R1, R7, R4, R8): эти резисторы создают смещение и определяют усиление дифференциальных усилителей. Их значения задают чувствительность компаратора к разнице входных напряжений.

2. Уровне устанавливающие схемы (VT11, VT12, VT13, VT14): эти схемы устанавливают пороговые уровни напряжения для срабатывания выходных каскадов. Они являются ключевыми элементами, определяющими при какой разнице напряжений на входах произойдет переключение выхода. Напряжение на коллекторах VT11 и VT12 определяет порог срабатывания первого канала, а VT13 и VT14 — второго. Резисторы R10-R15 участвуют в настройке этих порогов.

3. Логические входы:

1) логические входы (1 и 2): эти входы позволяют управлять работой компараторов. Низкий уровень на стробе блокирует соответствующий выход, а высокий уровень разрешает его работу. Это позволяет синхронизировать работу компаратора с другими частями системы.

4. Выходные каскады (VT16–VT29): транзисторы VT16–VT23 и VT18–VT25 являются эмиттерными повторителями, которые обеспечивают согласование с нагрузкой и формируют ТТЛ-совместимые сигналы на выходах 1 и 2. Схема построена таким образом, что выходы противофазны: если на одном выходе высокий уровень, то на другом — низкий, и наоборот. Резисторы R16-R29 определяют токи и уровни выходных сигналов.

5. Источники питания:

1) $+U_{cc1}$ (положительное напряжение питания): питает всю схему;

2) $-U_{cc2}$ (отрицательное напряжение питания): обеспечивает симметричное питание, необходимое для корректной работы дифференциальных усилителей.

Работа схемы:

– сравнение аналоговых сигналов: дифференциальные усилители усиливают разность между аналоговыми входами;

– срабатывание уровне устанавливающих схем: если разность напряжений на входах превышает установленный порог (заданный R10–R15), соответствующая уровне устанавливающая схема изменяет свое состояние;

– разрешение выходов (стробы): если логический вход (строб) высокого уровня, выходной каскад реагирует на состояние уровне устанавливающей схемы и формирует соответствующий выходной сигнал;

– формирование выходных сигналов: выходные каскады формируют противофазные ТТЛ-совместимые сигналы.

На рис. 2 представлен результат моделирования в программе Multisim — график времени перехода при выключении интегральной микросхемы (быстродействующий компаратор). Полученные значения позволяют сделать вывод, что t_{DLH} составляет порядка 25 нс, что является важным параметром для компаратора, характеризующим быстродействие и стабильность работы интегральной микросхемы [4–5].

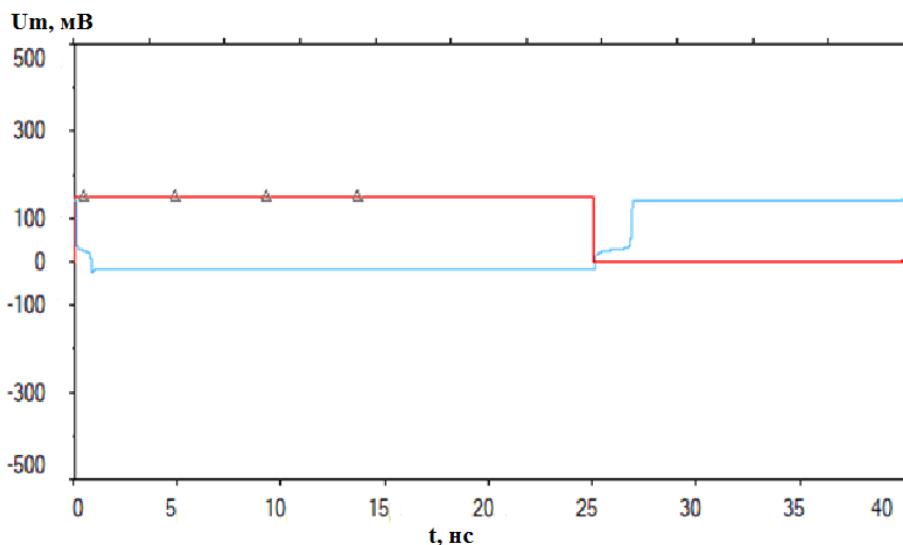


Рис. 2. График времени перехода при выключении

Рассмотрим влияние слоя глубокого коллектора на изменения токов потребления компаратора.

Ток потребления (I_{CC}) — значение тока, потребляемого интегральной микросхемой от источника питания.

Напряжение питания (U_{CC}) — значение напряжения источника питания, обеспечивающего работу интегральной микросхемы в заданном режиме.

На рис. 3 показан график зависимости токов потребления I_{CC1} , I_{CC2} от U_{CC1} , $|U_{CC2}|$. График показывает, что токи потребления I_{CC1} и I_{CC2} почти одинаковы и слабо зависят от напряжения питания. В диапазоне напряжений от 5 до 10 В токи потребления остаются практически постоянными. С увеличением напряжения до 5 В наблюдается нелинейный рост потребляемого тока. График демонстрирует низкое потребление тока компаратора, эта характеристика важна для устройств, где энергопотребление является критическим фактором [6].

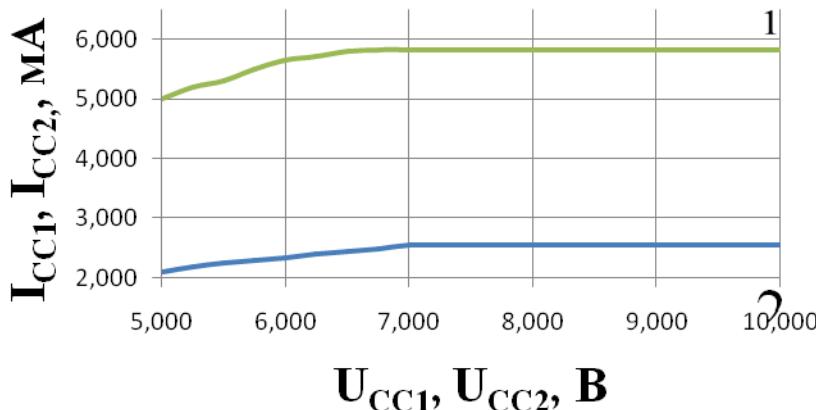


Рис. 3. График зависимости токов потребления I_{cc1}, I_{cc2} от $U_{cc1}, |U_{cc2}|$: 1 — ток потребления во входном каскаде положительного питания; 2 — ток потребления во входном каскаде отрицательного питания

Заключение. Рассмотрено исследование работы быстродействующего компаратора после внесения корректировки в технологический процесс изготовления. В результате моделирование времени задержки выключения в программе Multisim были получены данные, которые соответствуют значениям компаратора. Был проведен анализ влияния слоя глубокого коллектора на токи потребления и можно сделать вывод, что токи потребления не изменились и находятся в пределах норм по техническим условиям. Результаты исследования подтвердили правильность корректировки биполярного технологического процесса изготовления интегральных микросхем компараторов.

Список литературы

- [1] Абрамов И.И., Дворников О.В. Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов. *Нано и микросистемная техника*, 2005, № 10, с. 23–35.
- [2] Stefanovic D., Kayal M. *Structured Analog CMOS Design*. Springer 2008, 290 р.
- [3] Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. *Теория передачи сигналов*. Москва, Радио и связь, 2011, 368 с.
- [4] Андреев Д.В., Курносенко А.Е., Макарчук В.В., Соловьев В.А. *Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 467 с.
- [5] Андреев В.В., Жалнин В.П., Столяров А.А. *Физические основы микро- и наноэлектроники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 292, с.
- [6] Best R.E. *Phase-Locked Loops. Design, Simulation, and Applications*. McGraw Hill.

Study of the comparator operation and the effect of changes in the crystal structure on consumption currents

Lykov Andrey Dmitrievich lyykovad@student.bmstu.ru

Polpudnikov Sergey Viktorovich polpud@bmstu.ru

Andreev Vladimir Viktorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

A study of the operation of a high-speed comparator after making adjustments to the manufacturing process is considered. As part of the study, the principle of operation of the comparator was analyzed, and the shutdown delay time was simulated in the Multisim program. The effects of the deep collector layer on the increase in consumption currents are estimated. The results of the study make it possible to evaluate the correctness of changing the bipolar manufacturing process of integrated circuits of comparators.

Keywords: integrated circuit, comparator, turn-off delay time, Multisim, current consumption

УДК 519.876.5

Верификация SPICE-моделей ИМС логических элементов серии CD4000

Кузнецов Вадим Вадимович

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Алексин Артем Владимирович

alyokhinav@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э.Баумана, Калуга, Россия

Микросхемы серии CD4000 до сих пор имеют широкое применение в различных областях электроники. Они особенно востребованы, если необходимо простое, надежное и энергосберегающее решение. Однако программное обеспечение Qucs-S не имеет встроенных моделей данных микросхем, что ограничивает моделирование логических схем. Рассмотрена разработка рабочей SPICE-модели микросхемы K561ЛА7 (аналог CD4011) на основе данных, полученных при моделировании схемы кольцевого генератора на макетной плате. Отмечены расхождения результатов реального и виртуального моделирований, отмечена необходимость дальнейших доработок моделей.

Ключевые слова: Qucs-s, моделирование, SPICE-модель, микросхема, кольцевой генератор, задержка переключения

Введение. Серия CD4000 — это семейство цифровых интегральных схем на основе КМОП-технологии (комплементарный металл-оксид-полупроводник), ставшее отраслевым стандартом в электронике. Разработанные компанией RCA в конце 1960-х годов, эти микросхемы получили широкое распространение благодаря своим выдающимся характеристикам [1].

При типичном напряжении питания 10 В параметры микросхем, следующие:

- ток потребления в покое: 0,1 мА (при комнатной температуре);
- входная емкость: не более 5 пФ;
- время задержки распространения: 50–250 нс (зависит от нагрузки и напряжения);
- выходной ток: от 1 мА (5 В) до 6,8 мА (15 В);
- время переключения сигнала: 40–150 нс (от 10 до 90 % VDD).

Изначально микросхемы выпускались в керамических DIP-корпусах (для военных применений) и пластиковых DIP (для коммерческих целей). Современные версии доступны в корпусах SOIC и TSSOP для поверхностного монтажа.

SPICE-модели в программе Qucs-S. SPICE-модели представляют собой математические описания электронных компонентов, используемые для компьютерного моделирования схем. Эти модели точно воспроизводят поведение резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов и микросхем в различных рабочих условиях.

В основе SPICE-моделей лежат три ключевых элемента: физические параметры полупроводниковых структур, экспериментальные данные измере-

ний реальных компонентов и сложные математические уравнения. Производители электронных компонентов обычно предоставляют готовые SPICE-модели в формате .model или .subckt файлов. Наиболее продвинутые модели, такие как BSIM для полевых транзисторов, учитывают температурные эффекты, шумовые характеристики и поведение на высоких частотах [2].

Qucs-S является бесплатной программой для схемотехнического проектирования с поддержкой SPICE-движка. Работа с моделями в этой среде включает несколько этапов: размещение компонента на схеме, подключение соответствующей SPICE-модели, моделирование на постоянном или переменном токах, переходных процессов и др. [3].

Особенность Qucs-S заключается в гибкости: программа поддерживает как встроенные модели базовых компонентов, так и сторонние модели от производителей. Кроме того, она позволяет комбинировать классические SPICE-модели с описаниями на языке Verilog-A, что особенно полезно при работе со сложными цифро-аналоговыми схемами.

Моделирование микросхемы CD4011. В данной работе было выполнено исследование схемы кольцевого генератора на микросхеме K561ЛА7 (отечественный аналог CD4011), а также его моделирование в среде Qucs-S [4].

K561ЛА7 представляют собой четыре логических элемента 2И-НЕ. Предназначены для работы в узлах и блоках радиоэлектронной аппаратуры общего назначения. Выпускаются в 14-выводном пластмассовом корпусе с вертикальным расположением выводов для монтажа в отверстия печатной платы [1].

Данная микросхема использовалась для построения схемы кольцевого генератора на макетной плате. Кольцевой генератор представляет собой автоколебательную схему, построенную на основе нечетного числа логических инверторов, соединенных в замкнутое кольцо (рис. 1). Его работа основана на неустойчивости состояния из-за последовательной инверсии сигнала и задержек распространения [5].

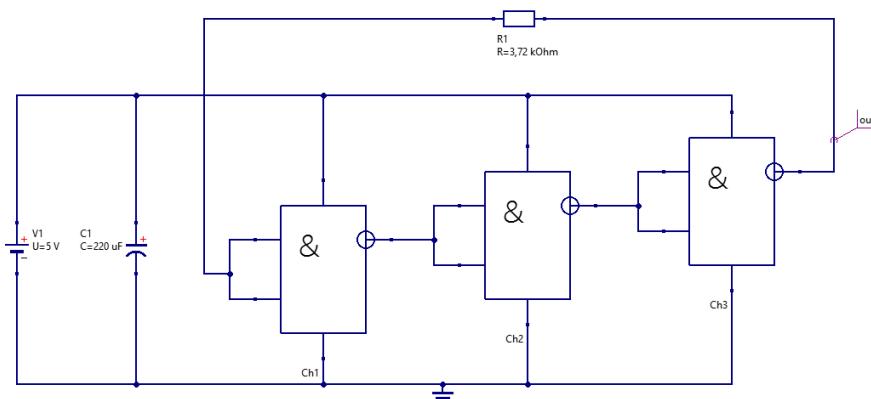


Рис. 1. Схема кольцевого генератора

Поскольку количество инверторов нечетное, сигнал, пройдя полный цикл, меняет свое первоначальное состояние, что приводит к непрерывным колебаниям. Частота генерации определяется временем задержки инверторов и их количеством. Исходя из этого кольцевой генератор может применяться для исследования задержек переключения у логических схем.

Так как для построения кольцевого генератора необходимо нечетное количество инверторов, то задействуются три канала K561ЛА7. Конденсатор C1 необходим для сглаживания входного напряжения. Сопротивление обратной связи составляет 3,72 кОм.

Оscиллограф, подключенный к цепи обратной связи, показал следующие выходные характеристики (рис. 2).



Рис. 2. Выходные характеристики кольцевого генератора при напряжении питания 5 В

Как видно из графика, задержка между переключениями составила 152 нс, что соответствует значениям из документации на микросхему K561ЛА7 (<160 нс). К данному значению необходимо приблизиться при виртуальном моделировании этой же схемы.

Виртуальное моделирование микросхемы CD4011. В состав K561ЛА7 (CD4011) входят PMOS и NMOS транзисторы. Их характеристики схожи с аналогичными транзисторами в составе CD4007, SPICE-модель которых можно найти в свободном доступе и которые выглядят следующим образом (в первых строках указаны характеристики MOSFET транзисторов):

*Note: L=10u W=170u Ad=8500p As=8500p Pd=440u Ps=440u NRD=0.1
NRS=0.1
.MODEL RIT4007N7

```
+NMOS (LEVEL=7 VERSION=3.1 CAPMOD=2 MOBMOD=1
+TOX=6E-8 XJ=2.9E-7 NCH=4E15 NSUB=5.33E15 XT=8.66E-8
+VTH0=1.4 U0= 925 WINT=2.0E-7 LINT=1E-7
+NGATE=5E20 RSH=200 JS=3.23E-8 JSW=3.23E-8 CJ=6.8E-8 MJ=0.5 PB=0.95
+CJSW=1.26E-10 MJSW=0.5 PBSW=0.95 PCLM=5
+CGSO=3.4E-10 CGDO=3.4E-10 CGBO=5.75E-10)
```

*Note: L=10u W=360u Ad=18000p As=18000p Pd=820u Ps=820u NRS=0.54
NRD=0.54

```
.MODEL RIT4007P7
+PMOS (LEVEL=7 VERSION=3.1 CAPMOD=2 MOBMOD=1
+TOX=6E-8 XJ=2.26E-7 NCH=3E15 NSUB=8E14 XT=8.66E-8
+VTH0=-1.65 U0= 225 WINT=1.0E-6 LINT=1E-6
+NGATE=5E20 RSH=800 JS=3.51E-8 JSW=3.51E-8 CJ=5.28E-8 MJ=0.5 PB=0.94
+CJSW=1.19E-10 MJSW=0.5 PBSW=0.94 PCLM=5
+CGSO=4.5E-10 CGDO=4.5E-10 CGBO=5.75E-10)
```

На их основе были разработаны собственные SPICE-модели транзисторов для CD4007, аналогичных K561ЛА7:

```
.MODEL NMOS_CD4007 NMOS ( LEVEL=3 VTO=1
+ VMAX=1E6 RS=10 RD=10 CJ=0.002 MJ=0.4
+ THETA=1E-6 ETA=0.01 KAPPA=2.2)
```

```
.MODEL PMOS_CD4007 PMOS ( LEVEL=3 VTO=-1
+ VMAX=1E6 RS=10 RD=10 CJ=0.002 MJ=0.4
+ THETA=1E-6 ETA=0.01 KAPPA=2.2)
```

Схема одного канала K561ЛА7 (CD4011) была взята из даташита и построена в среде программного обеспечения Qucs-S новейшей версии 25.1. Модели PMOS и NMOS транзисторов были собраны в библиотеку CD4007.lib и интегрированы в программу [2].

В результате моделирования кольцевого генератора задержка переключений составила ~0,6 мкс или 600 нс, что непорядок больше задержки, полученной с реальной схемы (рис. 3–5).

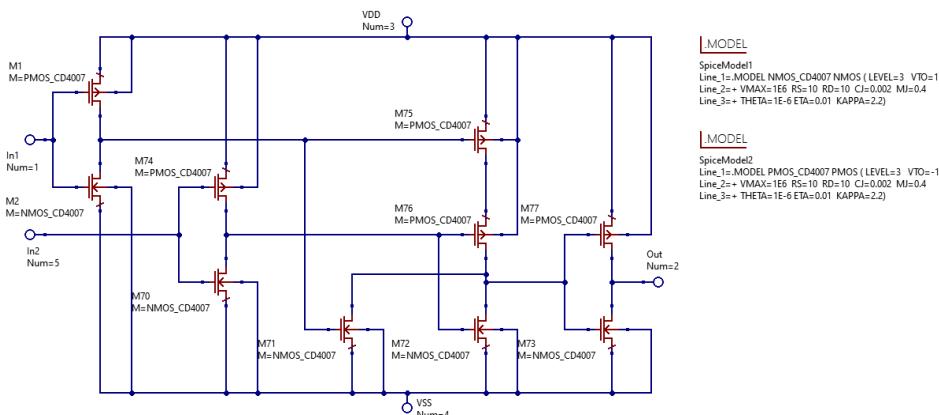


Рис. 3. Схема одного канала K561ЛА7 (CD4011)

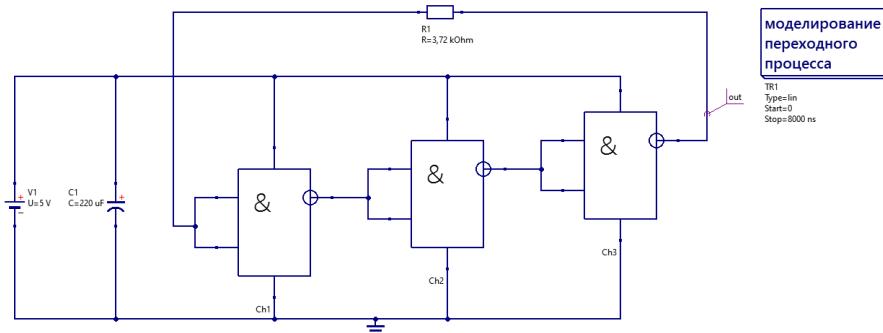


Рис. 4. Схема кольцевого генератора в Qucs-S

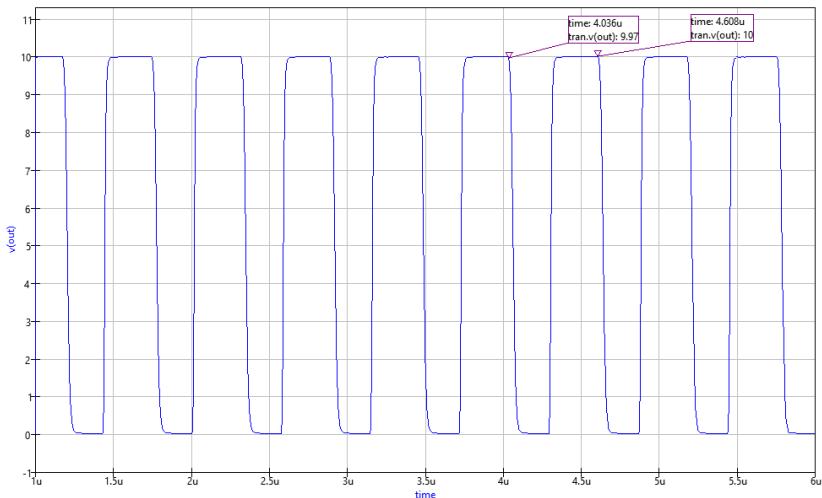


Рис. 5. Результаты моделирования

Заключение. Проведенное исследование показало возможность создания SPICE-моделей микросхем серии CD4000 на основе транзисторных структур, аналогичных K561ЛА7. Моделирование кольцевого генератора в среде Qucs-S выявило расхождение между виртуальными и реальными характеристиками, в частности задержка переключений составила 600 против 152 нс в эксперименте. Это указывает на необходимость дальнейшей доработки моделей для повышения их точности. Результаты работы подчеркивают важность учета реальных параметров компонентов при проектировании цифровых схем, особенно для задач, требующих высокой временной точности.

Литература

- [1] Бирюков С.А. *Цифровые устройства на МОП-интегральных микросхемах*. Москва, Радио и связь, 1990, 128 с.
- [2] *Quite Universal Circuit Simulator*. URL: <http://qucs.sourceforge.net> (дата обращения 15.02.2025).
- [3] Кузнецов В.В. Симулятор электронных схем с открытым исходным кодом Qucs: основные возможности и основы моделирования. *Компоненты и технологии*, 2015, № 3(164), с. 114–120.
- [4] *Reference manual. CD4011B, CD4012B, CD4023B Types CMOS NAND GATES*. Texas Instruments, 2003.
- [5] Чулков В.А. Кольцевые генераторы импульсов в цифровых преобразователях информации. *Известия вузов. Приборостроение*, 2019, т. 62, № 1, с. 5–22.

Verification of SPICE models of IC logic elements of the CD4000 series

Kuznetsov Vadim Vadimovich

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Alyokhin Artyom Vladimirovich

alyokhinav@student.bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The CD4000 series chips are still widely used in various fields of electronics. They are especially in demand if a simple, reliable and energy-efficient solution is needed. However, the Qucs-S software does not have integrated chip data models, which limits the simulation of logic circuits. The paper considers the development of a working SPICE model of the K561LA7 microcircuit (analog CD4011) based on data obtained by modeling the circuit of a ring generator on a breadboard. Discrepancies between the results of real and virtual modeling are noted, and the need for further model improvements is noted.

Keywords: *Qucs-s, simulation, SPICE model, microcircuit, ring oscillator, switching delay*

Секция 4. Термовые двигатели и гидромашины

УДК 621.175

Исследование влияния компоновки трубного пучка на эффективность теплообмена конденсатора на низкокипящем рабочем теле

Ганков Максим Сергеевич

gankovms@student.bmstu.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследовано влияние различных компоновочных схем трубных пучков кожухотрубного конденсатора пара низкокипящего рабочего тела — изопентана для теплоутилизационной установки. Представлены результаты расчетов для каждой из них, на основе которых сделан вывод о предпочтительной конструкции трубного пучка.

Ключевые слова конденсация, кожухотрубный конденсатор, низкокипящие рабочие тела, трубный пучок

Как известно, конденсация отработавшего в турбине пара является одним из основных способов повышения эффективности паротурбинных установок (ПТУ), а также уменьшения затрат на водоподготовку в целом, за счет отсутствия выброса рабочего тела в атмосферу [1]. При этом сами конденсаторы представляют собой теплообменные аппараты, в которых данный процесс происходит за счет непрерывного отвода теплоты от поступающего в него пара охлаждающей средой. Их эффективность во многом определяется коэффициентом теплопередачи, величина которого зависит от теплофизических свойств самих теплоносителей, их режима течения, а также термического сопротивления стенки. Стоит отметить, что при фиксированном среднелогарифмическом температурном напоре с увеличением коэффициента теплопередачи уменьшается величина необходимой теплообменной поверхности. По этой причине наибольшее распространение получили кожухотрубные конденсаторы, в которых в качестве охлаждающей среды используется вода, однако в местах, где доступ к ней затруднен, используются воздушные конденсаторы [2].

Немаловажным является то, что эффективность теплообмена с паровой стороны лимитируется термическим сопротивлением пленки конденсата, что приводит к необходимости применения различных решений по интенсификации теплообмена с наружной поверхности: профилирования трубок [3], использования высокоэффективных модулей [4], перехода к капельной конденсации [5] и др. Цель данной работы — исследование влияния компоновки трубного пучка на эффективность конденсации пара изопентана в кожухотрубном конденсаторе, проектируемого для теплоутилизационной паротурбинной установки. Рассматривались варианты двух- и четырехходовых конденсаторов с различным расположением ходов в конденсаторе, а также различным относительным периметром набегания пара \bar{f} на трубный пучок.

Проектные расчеты производились по классической методике расчета теплообменных аппаратов изложенной, например, в работе [1], при этом процесс конденсации считался для неподвижного пара на горизонтальном трубном пучке. На следующем этапе вводилась поправка, учитывающая влияние компоновки трубного пучка и скорости натекания пара на него по методике Калужского турбинного завода [2], при этом расчет имел итерационный характер, так как в процессе расчета возникала необходимость уточнения скорости движения пара. Для определения теплофизических свойства рабочих тел использовалась библиотека CoolProp для языка программирования Python [6]. В качестве исходных данных принимались значения, полученные в ходе расчета тепловой схемы теплоутилизационной паротурбинной установки, к которым относится расход рабочего тела $G_n = 4,2$ кг/с, температура насыщения пара $t_s = 32$ °C, температура пара на выходе из турбины $t_1 = 76,7$ °C, а также количество отводимой теплоты $Q = 1,77$ МВт. Также принималось, что пар конденсируется на латунных трубках с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 105$ Вт/м·°C с наружным диаметром $d_n = 0,02$ м и внутренним $d_{bh} = 0,018$ м. При этом принималось, что в трубки подается охлаждающая вода с начальной температурой $t_2 = 15$ °C и ее нагрев составляет $\Delta t_2 = 5$ °C, полученными из предварительных проработок. Скорость движения воды в трубках принималась $c = 1,5$ м/с.

Всего в работе было рассмотрено пять вариантов компоновок трубных пучков:

- цилиндрический двухходовой с $\bar{f} = 0,0042$;
- цилиндрический двухходовой с $\bar{f} = 0,02$;
- цилиндрический четырехходовой с $\bar{f} = 0,0042$;
- сужающийся противоточный четырехходовой с $\bar{f} = 0,0042$ (см. рисунок, *a*);
- квадратный противоточный четырехходовой с $\bar{f} = 0,0063$ (см. рисунок, *б*).

Результаты произведенных расчетов конденсаторов с вышеприведенными компоновками представлены в таблице.

Из таблицы видно, что двухходовые схемы имеют низкие коэффициенты теплоотдачи по пару и большие длины трубок, при этом пучок с увеличенным периметром набегания в такой схеме проигрывает пучку с небольшим значением данного параметра. Сравнивая варианты (1) и (3), можно заметить, что только переход к четырехходовой схеме способствует увеличению теплопередачи на 27 % и уменьшению длины трубок примерно в 2,5 раза. Однако схема (3) имеет недостаток в виде неравномерности распределения температур воды по радиусу, что привело к схеме (4). Схема (4) имеет наиболее целесообразную сужающуюся компоновку, что объясняется уменьшением объема пара по мере конденсации, однако трапециевидная форма является технологически сложной, что усложняет конструкцию и изготовление данного конденсатора, что привело к компромиссу в виде схемы (5). Последний представленный вариант имеет несколько меньшую эффективность теплооб-

мена, однако весьма простую форму трубной доски. Также за счет увеличения периметра набегания удалось несколько уменьшить глубину трубного пучка, что должно уменьшить его гидравлическое сопротивление.

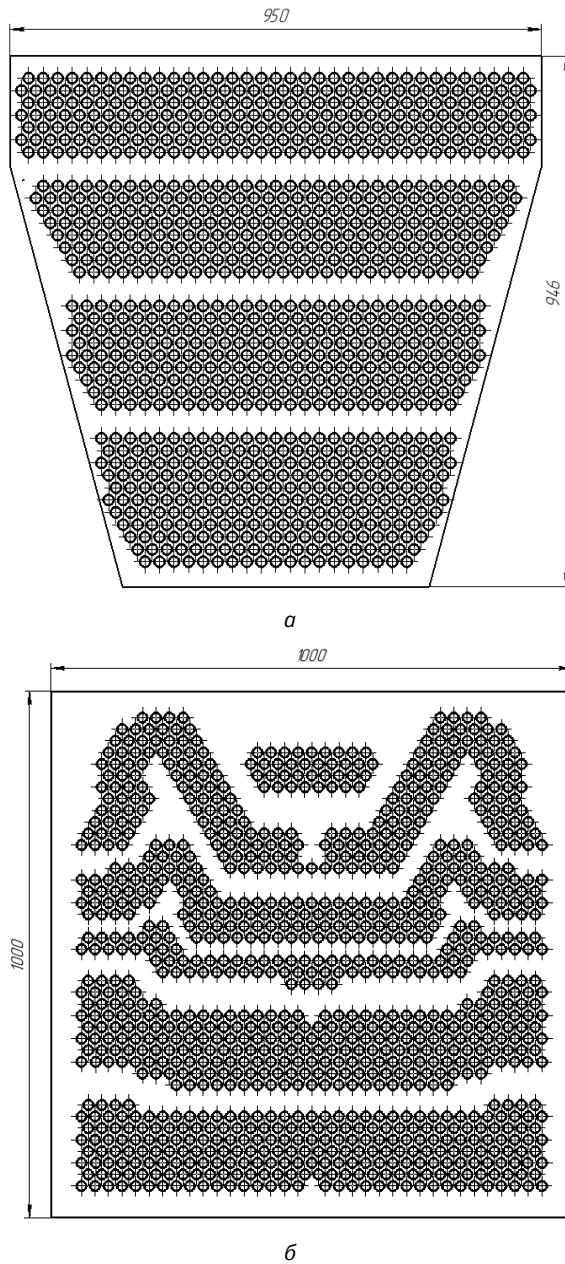


Рис. 1. Схемы вариантов пучков (4) и (5):
а — вариант (4); б — вариант (5)

Результаты расчетов

№ варианта	1	2	3	4	5
\bar{f}	0,0042	0,02	0,0042	0,0042	0,0063
Число ходов, штук	2	2	4	4	4
Коэффициент теплоотдачи воды, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	5675,2	5665,0	5708,6	5708,6	5688,6
Скорость набегания пара, м/с	2,98	0,54	7,57	7,57	2,20
Коэффициент теплоотдачи пара, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	1458,61	1305,05	2029,26	2029,26	1674,23
Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	22,02	20,21	28,00	28,00	24,40
Длина трубного пучка, м	3,58	3,90	1,41	1,41	1,61
Суммарное число трубок, штук	498	498	996	996	996

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что при проектировании конденсаторов для изопентана целесообразным является переход к четырехходовым схемам с небольшими относительными периметрами набегания пара на пучок. Также наиболее эффективным является использование сужающихся трубных пучков, или же квадратных с противоточной схемой.

Литература

- [1] Бродов Ю.М. *Теплообменники энергетических установок*. Екатеринбург, «Сократ», 2003, 965 с.
- [2] Федоров В.А., Мильман О.О. *Конденсаторы паротурбинных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 558 с.
- [3] Лебедев О.О. *Трубный пучок конденсатора пара*. Патент 2725738 РФ, 2020, бюл. № 19, 18 с.
- [4] Бродов Ю.М., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю. *Современная ситуация и тенденции в проектировании и эксплуатации конденсаторов мощных паровых турбин ТЭС и АЭС*. Екатеринбург, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019, 104 с.
- [5] Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В. Исследование смачивания и конденсации на горизонтальной трубе с покрытием. *Тепловые процессы в технике*, 2023, т. 15, № 2, с. 72–78. <https://doi.org/10.34759/tpt-2023-15-2-72-78>
- [6] CoolProp. URL: <http://www.coolprop.org> (дата обращения 28.02.2025).

Investigation of the effect of the tube bundle configuration on the efficiency of heat transfer in a condenser with a low-boiling liquid

Gankov Maksim Sergeevich

gankovms@student.bmstu.ru

Ilyichev Vladimir Yurievich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The effect of various arrangement schemes of tube bundles of a shell-and-tube steam condenser with a low-boiling working fluid, isopentane, on a heat recovery unit is investigated. The results of calculations for each of them are presented, on the basis of which a conclusion is drawn about the preferred design of the tube bundle.

Keywords: condensation, shell-and-tube condenser, low-boiling working fluids, tube bundle

УДК 621.165

Использование технологии CFD для моделирования течений в лопаточных решетках турбин

Жариков Артем Андреевич

artemzhrk@gmail.com

Шевелев Денис Владимирович

denis.v.shevelev@bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена важность поступенчатого расчета ступени турбины по средней линии тока. Особое внимание уделено определению коэффициентов потерь кинетической энергии в лопаточных решетках, в частности профильных потерь. Для верификации полуэмпирических методик расчета потерь могут быть использованы методы численного моделирования, таких как пакеты CFD, включая FlowVision, FlowEFD и STAR-CCM. Описан процесс моделирования аэродинамических характеристик турбинной решетки на основе профиля C-9015A с применением указанных программных пакетов. В результате проведенных расчетов, на основе численного эксперимента, получены данные о коэффициентах потерь кинетической энергии и скорости истечения, которые были сравнены с результатами натурного эксперимента.

Ключевые слова: турбина, проточная часть, термогазодинамический расчет ступени, потери кинетической энергии, профильные потери, численное моделирование

Поступенчатый расчет по средней линии тока является начальным и одним из важнейших этапов процесса проектирования турбины. На данном этапе, в ходе последовательных расчетов отдельных ступеней, определяются и анализируются их основные кинематические, термодинамические, геометрические, кинематические и мощностные параметры. Достоверность расчетных характеристик осевой ступени турбины в значительной степени зависит от правильно определенных коэффициентов потерь кинетической энергии в лопаточных решетках, в частности профильных потерь.

Давно известны и используются при определении коэффициентов потерь кинетической энергии зависимости, обобщающие результаты экспериментальных данных продувок плоских решеток [1–3]. Использование характеристик, полученных при натурных исследованиях, является наиболее достоверным методом определения потерь, однако количество исследованных лопаток ограничено и не позволяет покрыть все возникающие в ходе расчетов комбинации геометрических характеристик лопаточных решеток.

В связи с этим, является актуальной задача верификации полуэмпирических методик расчета потерь по ключевым геометрическим характеристикам решеток — углов входа и выхода потока, степени конфузорности решеток, толщин выходных кромок, шага решетки и пр. [4–7].

Исследование аэродинамических характеристик решеток профилей при помощи методов численного эксперимента — один из возможных способов

верификации таких методик. В настоящее время, существует большое количество пакетов программ, позволяющих проводить численное моделирование газодинамических процессов, например: FlowVision [8], Ansys [9], STAR CCM+ [10], FloEFD [11] и др. В основе всех этих программ лежит численное решение уравнений движения вязкой жидкости (уравнений Навье — Стокса), дополненных вспомогательными уравнениями сохранения энергии и массы, а также граничными условиями.

Цель данной работы — верификация расчета профильных потерь лопаточной решетки на основе профиля С-9015А при помощи CFD пакетов FlowVision, FloEFD и Star-CCM. Аэродинамические характеристики турбинных решеток на основе данного профиля были получены в ходе натурного эксперимента и приведены в [1] в виде зависимости коэффициента потерь кинетической энергии от числа Маха — $\zeta = f(Re)$ для решеток бесконечной высоты.

По данным [1] была построена модель лопаточной решетки, геометрические характеристики которой приведены на рис. 1.

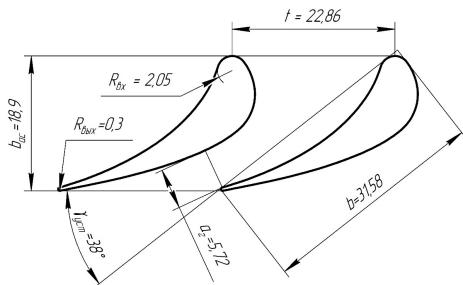


Рис. 1. Геометрические характеристики лопаточной решетки на базе профиля С-9015А

Расчетная модель имеет периодичность относительно шага решетки, поэтому расчетная модель была упрощена. Моделировалось течение в отдельных межлопаточных каналах при двумерной постановке расчетной задачи. Границные условия приведены на рис. 2.

В качестве граничного условия входа, задавались полные параметры потока на входе в решетку — полное давление рабочего тела (водяного пара) $p_0^* = 1$ МПа, $t_0^* = 320$ °C. Для граничного условия выхода из лопаточной решетки задавался ряд статических давлений, определяющий располагаемый теплоперепад на решетку для получения необходимого диапазона чисел M_{lt} . На поверхности лопатки задавалась шероховатость, соответствующая 9 классу чистоты поверхности. Используемая модель турбулентности во всех использованных программах принималась одинаковой — $k-\epsilon$. «Тонкие» настройки расчетных моделей во всех программных пакетах были оставлены «по умолчанию».

В связи с особенностями задания граничных условий и построения сетки для FlowEFD моделировалось течение в трех межлопаточных каналах, для

STAR-CCM и Flow Vision — в одном межлопаточном канале. Базовая расчетная сетка дополнительно детализировалась по поверхности обтекаемого профиля. Характеристики сетки приведены в табл. 1.

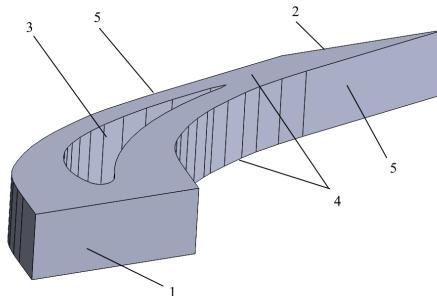


Рис. 2. Границные условия, накладываемые на расчетную модель:

1 — вход; 2 — выход; 3 — стенка; 4 — симметрия; 5 — периодичность

Характеристики расчетных сеток

CFD-пакет	Количество ячеек базовой сетки	Общее количество ячеек	Количество ячеек на один межлопаточный канал
Flow Vision	33120	225798	225798
FlowEFD	38400	3033202	758300
Star-CCM	788469	788469	788469

В качестве результатов расчета определялись и анализировались следующие параметры:

– коэффициент скорости лопаточной решетки:

$$\phi = \frac{c_1}{c_{1t}};$$

– коэффициент потерь кинетической энергии:

$$\zeta = 1 - \phi^2.$$

Теоретическая скорость истечения из лопаточной решетки c_{1t} определялась отдельно с помощью [12], как

$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0^*(p_0^*, t_0^*) - h_1(p_1, s_0))}.$$

Расчетные параметры потока p_1^* и c_1 определялись по выходному сечению расчетной области осреднением по расходу.

Результаты расчета для режима истечения, соответствующему $M_{1t} = 0,7$ приведены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты расчета

CFD-пакет	Φ	ζ	$\delta, \%$
Flow Vision	0,9906	0,01853	1,3
FlowEFD	0,98962	0,020645	12
Star-CCM	0,98514	0,029481	61
Атлас профилей [1]	0,9908	0,01829	0

График расчетных зависимостей $\zeta = f(Re(\cdot))$, полученные с помощью вышеуказанных CFD-пакетов программ и сравнение с результатами натурного эксперимента приведены на рис. 3/

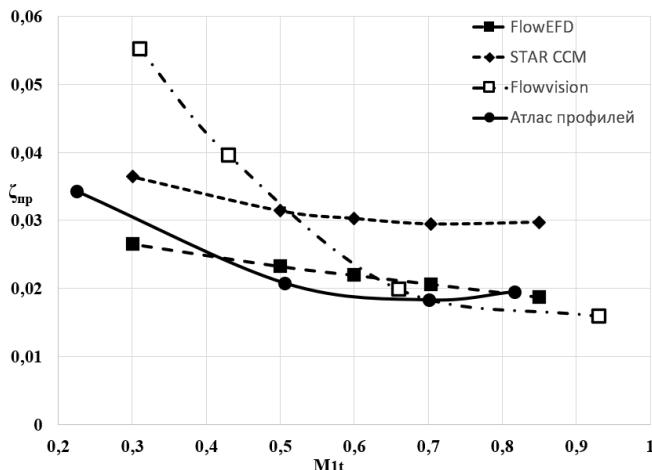


Рис. 3. График зависимости коэффициентов потерь от числа Маха для профиля CA-9015

Заключение. На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что характер кривых, описывающих результаты расчета в программных пакетах (рис. 2) схож с характеристикой, отображающей результаты натурного эксперимента.

Однако ни один программный пакет не смог обеспечить удовлетворительное соответствие результатов расчета данным натурного эксперимента. Лучшие результаты показал CFD-пакет FlowEFD. Следует отметить, что данная программа рассчитана на расчетчиков относительно низкой квалификации и имеет минимум пользовательских настроек расчетных моделей, расчет производится по аддитивным алгоритмам выбора методик расчета пограничного слоя, скрытым от пользователя.

FlowVision и Star-CCM имеют гораздо большие возможности по настройке квалифицированным пользователем, однако в режиме настроек «по умолчанию», минимальная погрешность расчета получена лишь при

больших числах Маха и, соответственно, числах Рейнольдса. Вероятно, большая детализация расчетной сетки и обоснованный выбор модели турбулентности позволит улучшить соответствие результатов расчета данным натурного эксперимента.

Литература

- [1] Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. *Атлас профилей решеток осевых турбин*. Москва, Машиностроение, 1965.
- [2] Дорфман Л.А. Исследование натурных ступеней паровых турбин с полным и парциальным подводом. *Энергомашиностроение*, 1956, № 10, с. 18–20.
- [3] Бусурин В.Н., Гоголев И.Г. *Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин*. Ленинград, Машиностроение, 1980, 263 с.
- [4] Гольцов В.В., Кадетов А.П. Обобщение экспериментальных зависимостей для определения коэффициентов профильных потерь в турбинных решетках. *Тр. ЦИАМ*, 1977, № 786, с. 1–3.
- [5] Дронник Ю.М. Анализ методов расчета профильных потерь в турбинных решетках. *Энергетическое машиностроение*, 1982, вып. 34, с. 9–14.
- [6] Зысина-Моложен Л.М. *Приближенный метод расчета профильных потерь в решетках*. Москва, Энергия, 1960, с. 48–87.
- [7] Шубенко-Шубин Л.А., Стоянов Ф.А. Об оценке профильных потерь в турбинной решетке, обтекаемой нестационарным потоком. *Энергомашиностроение*, 1972, № 1, с. 24–28.
- [8] *Официальный сайт FlowVision*. URL: <https://flowvision.ru/ru> (дата обращения 31.03.2025).
- [9] *Официальный сайт Ansys*. URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения 31.03.2025).
- [10] *Официальный сайт Siemens Star-CCM*. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/star-ccm/> (дата обращения 31.03.2025).
- [11] *Официальный сайт Siemens FloeEFD*. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/floefd/> (дата обращения 31.03.2025).
- [12] *Официальный сайт Coolprop*. URL: <http://www.coolprop.org/> (дата обращения 31.03.2025).

Using CFD technology to simulate flows in turbine blade arrays

Zharikov Artem Andreevich

artemzhrk@gmail.com

Shevelev Denis Vladimirovich

denis.v.shevelev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The importance of stepwise calculation of the turbine stage along the midline is considered. Special attention is paid to the determination of kinetic energy loss coefficients in blade arrays, in particular profile losses. Numerical modeling methods such as CFD package, including FlowVision, FlowEFD, and STAR-CCM, can be used to verify semi-empirical loss calculation methods. The process of modeling the aerodynamic characteristics of a turbine array based on the C-9015A profile using these software packages is described. As a result of the calculations, based on a numerical experiment, data on kinetic energy loss coefficients and flow rate were obtained, which were compared with the results of a field experiment.

Keywords: *turbine, flow part, thermogasodynamic calculation of the stage, kinetic energy losses, profile losses, numerical modeling*

УДК 536.24

Численное исследование теплогидравлических характеристик трубного пучка сухой вентиляторной градирни

Кашанов Никита Андреевич nkashanov@gmail.com
Жинов Андрей Александрович azhinov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено влияние скорости воздушного потока и температуры стенки трубок на коэффициент теплоотдачи и потери давления при обтекании оребренного трубного пучка сухой вентиляторной градирни. Проведено численное исследование теплообменных и аэродинамических характеристик трубного пучка на различных режимах и сопоставление результатов с аналитическим расчетом. В исследованном диапазоне режимов определен коэффициент теплоотдачи, выявлено незначительное влияние температуры охлаждаемой воды на этот коэффициент. Сделаны выводы, полезные для инженерного расчета и оптимизации конструкции воздухоохлаждаемых теплообменников.

Ключевые слова: CFD, трубный пучок, численное моделирование, потери давления, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, воздушный поток

Воздухоохлаждаемые теплообменные аппараты находят все большее применение в энергетике и промышленности [1, 2]. Это воздушные конденсаторы пара, сухие градирни, различные чиллеры, системы кондиционирования и т. п. Совершенствование и оптимизация их конструкции позволяет достичь баланса между эффективностью теплообмена и энергозатратами. Однако не всегда известны достоверные теплогидравлические характеристики оребренных трубных систем таких теплообменников в широком диапазоне режимов их работы, особенно при условии взаимного влияния теплообмена и газодинамики [3]. В настоящее время получение таких характеристик возможно численными методами [4]. Использование программных пакетов CFD исключает, или существенно сокращает, объемы натурных испытаний, позволяет выявить закономерности тепловых и гидравлических характеристик, а также повышает точность инженерных расчетов, однако полученные результаты требует верификации [5, 6].

Цель работы — исследование влияния скорости воздушного потока и температуры стенок трубок на коэффициент теплоотдачи воздуха к оребренной поверхности трубного пучка при различных температурах внутренних поверхностей трубок, а также на потери давления при обтекании рассмотренного трубного пучка.

Объектом численного исследования являлась модель семирядного трубного пучка с шахматной компоновкой теплообменного модуля сухой вентиляторной градирни. Геометрические размеры модели трубного пучка пред-

ставлены на рис. 1. Оребрение выполнено из алюминиевого сплава АЛ3, стенка трубок — из стали 20.

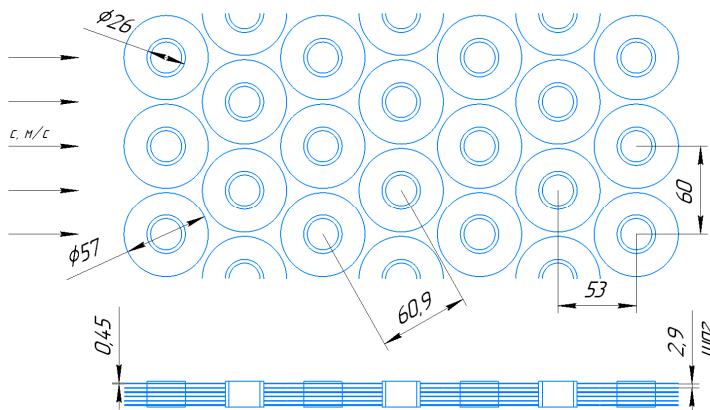


Рис. 1. Геометрические характеристики исследуемого трубного пучка

Расчетная область строилась с учетом граничных условий симметрии по боковым и верхней/нижней плоскостям модели. На входе задавалась скорость воздушного потока в диапазоне от 0,5 до 4 м/с, температура воздуха — 15 °C. Статическое давление воздуха на выходе принималось атмосферным — 101 325 Па. Температура внутренних поверхностей трубок задавалась равной 25, 30,5 и 36 °C.

В качестве целевых параметров при CFD моделировании использовалась глобальная цель: средний коэффициент теплоотдачи от воздуха ко всей теплообменной поверхности трубного пучка; поверхностные цели: давление воздуха на входной и выходной плоскостях; температура воздуха на выходе из расчетной области.

Для одного из расчетных режимов (скорость воздуха — 4 м/с, температура стенки — 30,5 °C) дополнительно был выполнен аналитический расчет коэффициента теплоотдачи по методике, изложенной в работе [1]. Аналитически полученное значение составило $\alpha = 31,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что соответствует результатам CFD-моделирования, где средний коэффициент теплоотдачи для трубного пучка составил $26,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Небольшая разница между значениями может объясняться тем, что аналитический расчет не учитывает неоднородность обтекания трубок, влияние теневых зон, а также локальные эффекты распределения температуры и скорости [3]. В целом расчеты демонстрируют хорошее совпадение, однако дополнительная верификация натурными экспериментами позволит уточнить результаты.

На рис. 2 приведена полученная зависимость коэффициента теплоотдачи к оребренной поверхности от скорости воздушного потока при различных температурах внутренних стенок трубок.

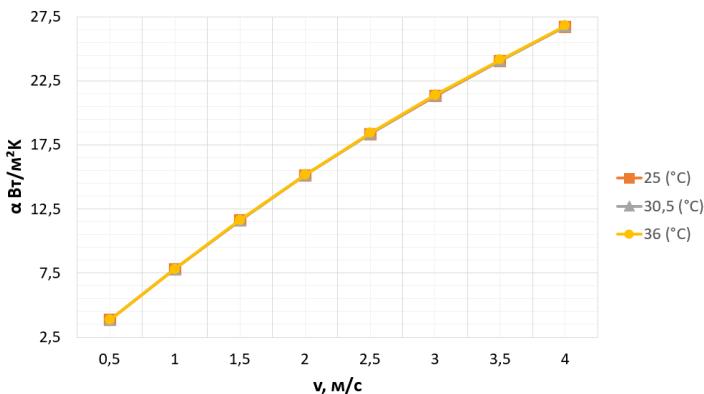


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздушного потока для различных температур внутренних стенок трубок

По результатам моделирования потеря давления на трубном пучке для режима ($c = 4$ м/с, $t_{cr} = 30,5^{\circ}\text{C}$), например, составила $\Delta p = 184,5$ Па. На рис. 3 показаны зависимости потерь давления на трубном пучке от скорости воздушного потока при различных температурах внутренних стенок трубок.

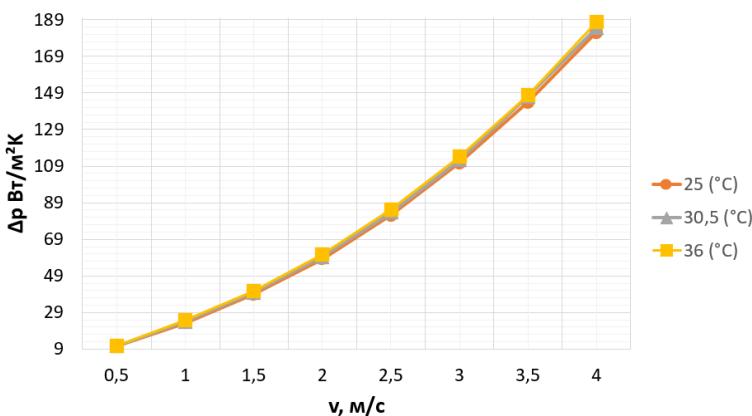


Рис. 3. Зависимость потерь давления от скорости воздушного потока для различных температур внутренних стенок трубок

Как видно из полученных результатов (рис. 2 и 3), для рассмотренных режимов работы трубного пучка влияние температуры стенок трубок на коэффициент теплоотдачи крайне незначительно и им можно пренебречь. Влияние температуры трубок на гидравлические потери в пучке ощущимы только при высоких скоростях воздуха и для рассмотренных режимов также малы.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки аэродинамических сопротивлений оребренных трубных пучков воздухоохлаждаемых

теплообменников и проведения качественного анализа распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности теплообмена. Предложенная методика позволяет также определить средний коэффициент теплоотдачи оребренных трубных пучков с учетом влияния нагрева охлаждающего воздуха и изменения его свойств. Полученные результаты могут быть использованы на этапах проектирования воздухоохлаждаемых теплообменников, а также при сравнении различных конструктивных решений и уточнении инженерных расчетных методик.

Литература

- [1] Мильман О.О., Федоров В.А. *Воздушно-конденсационные установки*. Москва, Издательство МЭИ, 2002, 208 с.
- [2] Федоров В.А., Мильман О.О., Жинов А.А. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в циркитрассах воздушных конденсаторов паротурбинных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*, 2015, № 5(104), с. 87–105.
- [3] Шевелев Д.В., Жинов А.А., Юрик Е.А. Использование технологии CFD для моделирования конвективного теплообмена при поперечном обтекании цилиндра. *Электронный журнал: наука, техника и образование*, 2023, № 4(44), с. 11–20.
- [4] Жинов А.А., Шевелев Д.В., Ананьев П.А. Моделирование потерь давления воздуха в оребренном трубном пучке воздушного конденсатора. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 3, с. 105–116.
- [5] Станков С.А., Потапов Д.В. Влияние выбора граничных условий на результаты расчета пристеночных течений. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2014, № 6–3, с. 102–106.
- [6] Михеев М.А. Расчетные формулы конвективного теплообмена. *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*, 1966, № 5, с. 96–105.

Numerical study of thermal-hydraulic characteristics of a tube bundle of a dry fan cooling tower

Kashanov Nikita Andreevich

nkashanov@gmail.com

Zhinov Andrey Aleksandrovich

azhinov@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The influence of air flow velocity and tube wall temperature on the heat transfer coefficient and pressure loss during flow around a finned tube bundle of a dry fan cooling tower is considered. A numerical study of heat exchange and aerodynamic characteristics of the tube bundle in various modes and a comparison of the results with an analytical calculation is carried out. In the studied range of modes, the heat transfer coefficient is determined, an insignificant effect of the cooled water temperature on this coefficient is revealed. Conclusions are made that are useful for engineering calculations and optimization of the design of air-cooled heat exchangers.

Keywords: CFD, tube bundle, numerical simulation, pressure loss, heat transfer, heat transfer coefficient, air flow

УДК 62-621.2

Обзор и анализ методик расчета термодинамических свойств природного газа

Резчиков Владислав Русланович

vladislavrezcikov2011@gmail.com

Шевелев Денис Владимирович

denis.v.shevelev@bmstu.ru

СПИН-код: 2076-0373

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены основные термодинамические характеристики газа и методики расчета термодинамических свойств природного газа, а также условия их применения. Особое внимание уделено методикам расчета по уравнениям состояния с использование таблиц или корреляций и с помощью программных пакетов. Представлены преимущества и недостатки разных методик расчета термодинамических свойств природного газа.

Ключевые слова: термодинамические свойства газа, методика расчета, газовая промышленность, природный газ

Газовая промышленность является одной из самых развитых областей производства страны, включающим в себя газовые месторождения, подземные хранилища и магистральные газопроводы, использующие турбоустановки для своей работы. Нагнетатели и детандеры, являющиеся одними из распространенных турбоустановок отрасли, используют в качестве рабочего тела природный газ. Большая часть состава природного газа — это метан (CH_4), кроме него в его составе также могут присутствовать: этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), диоксид углерода (CO_2), азот (N_2), сероводород (H_2S) и некоторые другие примеси. Его многокомпонентный состав усложняет определение термодинамических свойств газа и требует расчетов или испытаний. Знание свойств газа позволяет улучшить эффективность энергетических установок, снизить затраты на транспортировку и хранение, повысить безопасность эксплуатации и минимизировать воздействие на окружающую среду. Цель данной работы заключается в исследовании и анализе методик расчета термодинамических свойств природного газа. Это важно для любой отрасли, связанной с газом: от нефтегазовой промышленности до теплоэнергетики и машиностроения.

Термодинамические свойства зависят от состава, температуры, давления и условий эксплуатации. Известны несколько методик, которые применяют для определения свойств [1–5]:

- уравнения состояния идеального газа;
- уравнения состояния реального газа;
- табличные данные и эмпирические корреляции;
- численные методы и программные пакеты.

Выбор методики расчета термодинамических свойств природного газа зависит от условий и требуемой точности:

- при низких давлениях: уравнение идеального газа;
- при средних давлениях (до 10–15 МПа): вириальное уравнение, корреляции для Z-фактора;
- при высоких давлениях: уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, Редлиха — Квонга, Пэнга — Робинсона;
- для точных инженерных расчетов: используются экспериментальные данные, таблицы, программные пакеты.

Методика определения с помощью уравнение состояния идеального газа включает себя использование следующего уравнения [2]:

$$pv = RT.$$

С помощью следующих формул можно определить все необходимые термодинамические свойства для идеального газа.

$$\begin{aligned} \mu_{\text{см}} &= \sum r_i \mu_i \Rightarrow R_{\text{r0}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} \Rightarrow \rho = \frac{P}{RT} \Rightarrow g_i = \frac{\mu_i}{\mu_{\text{см}}} r_i \Rightarrow \\ &\Rightarrow c_{p,\text{см}} = \sum g_i c_{pi} \Rightarrow c_v = c_p - R; \\ h &= c_p T; S = S_0 + c_v \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0}. \end{aligned}$$

Методика определения с помощью уравнение состояния реального газа включает себя использование одного из следующих уравнений [1–2]:

– Ван — дер — Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT;$$

– Вириала:

$$pV = RT \left(1 - \sum_{i=1} \frac{v}{v+1} \cdot \frac{B_i}{v^i} \right);$$

– Редлиха — Квонга:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{T^{0.5}V(V+b)}.$$

После выбора уравнения состояния определяем термодинамические параметры газа по методике. Примером такой методики может быть ГОСТ 30319.3-96. Стандарт использует уравнение состояния ВНИЦ СМВ:

$$z = 1 + \sum_{k=1}^r \sum_{l=0}^{S_k} \frac{c_{kl} \rho_{\text{п}}^k}{T_{\text{п}}^l}.$$

Условием применения данной методики является знание параметров, такие как критическая температура, критическое давление, молярная масса для каждого компонента газа. Сложность этого способа возникает из необходимости рассчитывать несколько безразмерных комплексов.

Использование метода с использованием таблиц и эмпирических корреляции заключается в нахождение термодинамических свойств по известному составу газа, давлению и температуре для каждого элемента, и затем применить правило смешения. Данные для этих таблиц получены с помощью уравнений состояний или экспериментов. Примером такой таблицы может быть ГССД 160–93, с помощью которой по температуре и давлению можно определить термодинамические свойства природного газа. Недостатком такого метода является ограниченность конкретными значениями P и T и погрешность интерполяции.

Для сложных расчетов термодинамических свойств природного газа используют специализированные программные комплексы. Программы для инженерных расчетов:

– CoolProp [3] — это библиотека для термодинамических расчетов, предназначенная для использования в области теплотехники и холодильной техники. Почти все моделирование жидкостей в CoolProp основано на формулировках энергии Гельмгольца. Это удобная конструкция уравнения состояния, поскольку все интересующие термодинамические свойства могут быть получены непосредственно из частных производных энергии Гельмгольца. Для веществ, у которых нет полных экспериментальных данных, CoolProp использует интерполяцию и экстраполяцию на основе известных данных;

– REFPROP (NIST) [4] — стандарт в нефтегазовой отрасли для точного моделирования. С его помощью можно рассчитать термодинамические свойства (давление, температура, плотность, энталпия, энтропия и др.) газа. Кроме того, можно провести расчет транспортных свойств (вязкость, теплопроводность, поверхностное натяжение), проанализировать фазовые диаграммы (например, определение точек кипения, конденсации, критических точек);

– Aspen HYSYS [5] — это мощное программное обеспечение для моделирования химико-технологических процессов, разработанное компанией AspenTech. Оно широко используется в нефтегазовой, химической и энергетической отраслях для проектирования, оптимизации и анализа промышленных процессов. Aspen HYSYS позволяет инженерам и технологам создавать точные модели процессов, проводить расчеты материальных и энергетических балансов, а также оценивать экономическую эффективность проектов.

Таким образом, каждая методика имеет свои плюсы и минусы. Уравнение состояния идеального газа позволяет без сложностей рассчитать параметры природного газа при низком давлении, но при большом давлении или низких температурах приобретает большие погрешности расчета. Уравнение состояния реального газа уже не так просто рассчитывается, но дает точные параметры газа в большем диапазоне давления и температур. Сложность проявляется в необходимости нахождения дополнительных параметров для каждого компонента природного газа. Метод использования таблиц и корреляции позволяет без сложных расчетов найти термодинамические параметры,

зная критические параметры для компонентов. Погрешность интерполяции и нестандартность состава газа уменьшают точность такого расчета. В отличие от других способов расчета, методика с использованием программных пакетов дает самый точный результат расчета при любых параметрах газа.

Литература

- [1] Смирнова Н.А. *Методы статистической термодинамики в физической химии*. Москва, Высшая школа, 1982, 455 с.
- [2] Вукалович М.П., Новиков И.И. *Термодинамика*. Москва, Машиностроение, 1972, 672 с.
- [3] *Официальный сайт CoolProp*. URL: <http://www.coolprop.org/> (дата обращения 31.03.2025).
- [4] *Официальный сайт REFPROP*. URL: <https://www.nist.gov/srd/refprop> (дата обращения 31.03.2025).
- [5] *Официальный сайт AspenTech*. URL: <https://www.aspentechn.com/> (дата обращения 31.03.2025).

Review and analysis of methods for calculating the thermodynamic properties of natural gas

Rezchikov Vladislav Ruslanovich

vladislavrezcikov2011@gmail.com

Shevelev Denis Vladimirovich

denis.v.shevelev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The main thermodynamic characteristics of gas and methods for calculating the thermodynamic properties of natural gas, as well as the conditions for their application, are considered. Particular attention is paid to methods for calculating by equations of state, using tables or correlations and using software packages. The advantages and disadvantages of different methods for calculating the thermodynamic properties of natural gas are presented.

Keywords: *thermodynamic properties of gas, calculation method, gas industry, natural gas*

УДК 621.565.93/.95

Влияние высоты вытяжной шахты на эффективность теплообмена при естественной конвекции в многорядных пучках труб

Петрушин Кирилл Александрович petrushin9ka@mail.ru

Ильичев Владимир Юрьевич patrol8@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследовано влияние высоты вытяжной шахты на эффективность естественно-конвективного теплообмена в четырехрядном шахматном пучке биметаллических оребренных труб теплообменного аппарата системы аварийного расхолаживания. Методом численного моделирования в ANSYS CFX выявлено, что при некоторой оптимальной высоте шахты обеспечивается максимальный коэффициент теплопередачи за счет баланса между движущей силой естественной конвекции и минимизацией рециркуляционных потерь. Выявлено, что излишнее увеличение высоты шахты приводит к развитию вихревых зон, снижающих эффективность. Результаты важны для проектирования энергонезависимых систем охлаждения в энергетике и промышленности.

Ключевые слова: теплообменник, конвекция, вытяжная шахта, коэффициент теплопередачи, воздушное охлаждение

Естественная конвекция представляет собой перспективную альтернативу принудительному теплообмену, поскольку не требует применения дополнительного оборудования, такого как вентиляторы или воздуходувки. Это значительно упрощает конструкцию системы, повышает ее надежность, снижает энергопотребление и минимизирует уровень шума, что особенно важно в бытовых, медицинских и электронных устройствах, где важны тишина и энергоэффективность [1].

Естественная конвекция играет особо важную роль в аварийных системах теплообмена, где существует риск возникновения блэкаута — полного прекращения электроснабжения и, как следствие, отказа принудительных систем охлаждения. В таких критически важных объектах, как атомные электростанции, химические производства или системы охлаждения серверных ферм, шахтные теплообменники с естественной конвекцией становятся последней линией защиты от перегрева оборудования. Их принципиальное преимущество заключается в полной энергонезависимости — для работы таких систем не требуется ни электричество, ни механические движущиеся части, что делает их исключительно надежными в аварийных ситуациях [2, 3].

Однако основной недостаток свободной конвекции — сравнительно низкий коэффициент теплопередачи, что ограничивает ее применение в высокопроизводительных системах. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на интенсификацию теплообмена в условиях естественной конвекции. Особый интерес представляет влияние геометрических параметров вытяжных шахт на эффективность теплообмена.

В данной работе основное внимание уделяется изучению зависимости интенсивности теплопередачи от высоты вытяжной шахты теплообменника, поскольку именно этот параметр является определяющим фактором в формировании движущей силы естественной конвекции — перепада давления.

Как показывают теоретические предпосылки, с увеличением высоты вытяжной шахты возрастает архимедова сила, обеспечивающая циркуляцию воздушного потока, однако одновременно могут проявляться и негативные эффекты, связанные с увеличением гидравлического сопротивления и возможным нарушением устойчивости течения.

В качестве объекта исследования рассматривается конкретный теплообменный аппарат системы аварийного расхолаживания реактора, состоящий из четырехрядного шахматного пучка труб. Важной особенностью является расположение пучка под углом 60° относительно горизонтальной плоскости.

Теплообменные трубы имеют следующие геометрические характеристики: наружный диаметр по основанию составляет $d_o = 26$ мм; диаметр по оребрению $d_h = 57$ мм. Ребра расположены с шагом $S = 3,24$ мм, их высота равна $h = 15,5$ мм при толщине $\Delta = 0,27$ мм. Длина каждой трубы составляет $l = 2,5$ м. Компоновка пучка характеризуется поперечным шагом $S_1 = 58$ мм и продольным шагом $S_2 = 50$ мм. Коэффициент оребрения равен $\phi = 16$.

Для исследования течения воздуха в вытяжной шахте данного теплообменного аппарата произведены расчеты в пакете численного моделирования Ansys CFX [4] для трех различных конфигураций теплообменного аппарата — без шахты (0 м), с шахтой 0,65 м и шахтой 1,15 м, что позволило выявить существенные различия в характере течения.

В базовом варианте без вытяжной шахты наблюдается типичная картина свободной конвекции, при которой формируется преимущественно вертикальное движение вдоль нагретой поверхности, распределение линий тока представлено на рис. 1.

Максимальные скорости регистрируются непосредственно у поверхности нагретых труб, однако уже на небольшом удалении скорости потока быстро затухают. Коэффициент теплопередачи в данном варианте составил $K = 0,723$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Установка шахты высотой 0,65 м принципиально меняет картину течения. Формируется более упорядоченный восходящий поток с большей средней скоростью, хотя и сохраняются отдельные зоны рециркуляции. Распределение линий тока для данного варианта представлено на рис. 2.

Для данного варианта коэффициент теплопередачи $K = 0,915$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При установке шахты высотой 1,15 м развивается поток с максимальной скоростью из трех вариантов, что видно на рис. 3. Коэффициент теплопередачи для данного варианта составил $K = 0,858$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При увеличении высоты вытяжной шахты до 1,15 м наблюдается развитие выраженных зон рециркуляции. Вихревые структуры создают существенные гидродинамические потери. Обратные течения в пристеночных областях формируют дополнительное сопротивление движению основного

потока, что приводит к снижению эффективной скорости теплоносителя в центральной части шахты [5]. Однако важно отметить, что при правильном проектировании и использовании специальных приемов (таких как установка направляющих перегородок или оптимизация формы шахты) негативное влияние этих зон может быть минимизировано.

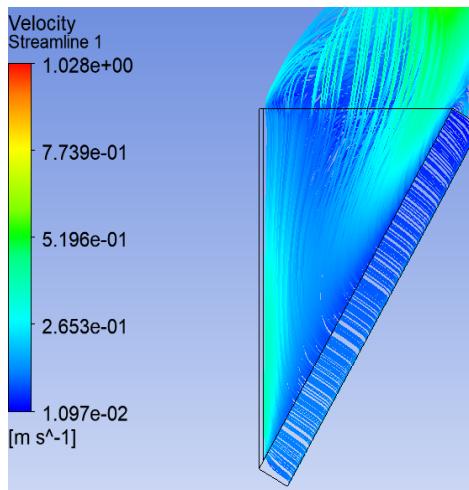


Рис. 1. Распределение линий тока с высотой шахты 0 м

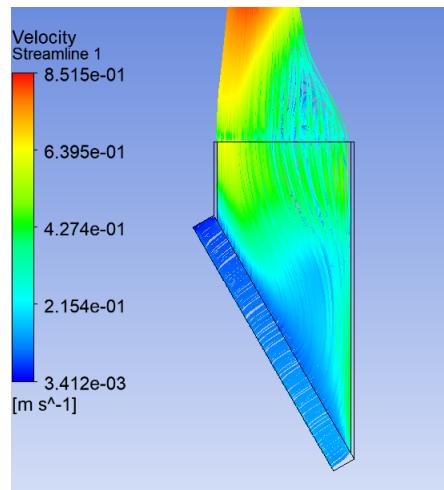


Рис. 2. Распределение линий тока с высотой шахты 0,65 м

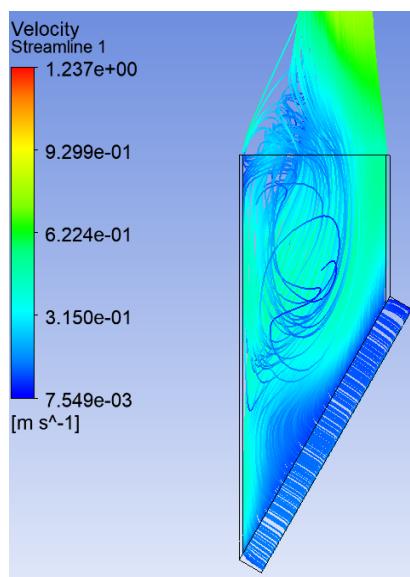


Рис. 3. Распределение линий тока с высотой шахты 1,15 м

Проведенное исследование теплообменного аппарата с различными высотами вытяжной шахты позволило выявить ряд важных закономерностей, имеющих практическое значение для проектирования систем естественной конвекции. Наиболее эффективной среди рассмотренных вариантов оказалась конструкция с высотой шахты 0,65 м, где был зафиксирован максимальный коэффициент теплопередачи. Этот результат объясняется оптимальным сочетанием нескольких факторов: с одной стороны, данной высоты достаточно для формирования устойчивого восходящего потока и реализации эффекта дымохода, с другой, она не приводит к чрезмерному развитию рециркуляционных зон и связанных с ними гидравлических потерь.

Полученные в исследовании результаты могут помочь оптимизировать конструкции вытяжных шахт теплообменных аппаратов различного назначения на основе лучшего понимания происходящих в них физических процессов.

Литература

- [1] Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Экспериментальное исследование свободно-конвективного теплообмена однорядных пучков из труб со спиральными алюминиевыми ребрами разной высоты в потоке воздуха, интенсифицированного вытяжной шахтой. *Инженерно-физический журнал*, 2023, т. 96, № 2, с. 383–391.
- [2] Безлекин В.В., Семашко С.Е., Сидоров В.Г., Ивков И.М. ЛАЭС II: обоснование пассивных систем безопасности. *РосЭнергоАтом*, 2008, № 2, с. 18–23.
- [3] Свириденко И.И. Показатели надежности автономной системы пассивного отвода теплоты ВВЭР на основе двухфазных термосифонов. *Сб. науч. тр. СНИЯЭП/СНИЯЭП*, 2005, № 14, с. 14–25.
- [4] Официальный сайт Ansys. URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения 24.02.2025).
- [5] Сухоцкий А.Б. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком. *Инженерно-физический журнал*, 2019, т. 92, № 3, с. 619–625.

Effect of the exhaust shaft height on the heat transfer efficiency during natural convection in multi - row tube bundles

Petrushin Kirill Aleksandrovich petrushin9ka@mail.ru

Ilyichev Vladimir Yuryevich patrol8@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The influence of the exhaust shaft height on the efficiency of natural-convective heat exchange in a four-row staggered bundle of bimetallic finned tubes of the heat exchanger of the emergency cooldown system is investigated. Using the numerical modeling method in ANSYS CFX, it was found that at a certain optimal shaft height, the maximum heat transfer coefficient is ensured due to the balance between the driving force of natural convection and the minimization of recirculation losses. It was found that an excessive increase in the shaft height leads to the development of vortex zones, which reduce the efficiency. The results are important for the design of energy-independent cooling systems in power engineering and industry.

Keywords: heat exchanger, convection, exhaust shaft, heat transfer coefficient, air cooling

УДК 621.22

Подготовительный этап в рамках моделирования лопастных гидромашин

Иванов Марк Александрович m19m075@yandex.ru

Савин Владимир Юрьевич savinvu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены особенности подготовительного этапа при моделировании лопастных гидромашин. Проанализированы подходы и особенности построения моделей рабочего колеса и ступеней насоса. Рассмотрены особенности использования условия периодичности в рамках сокращения вычислительных ресурсов. Проанализированы вопросы построения расчетной сетки и выбора модели турбулентности.

Ключевые слова: моделирование, ступень питательного насоса, турбулентность, расчетная сетка, лопастной насос

В научно-технической деятельности научный работник или инженер, который занимается гидродинамическими расчетами какого-либо объекта, часто использует расчетную модель этого объекта.

При расчетах используется именно модель по той причине, что исследование реального объекта иногда может оказаться затруднительно из-за экономических соображений (материальные затраты на обслуживание, эксплуатацию, ремонт реального объекта), неподходящих условий, в которых придется работать с данным объектом и др. Моделирование позволяет выявить более детальный состав или структуру объекта, способствует определить законы, по которым происходят процессы в описываемом объекте исследования, как происходит взаимодействие между составными его частями.

Модель может сочетать в себе различные понятия в зависимости от области исследования и сферы ее применения, но в более широком смысле она представляет из себя совокупность и соотношение свойств описываемого объекта, которые отражают его интересуемые исследователя характеристики [1].

Так, например, модель может быть аналитической, которая включает в себя систему уравнений, описывающих процесс, происходящий в какой-либо физической области пространства. Эти уравнения отражают свойства и описывают это явление с помощью применения математического аппарата (уравнений, математических соотношений, алгоритмов и др.). В данном случае, используя уже имеющиеся уравнения, исходные данные подставляем в эти уравнения и на выходе получаем интересующий нас результат.

Применяется второй вид моделирования — численное. В данном случае имеется какой-либо физический процесс, который описывается определенными дифференциальными уравнениями (например, уравнение Навье — Стокса, которое описывает механику подвижной среды). Для решения дан-

ных дифференциальных уравнений применяется численный метод, который заключается в том, чтобы эти уравнения привести к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Имеющиеся дифференциальные уравнения составляются относительно бесконечно малых приращений аргументов и функций. Эти бесконечно малые кусочки пространства, описываемые уравнениями, заменяются на конечные. Этих элементов получается бесконечное множество, но они имеют простейшее математическое описание, которое хорошо подходит для решения (вычисления на компьютере). Исходными данными при таком методе моделирования часто является CAD-модель, получаемая на стадии проектирования, а свойства среды или свойства твердого тела берутся и задаются уже из справочного приложения программы, в которой непосредственно происходит моделирование процесса.

Применительно к лопастным насосам на начальном этапе моделирования течения жидкости в ступени сначала прибегают к созданию CAD-модели ступени. Создается расчетная область, в которой будет происходить моделирование процесса. Процесс построения рабочего колеса с использованием «чертежных» программных пакетов достаточно отработан. Использование сплайнов, построение поверхностей по сечениям и других приемов позволяет минимизировать время построения 3D-модели. С другой стороны, процесс оптимизации конструкции, создание ступени с улучшенными гидравлическими качествами по результатам моделирования, требует, иногда, много-кратного перестроения модели. И здесь более уместно использование специализированных программных пакетов таких как ANSYS, CFTurbo, программа «Профилирование лопастей рабочих колес центробежного насоса», разработанная профессором С.С. Панаиотти, позволяющие строить 3D-модели рабочих колес. При этом, с одной стороны, такие программы позволяют построить 3D-модель рабочего колеса с минимальными исходными данными, с другой стороны, имеется широкий интерфейс корректировки всех основных параметров профиля лопатки и рабочего колеса в целом. Кроме того, некоторые из таких современных программных продуктов позволяют производить предварительную оценку структуры потока, гидравлических качеств проточной части и т. д.

Построенная 3D-модель рабочего колеса питательного насоса на следующие параметры: подача $Q = 90 \text{ м}^3/\text{ч}$; напор $H = 1100 \text{ м}$; частота вращения ротора насоса $n = 2970 \text{ об/мин}$ представлена на рис. 1. Модель ступени питательного насоса на указанные параметры представлена на рис. 2. Структура потока в меридиональном сечении представлена на рис. 3.

По полученным в результате расчета геометрическим параметрам получили меридианное сечение рабочего колеса (рис. 1), 3D-модель рабочего колеса (рис. 2) и 3D-модель ступени (рис. 3) питательного насоса в программе CFTurbo.

Полученную модель можно перенести для расчета течения жидкости в пакеты прикладных программ такие, как ANSYS, StarCCM, SolidWorks, FlowVision и др.

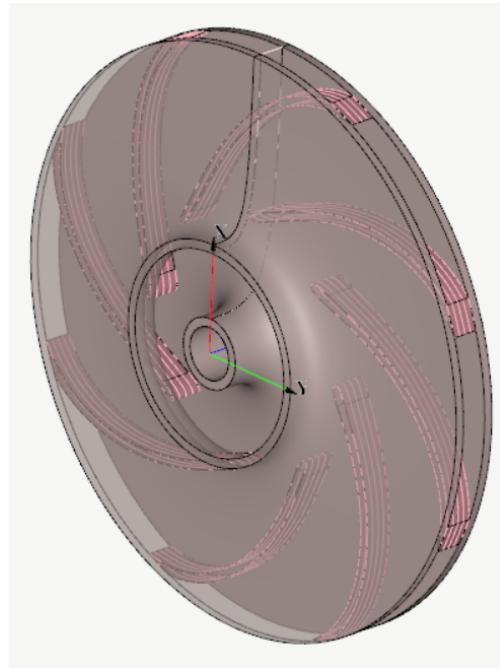


Рис. 1. 3D-модель рабочего колеса питательного насоса

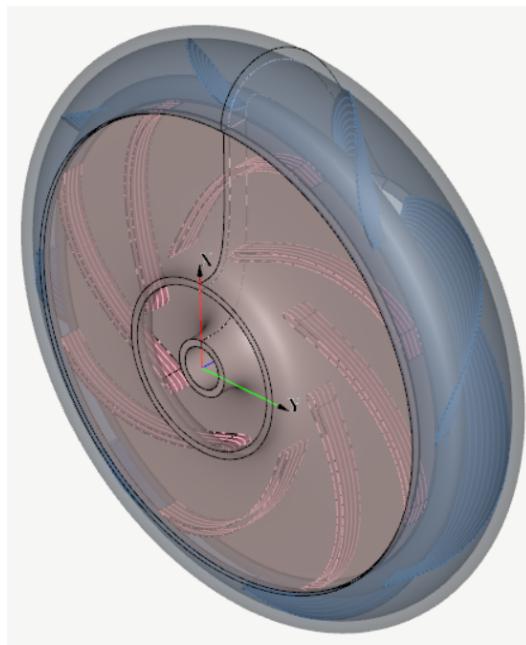


Рис. 2. 3D-модель ступени питательного насоса

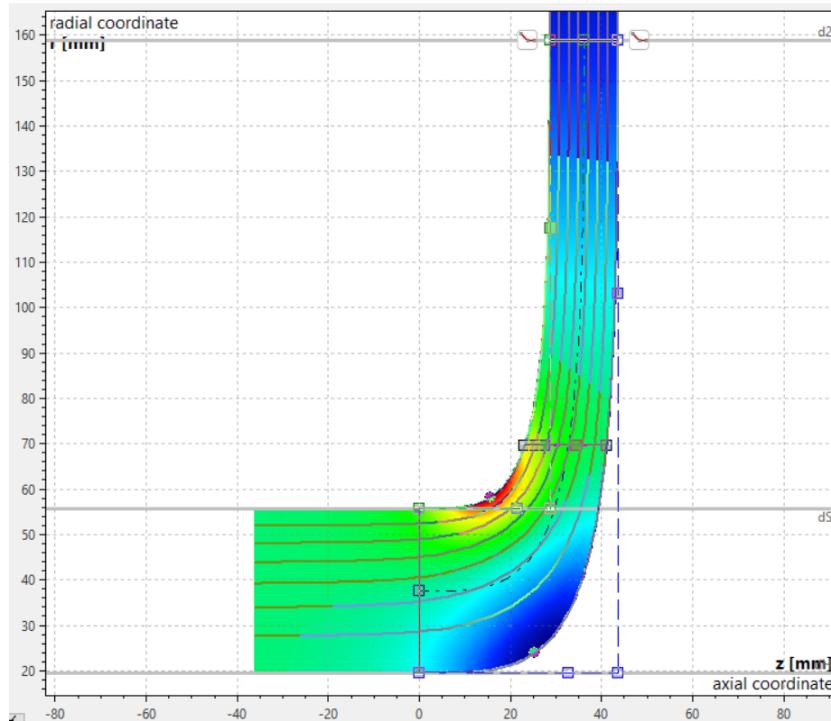


Рис. 3. Структура потока в меридиональном сечении рабочего колеса питательного насоса

Чтобы сократить вычислительные ресурсы часто прибегают, при возможности, к созданию одного межлопастного канала ступени, что позволяет сэкономить время и использовать более густую сетку расчетной области. Это возможно при условии, что в остальных каналах течение рабочей среды происходит в тех же условиях и при тех же параметрах, что и в исследуемом, т. е. при наличии геометрической симметрии. Данная модель будет определяться как модель с условием периодичности [2].

Существуют ситуации, когда геометрическая симметрия не наблюдается. Это возможно, когда, например, в центробежном насосе вместо лопаточного отвода используется спиральный. Его поперечное сечение от входа к выходу постепенно увеличивается. Данный факт требует использовать модель без условия периодичности, потому что параметры потока от входа к выходу в спиральном отводе будут разными ввиду его геометрических особенностей.

В нашем случае, когда лопастное колесо и лопаточный отвод имеют геометрическую симметрию, будет использоваться модель с условием периодичности, т. е. будет достаточно исследовать течение рабочей среды только в одном межлопаточном канале с целью создания более густой расчетной сетки и экономии вычислительных ресурсов [3].

После того как геометрическая модель готова, переходят к этапу создания расчетной сетки. Построение расчетной сетки заключается в разбиении

расчетной области на более простые кусочки или ячейки. Ячейки могут иметь различную форму: тетраэдры, призмы, пирамиды или гексаэдры. От качества разбиения сетки зависит результат расчета течения рабочей среды в ступени. Расчетную сетку следует создавать более густой в местах, где градиент потока наиболее высок, в основном у стенок межлопастного канала.

После генерации сетки переходят к выбору модели турбулентности. В современных продуктах достаточно успешно используется $k - \varepsilon$ модель турбулентности. В рамках модели система дифференциальных уравнений движения дополняется еще двумя уравнениями. Первое уравнение учитывает перенос кинетической энергии турбулентности потока k . Второе уравнение учитывает скорость диссипации ε . Отмечается, что $k - \varepsilon$ модель турбулентности целесообразно использовать для режимов работы, близких к оптимальным, при отсутствии противотоков [2].

Литература

- [1] Белов И.А., Исаев С.А. *Моделирование турбулентных течений*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 2001, 108 с.
- [2] Черный С.Г., Чирков Д. В., Лапин В.Н. *Численное моделирование течений в турбомашинах*. Новосибирск, Наука, 2006, 202 с.
- [3] Алексенский В.А. *Совершенствование методики расчета вязкого течения и проектирования насосов низкой быстроходности*. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012, 160 с.
- [4] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Москва, Дрофа, 2003, 840 с.

Preparatory stage in the framework of modeling of bladed hydraulic machines

Ivanov Mark Alexandrovich

m19m075@yandex.ru

Savin Vladimir Yurievich

savinvu@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The features of the preparatory stage in the modeling of bladed hydraulic machines are considered. The approaches and features of constructing models of the impeller and pump stages are analyzed. The features of using the periodicity condition in the context of reducing computing resources are considered. The issues of constructing a computational grid and choosing a turbulence model are analyzed.

Keywords: modeling, feed pump stage, turbulence, computational grid, vane pump

УДК 621.165

Исследование публикационной активности по теме исследования «Паровые турбины»

Жариков Артем Андреевич

artemzhrk@gmail.com

Шевелев Денис Владимирович

denis.v.shevelev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена актуальная проблема состояния паровых турбин в энергетической отрасли России, а также динамика научных исследований в этой области. Представлен анализ публикационной активности по тематике паровых турбин с использованием ресурса российской научной электронной библиотеки eLibrary.ru за период с 2019 по 2024 гг. Показано распределение публикаций по категориям, годам и популярным научным журналам, а также исследована динамика научных статей по вопросам расчета и моделирования паровых турбин. Сделаны выводы о стабильности количества публикаций в рассматриваемый период, с увеличением числа статей, посвященных вопросам проектирования и моделирования турбин. Оценены цитирования публикаций.

Ключевые слова: паровая турбина, энергетическое машиностроение, публикация, цитирование

Энергетическое машиностроение — одна из важнейших отраслей промышленности. Одним из важнейших видов продукции этой отрасли являются паровые турбины. Конденсационные и теплофикационные паровые турбины составляют основу энергетической отрасли в РФ. Доля выработки электроэнергии паровыми турбинами составляет около 65–70% от общего производства [1]. Важнейшей проблемой, стоящей перед энергетической отраслью РФ, является изношенность основных производственных фондов. Подавляющая часть парка паровых турбин была изготовлена и введена в действие еще в советское время и к настоящему времени степень их износа превышает 60 % [2]. Это делает актуальной задачу строительства нового теплоэнергетического оборудования, включая разработку и производство паровых турбин, что невозможно без проведения научных исследований и опытно-конструкторских работ как на этапе расчета, так и на этапах производства и эксплуатации вводимой продукции.

Оценить динамику научных исследований по тематике паровых турбин можно с помощью российской научной электронной библиотеки eLibrary.ru [3], интегрированной с Российским индексом научного цитирования.

С помощью данного сервиса был произведен анализ публикационной активности по тематике паровых турбин. Поиск научной информации осуществлялся за 6 лет, с 2019 по 2024 гг. Выполнялся поиск и анализ публикаций, содержащих в названии статьи или в ключевых словах термин «Паровая турбина». Общее количество публикаций, удовлетворяющего данному крите-

рию оставило 895. Распределение общего количества публикаций по годам приведено на рис. 1.

Как следует из рис. 1 количество публикаций за выбранный временной период остается стабильным.

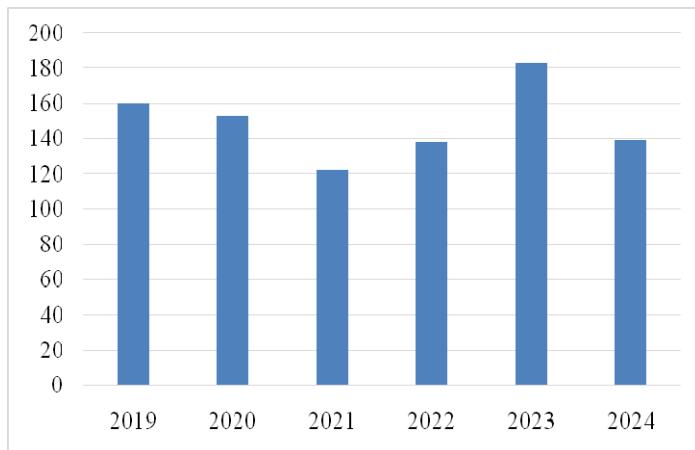


Рис. 1. Распределение публикаций по годам

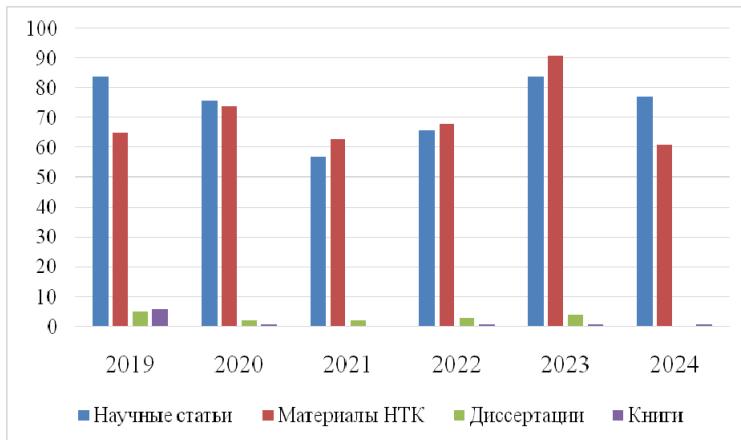


Рис. 2. Распределение публикаций по категориям

eLibrary.ru ведет учет публикаций, в том числе и по категориям. Так, на рис. 2 представлено распределение публикаций по годам с учетом категорий: научная статья, тезисы конференции, диссертации, книги.

Как следует из рисунка 2, число научных статей и материалов научно-технических конференций практически одинаково. Количество защищенных диссертаций и книг — значительно меньше, они — единичны. Так, количество

диссертаций, удовлетворяющих условиям поиска, составило 16. Наибольшее число диссертаций — 5, выполнено на базе НИУ «МЭИ». По три диссертации, было выполнено в Уральском федеральном университете им. Б.Н. Ельцина и в Саратовском государственном техническом университете им. Ю.А. Гагарина. Две диссертации — в Всероссийском теплотехническом институте.

Проведенный анализ показал, что научные статьи публиковались в нескольких десятках журналах. В актуальном перечне ВАК [4], тематике турбостроения соответствует направление 05.04.12. Турбомашины и комбинированные турбоустановки. Это журналы: «Вестник международной академии холода», «Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана», «Двигателестроение», «Известия высших учебных заведений. Серия Машиностроение», «Известия МГТУ МАМИ», «Компрессорная техника и пневматика», «Машины и установки», «Научно-технический журнал Двигатель», «Надежность и безопасность энергетики», «Электрические станции».

Дополнительно большой вес в РФ имеет журнал «Теплоэнергетика», включенный в международный индекс цитирования SCOPUS.

По тематике исследования на данный перечень журналов приходится 94 публикации, что составляет 21 % от общего количества научных статей. Кроме того, в общем перечне статей журналы, не входящие в перечень ВАК по направлению 05.04.12, но популярные у авторов по тематике паровых турбин. Здесь следует отметить такие журналы, как «Турбины и дизели», «Тяжелое машиностроение», «Известия высших учебных заведений. Серия Проблемы энергетики», «Вестник МЭИ» и др. Распределение публикаций по наиболее популярным журналам представлено на рис. 3. Да долю указанных журналов приходится порядка 50 % от общего количества статей.

Перечень поднятых в научных публикация тем достаточно широк — это и вопросы расчета и проектирования турбин, моделирования, прочность конструкции, проблемы и новации производства, регулирование и управление, особенности эксплуатации, анализ рынка и др.



Рис. 3. Распределение статей по наиболее популярным журналам

Так, к категории публикаций рассматривающих вопросы расчета и моделирования паровых турбин можно отнести 53 научные статьи и 38 тезисов конференций. Распределение публикаций по годам для указанной категории представлено на рис. 4.

Как следует из рисунка 4, количество публикаций, посвященных расчету и моделированию турбин, имеет тенденцию к увеличению.

Среднее количество цитирований публикаций по тематике паровых турбин — относительно невелико. Так, из 895 найденных публикаций всего 30 имело 5 и выше цитирований (3,4 %). Наибольшее число цитирований (53) отмечено у работы посвященной анализу структуры распределенных и изолированных энергетических систем на основе применения объектов малой энергетики у авторов из Воронежского института высоких технологий [4]. 26 цитирований у статьи о особенностях накипеобразования в трубах теплообменных аппаратов выполненной в Южно-Уральском государственном университете [5]. По 11 цитирований у двух обзорных статей по основным направлениям повышения эффективности энергетического оборудования ТЭЦ [6] и про совершенствование паросиловой части теплофикационных ПГУ [7]. Подавляющее число публикаций (75 %) цитирований вообще не имеет. Распределение публикаций по числу цитирований приведено на рис. 5.

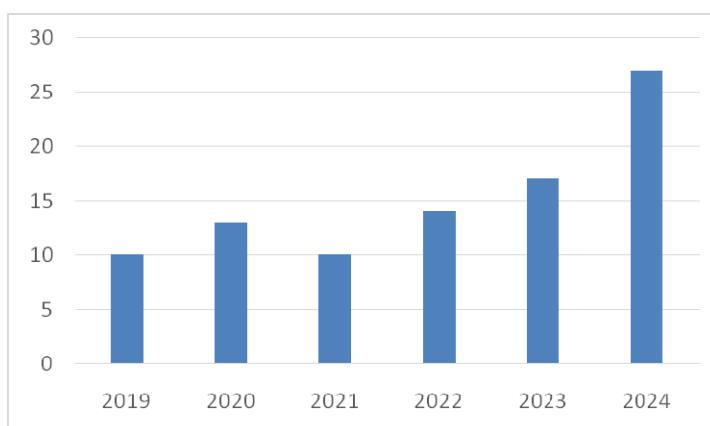


Рис. 4. Динамика научных публикаций, посвященных расчету и моделированию паровых турбин

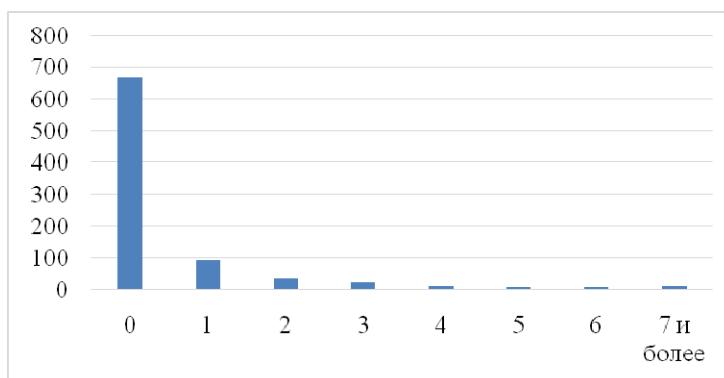


Рис. 5. Распределение цитирований по статьям

Из всего многообразия авторов, печатающихся по тематике расчета и моделирования паровых турбин, наибольшее число публикаций отмечено о Неуимина В.М., ОАО «Интер РАО» (13); Тюхтяев А.М., АО «Силовые машины» (8); Ильичев В.Ю., КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; Боришанский К.Н., СПбПУ Петра Великого (7); Култышев А.Ю. Газпромэнергохолдинг (7); Зарянкин А.Е., НИУ МЭИ (5); Грибин В.Г., НИУ МЭИ (5). Указанные авторы выбирали для публикации такие журналы, как «Теплоэнергетика», «Турбины и дизели», «Тяжелое машиностроение, электрические станции».

Заключение. Публикационная активность по тематике паровых турбин — стабильная. Общее число публикаций не снижается. Соотношение между научными статьями и материалами НТК примерно поровну. Количество защищенных диссертаций — мало, защиты — единичны. Книги, монографии, учебные пособия по тематике паровых турбин в eLibrary.ru практически не представлены. Возможно, они практически не издаются. Из общего числа публикаций, процент попадающих в перечень ВАК по направлению 05.04.12. Турбомашины и комбинированные установки — порядка 21 %. На 10 наиболее популярных журналов приходится около 50 % публикаций. Цитируемость научных публикаций по тематике паровых турбин предельно низкая. Научные работы развития не получают, публикации авторов в основном единичные. Самоцитирование также практически не представлено.

Литература

- [1] Савостьянова Л.В. *Прогнозирование технического состояния паровых турбин для повышения эффективности ремонтной деятельности*. Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017, 189 с.
- [2] Сапрыкина М.С. Статистический анализ степени износа основных фондов предприятий отрасли производства и распределения электроэнергии в Российской Федерации. *Вектор экономики*, 2020, № 11, с. 66.
- [3] Российская научная электронная библиотека. URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения 01.04.2025).
- [4] Клименко Ю.А., Преображенский А.П. Анализ структуры распределенных и изолированных энергетических систем на основе применения объектов малой энергетики. *Грозненский естественнонаучный бюллетень*, 2019, т. 4, № 2(16), с. 99–104.
- [5] Татаринцев В.А. Особенности накипеобразования в трубах теплообменных аппаратов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика*, 2022, т. 22, № 1, с. 97–105.
- [6] Михайлов В.Е., Смолкин Ю.В., Сухоруков Ю.Г. Основные направления повышения эффективности энергетического оборудования ТЭЦ. *Теплоэнергетика*, 2021, № 1, с. 63–68.
- [7] Верткин М.А., Колпаков С.П., Михайлов В.Е., Сухоруков Ю.Г., Хоменок Л.А. Совершенствование паросиловой части теплофикационных ПГУ с котлами-утилизаторами для ТЭЦ крупных городов РФ. *Теплоэнергетика*, 2021, № 2, с. 34–40.

Research of publication activity on the research topic "Steam turbines"

Zharikov Artem Andreevich

artemzhrk@gmail.com

Shevelev Denis Vladimirovich

denis.v.shevelev@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses the current problem of the state of park turbines in the Russian energy industry, as well as the dynamics of scientific research in this area. The analysis of publication activity on the subject of steam turbines using the resource of the Russian scientific electronic library is presented. eLibrary.ru for the period from 2019 to 2024. The distribution of publications by category, year, and popular scientific journals is shown, as well as the dynamics of scientific articles on steam turbine calculation and modeling. Conclusions are drawn about the stability of the number of publications in the period under review, with an increase in the number of articles devoted to turbine design and modeling. Citations of publications are evaluated.

Keywords: steam turbine, power engineering, publication, citation

Секция 5. Методы теории автоматического управления; автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

УДК 004.83

Распознавание специализированной речи: методы реализации

Безлюдов Михаил Дмитриевич bezlyudovmd@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено как устроена система распознавания речи, какие актуальные направления существуют в данном направлении. Отдельно рассмотрен подкласс данных систем, которые фокусируются на распознавании речи и терминов узкой специализации. Особое внимание удалено тому, каким образом могут быть реализованы системы распознавания речи в контексте предсказания узкоспециализированных терминов: с применением готовых моделей, которые уже обучены на повседневной русской речи, а также моделей, которые обучены на русской специализированной речи. По результатам сравнительного анализа сделаны выводы о моделях, предпочтительных в использовании.

Ключевые слова: распознавание речи в текст, классификация текста, специализированная речь, анализ метрик

Технологии распознавания речи прочно вошли в нашу повседневную жизнь: голосовой ассистент в смартфоне стал нормой, а с помощью простых голосовых команд можно включить свет, узнать прогноз погоды и т. д. Однако наиболее интересные сценарии применения данной технологии реализуются в более узкоспециализированных областях. К примеру, в государственном управлении и судебной системе разработки в этом направлении уже используются при составлении протоколов заседаний, снижая зависимость от опыта и навыков стенографиста. В медицине данные системы также используются при составлении протоколов осмотров и диагнозов [1, 2].

Вне зависимости от того, какая речь распознается, принцип работы систем данного класса является неизменной и состоит из нескольких этапов [3]:

- запись голоса человека и его обработка в цифровой формат;
- удаление нежелательных шумов из записи;
- очищенная запись поступает на вход модели классификации;
- модель классификации делает предсказание.

Система распознавания в данном описании уже решает несколько насущных проблем, таких как зависимость от окружения и общая зашумленность записи, но в контексте распознавания специализированной речи решающее влияние на конечный результат оказывает то, как реализован последний пункт системы — модель классификации. При реализации данного модуля системы есть два пути: взять уже готовую модель, либо разработать и обучить собственную. Данные два подхода будут являться объектом следующего анализа.

Для сравнения было выбрано несколько моделей. Одна из них Vosk [4], является довольно компактной (минимальный вес модели на русском языке

около 50 Мб), уже обучена на наборе обычных разговоров и готова к использованию. Вторая модель обучена на отдельно созданном наборе данных, который состоит из десяти часов лекций и научных конференций по травматологии.

На вход каждого алгоритма подается аудиозапись в формате wav. Далее она подвергается классификациями, а также вычисляются численные метрики, свидетельствующие о качестве классификации. В дополнении к эксперименту предсказаний, на вход обеих моделей через микрофон будет подаваться один и тот же текст, распознавание которого также будет оцениваться.

Для численной оценки результатов используются следующие метрики [5, 6]:

– Accuracy — стандартная метрика оценивания модели, показывающая то, сколько правильных предсказаний сделала модель относительно общего числа предсказаний;

– WER (англ. Word Error Rate) — метрика, отображающая долю (процент) неправильно распознанных слов. Данная метрика популярна среди моделей классификации текстов, и она может быть представлена формулой

$$WER = \frac{S + D + I}{T},$$

где S (от англ. Substitutions) — наименьшее число операций замены слов; D (от англ. Deletions) — наименьшее число операций удаления слов; I (от англ. Insertions) — наименьшее число операций вставки слов; T — общее число слов в исходном тексте.

Метрика WER вычисляется на основании сравнения «стоимости» преобразования одной строки (эталонной) во вторую (гипотеза, результат классификации). Чем ниже показатель метрики, тем точность распознавания выше. Метрики, озвученных выше моделей по итогам эксперимента, представлены в таблице.

Результаты работы алгоритмов классификации

Модель	Готовая модель (Vosk)	Обученная модель
Accuracy	0,5127	0,7511
WER, %	62	43

Как видно из представленной таблицы, несмотря на то что обученная модель, которая была обучена самостоятельно, оказалась больше, готовая модель на ее фоне справилась значительно хуже. Причины такого результата очевидны — готовая модель обучена на повседневной речи, где появление терминов, которые знают небольшие группы специалистов, крайне редко.

В свою очередь, метрики обученной модели довольно высоки, и их достаточно легко улучшить, например путем манипуляций с набором данных: изменение его объема, добавление дополнительных, более качественных по

записи и наполнению, записей и т. д. Также такой подход к применению моделей обладает преимуществом гибкости: если потребуется распознавать текст из какой-то другой области, достаточно составить другой набор данных и переобучить модель.

Литература

- [1] Использование системы автоматического распознавания речи аудиопротокольной записи судебных заседаний. URL: <https://cdto.work/2025/01/23/kejs-ispolzovanie-sistemy-avtomaticheskogo-raspoznavaniya-rechi-audioprotokolnoj-zapisи-sudebnyh-zasedanij/> (дата обращения 20.03.2025).
- [2] Технологии распознавания речи в здравоохранении. URL: <https://telemedai.ru/proekty/tehnologii-raspoznavaniya-rechi-v-zdravoohranenii> (дата обращения 20.03.2025).
- [3] Как работают системы распознавания речи. URL: <https://habr.com/ru/companies/amvera/articles/691288/> (дата обращения 24.03.2025).
- [4] Библиотека для распознавания речи «Воск». URL: <https://alphacephei.com/vosk/index.ru.html> (дата обращения 24.03.2025).
- [5] Метрики классификации и регрессии. URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/metriki-klassifikacii-i-regressii> (дата обращения 27.03.2025).
- [6] Оценка качества работы систем *Speech to Text*. URL: <https://newtechaudit.ru/oczenka-kachestva-raboty-sistem-speech-to-text/> (дата обращения 27.03.2025).

Specialized speech recognition: methods of implementation

Bezlyudov Mikhail Dmitrievich

bezlyudovmd@student.bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article discusses current methods of automatic speech recognition. A separate article considers a subset of these systems, which focus on speech recognition and terms of narrow specialization. The analysis was carried out and conclusions were drawn on models that provide the most qualitative solution to the problem of specialized speech recognition. Special attention is given in this article to how speech recognition systems can be implemented in the context of the prediction of highly specialized terms: using ready-made models, which are already trained in everyday Russian language, as well as models who are trained in Russian specialized speech. Based on the results of a comparative analysis, conclusions are drawn about models that are preferable to be used.

Keywords: speech recognition in text, classification of text, specialized speech, metric analysis

УДК 681.5.015.23

Синтез дискретного алгоритма управления электроприводом из условия обеспечения астатизма второго порядка замкнутой системе

Семехин Дмитрий Евгеньевич sde19ki188@student.bmstu.ru

Акименко Дмитрий Андреевич akimenko_d_a@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен вопрос построения дискретного алгоритма управления электроприводом из условия обеспечения замкнутой системе управления астатизма второго порядка. На основе построенного непрерывного алгоритма управления, обеспечивающего требуемые показатели качества и учитывающего особенности функционирования дискретно-непрерывных систем управления, строится дискретное управление. Приведены результаты моделирования полученной дискретно-непрерывной замкнутой системы управления приводом.

Ключевые слова: алгоритм управления, дискретное управление, математическая модель, системы управления, объект управления, электропривод

Применение микроконтроллеров в контуре управления объектами различного назначения, обусловленное их небольшой стоимостью и высокой производительностью, позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы управления, обеспечивающих требуемые показатели качества как в переходном, так и в установившемся режимах. Поскольку электроприводы нашли широкое применение в технических системах, к которым предъявляются высокие требования к обеспечению высокой точности позиционирования и скоростных показателей, необходимо синтезировать алгоритмы управления, которые удовлетворяли бы данным требованиям.

Одним из таких подходов является синтез алгоритма управления из условия обеспечения показателей качества близких к эталонной модели, обладающей астатизмом второго порядка и заданной уравнением

$$(\alpha_0, \alpha_1 > \alpha_0). \quad (1)$$

Структура алгоритма синтезируется из условия минимума функционала [1]:

$$J(u, \dot{u}) = \frac{1}{2} [\ddot{x}_e(t) - \ddot{x}(t, u, \dot{u})]^2, t \geq 0, \quad (2)$$

в соответствии с дифференциальным соотношением

$$\frac{d}{dt} \dot{u}(t) = \lambda \frac{\partial}{\partial u} J(u, \dot{u}), \lambda = \text{const.} \quad (3)$$

В результате получена структурная схема замкнутой непрерывной системы управления, представленная на рис. 1.

Структурная схема замкнутой системы управления примет вид, представленный на рис. 1. Здесь коэффициент K является настраиваемым.

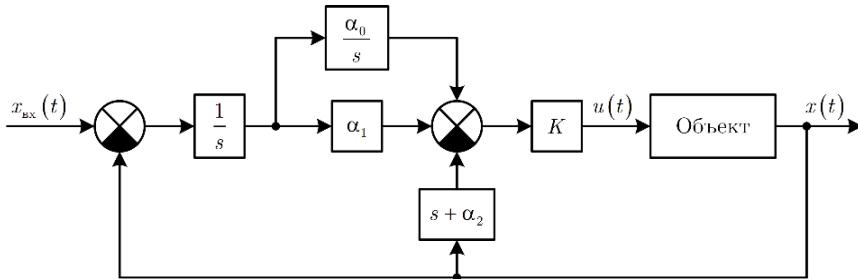


Рис. 1. Структурная схема замкнутой непрерывной системы управления

Передаточная функция по выходу:

$$W_x(s) = \frac{K(\alpha_1 s + \alpha_0)W_o(s)}{s^2 + K(s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0)W_o(s)}$$

или, с учетом $W_o(s) = B_o(s)/A_o(s)$:

$$W_x(s) = \frac{K(\alpha_1 s + \alpha_0)B_o(s)}{s^2 A_o(s) + K(s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0)B_o(s)}. \quad (4)$$

Характеристический полином замкнутой системы:

$$D(s) = s^2 A_o(s) + K(s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0)B_o(s). \quad (5)$$

Воспользовавшись одним из критериев устойчивости, например критерием Гурвица, можно определить допустимые значения K , при которых полученная система управления будет устойчивой.

Кроме того, поскольку планируется реализация алгоритма управления на микроконтроллере, то необходимо учесть транспортное запаздывание в канале управления, обусловленное работой микроконтроллера. С учетом этого находим передаточную функция разомкнутой системы

$$W_p(s) = \frac{K(s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0)}{s^2} W_o(s) e^{-\frac{T_d}{2}s}, \quad (6)$$

где T_d — период квантования сигналов.

Зная передаточную функцию разомкнутой непрерывной системы управления (6), можно определить запасы устойчивости по амплитуде, фазе и транспортному запаздыванию, что позволит определить допустимые значения коэффициента K и периода квантования.

Воспользовавшись заменой, например обратным методом Эйлера или преобразованием Тустена, можно перейти от непрерывного алгоритма управления к дискретному [2].

На рис. 2 представлена структурная схема дискретно-непрерывной системы управления электроприводом, реализованная в Simulink [3].

На рис. 3 и 4 представлены графики переходного процесса синтезируемой дискретно-непрерывной системы управления электроприводом [4] и управления соответственно и для сравнения приведены графики соответствующих сигналов непрерывной и эталонной систем.

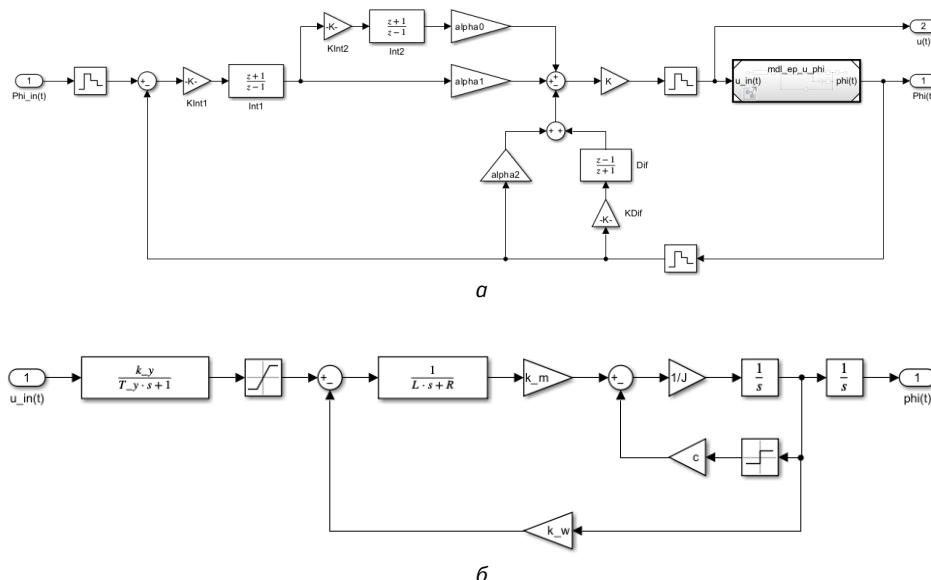


Рис. 2. Структурная схема объекта управления в Simulink:
а — замкнутой системы; б — электропривода

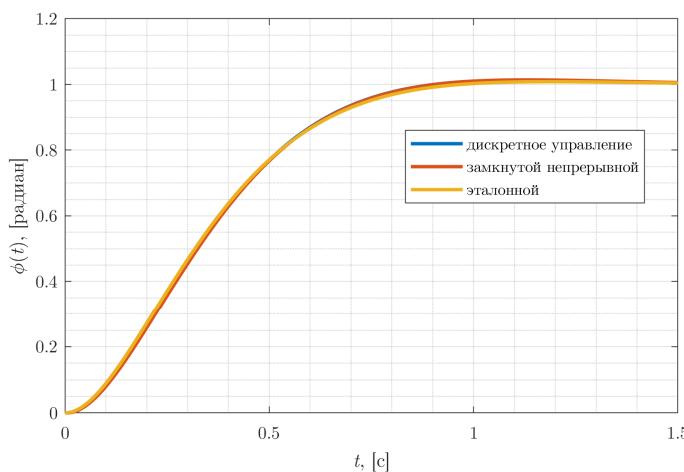


Рис. 3. График переходного процесса

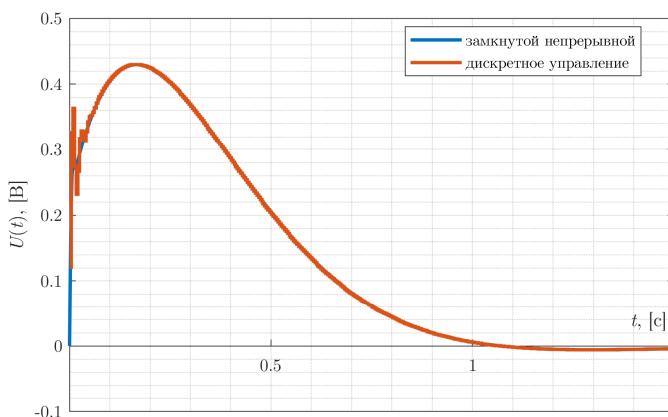


Рис. 4. График сигнала управления

Таким образом, рассмотренный подход позволил синтезировать дискретный алгоритм управления, обеспечивающий требуемые показатели качества замкнутой системы управления электроприводом [5].

Литература

- [1] Крутько П.Д. *Обратные задачи динамики в теории автоматического управления*. Москва, Машиностроение, 2004, 576 с.
- [2] Карташов Б.А., Шабаев Е.А., Козлов О.С., Щекатуров А.М. *Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Практикум по моделированию систем автоматического регулирования*. Москва, ДМК Пресс, 2017, 424 с.
- [3] *Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Ч. II. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 416 с.
- [4] Крутько П.Д. *Управление исполнительными системами роботов*. Москва, Наука, 1991, 336 с.
- [5] Крамаренко Н.В., Рыков А.А. *Алгоритмы управления движениями точки и роботоминимулятора*. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, 2016, 87 с.

Synthesis of a discrete electric drive control algorithm from the condition of providing second-order astatism in a closed system

Semekhin Dmitry Evgenievich

sde19ki188@student.bmstu.ru

Akimenko Dmitry Andreevich

akimenko_d_a@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The issue of constructing a discrete algorithm for controlling an electric drive from the condition of providing a closed control system with second-order astatism is considered. Discrete control is built on the basis of the constructed continuous control algorithm, which provides the required quality indicators and takes into account the features of the functioning of discrete-continuous control systems. The simulation results of the obtained discrete-continuous closed-loop drive control system are presented.

Keywords: control algorithm, discrete control, mathematical model, control systems, control object, electric drive

Секция 6. Экология и безопасность

УДК 631.41: 504.61

Нормирование тяжелых металлов в почве

Готвальд Елена Дмитриевна

lena.gotvald@icloud.com

Тютюнъкова Маргарита Викторовна

tyutyunkova82@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Статья посвящена исследованию нормирования тяжелых металлов в почве, возникающих при применении осадков сточных вод в качестве удобрения сельскохозяйственных культур. Рассмотрены основные подходы к нормированию тяжелых металлов. Охарактеризованы наиболее распространенные тяжелые металлы, входящие в состав осадков сточных вод. Определено, что при внесении осадков сточных вод валовое содержание тяжелых металлов в почвах находится в пределах ориентировочно допустимой концентрации и верхней границы валового содержания. Установлен допустимый уровень загрязнения земель тяжелыми металлами. Описаны методы борьбы с загрязнением почв. Подчеркнута важность нормирования тяжелых металлов для устойчивого развития и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: осадки сточных вод, тяжелые металлы, нормирование, загрязнение

Осадки сточных вод (ОСВ) являются не только ценным органическим удобрением, но и передовым методом снижения радионуклидного загрязнения почвы [1].

Несмотря на это, ОСВ могут содержать значительные концентрации тяжелых металлов (ТМ), которые при внесении в почву оказывают негативное влияние на окружающую среду.

В связи с этим нормирование ТМ в почве — важная задача в области экологии и сельского хозяйства.

Целью данной статьи является рассмотреть основные подходы к нормированию ТМ в почве и определить показатель уровня загрязнения земель ТМ при использовании ОСВ в качестве удобрения.

Нормирование ТМ — это процесс, включающий в себя определение допустимых концентраций ТМ в почве, а также разработку мер по их снижению до безопасных уровней.

Нормы содержания ТМ в почве устанавливаются для предотвращения накопления вредных веществ, наносящих вред организму [1].

Выделяются следующие подходы к нормированию ТМ в почве:

– токсикологический подход, основанный на изучении воздействия ТМ на живые организмы;

– экологический подход, учитывающий состояние экосистем и их способность к самоочищению;

– санитарно-гигиенический подход, направленный на защиту здоровья человека и предотвращение заболеваний;

ТМ, попадающие в почву, по степени опасности подразделяются на следующие классы:

- высоко опасные: As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn;
- умеренно опасные: Co, Ni, Mo, Cu, Cr, Sb;
- малоопасные: Ba, V, W, Mn, Sr.

Наиболее распространенными ТМ, входящими в состав ОСВ, являются Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, Ni.

Высокие концентрации этих ТМ наблюдаются в осадках, полученных из стоков промышленных предприятий, очистных сооружений или сельскохозяйственных источников [2].

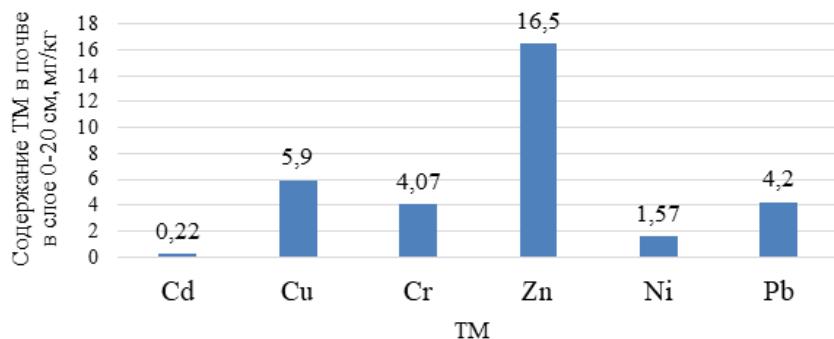
Объектом исследования является дерново-подзолистая супесчаная почва, ОСВ в дозе 10 т/га.

Научно-исследовательская работа выполнялась в полевых условиях. Размер опытных делянок составил $2,5 \times 2 = 5 \text{ м}^2$. Делянки имеют одноярусное систематическое расположение. Повторность опытов — трехкратная.

Анализы почвенных образцов осуществлялись стандартными, лицензированными и сертифицированными методами в лабораториях ООО «ИЛКППЭ», ФГУ центра химизации и радиологии «Калужский», центра государственного санитарно-эпидемиологического надзора в г. Калуга, ГУП «Калугаобводоканал».

Валовое содержание ТМ определяли в вытяжке концентрированной HNO_3 , разбавленной H_2O в соотношении 1:1 при кипячении с добавлением концентрированной H_2O_2 . Анализ вытяжки был произведен на атомно-абсорбционном спектрофотометре.

Валовое содержание ТМ в почве в слое 0–20 см при внесении ОСВ представлено на рисунке.



Валовое содержание ТМ в почве в слое 0–20 см [3]

Наибольшее валовое содержание среди данных ТМ имеет цинк (Zn).

Нормы валового содержания ТМ в почве в слое 0–20 см приведены в таблице [3].

Нормы валового содержания ТМ в почве в слое 0–20 см [3]

Показатели	Содержание ТМ в почве в слое 0–20 см, мг/кг					
	Cd	Cu	Cr	Zn	Ni	Pb
Граница валового содержания*	5	100	100	70	50	100
ОДК тяжелых металлов**	0,5	33	–	55	20	32

* Верхняя пороговая граница валового содержания тяжелых металлов в почве, не вызывающая отрицательных биологических эффектов.

** Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг).

Таким образом, валовое содержание ТМ находится в пределах ОДК и верхней границы валового содержания [3]. Существуют физические, химические и биологические методы борьбы с загрязнением почв ТМ. Среди них выделяют:

- внесение органических веществ и глины, известкование способствуют снижению уровня кислотности почвы, что уменьшает вероятность ее загрязнения ТМ;
- посев, скашивание и удаление с поверхности почвы некоторых растений (например, клевера), существенно снижает концентрацию ТМ в почве;
- промывка почвы с использованием растворов ПАВ, сильных окислителей и щелочных растворов позволяет снизить содержание ТМ на 85–95 %;
- электролиз воды способствует очищению почвы от нефтепродуктов, фенолов и хлорсодержащих углеводородов;
- термический метод используется для удаления нефтепродуктов, масел, некоторых цветных металлов, галогеносодержащих и органических соединений;
- проведение детоксикации, откачивания и очистки подземных вод;
- прогнозирование и устранение миграции растворимых форм ТМ и т. д.

Правильный подход к выбору метода позволит эффективно очистить почву от ТМ, минимизируя негативные последствия для окружающей среды [4].

Таким образом, при внесении ОСВ валовое содержание ТМ в почвах находится в пределах ОДК и верхней границы валового содержания. Определен допустимый уровень загрязнения земель ТМ. Нормирование содержания ТМ в почве является неотъемлемой частью управления качеством окружающей среды и охраны здоровья населения. Установление и соблюдение предельных уровней загрязнения позволяет минимизировать риски для человека и природы, обеспечивая устойчивое развитие общества.

Литература

- [1] Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. *Загрязнение почв тяжелыми металлами*. Москва, Типография Россельхозакадемии, 2012, 305 с.
- [2] Дабахов М.В., Дабахова Е.В., Титова В.И. Методические подходы к комплексной оценке загрязнения почв тяжелыми металлами. *Агрохимический вестник*, 2011, № 6, с. 9–11.
- [3] Сюняев Н.К., Малахова С.Д., Сюняева О.И., Тютюнъкова М.В. *Агрозоология осадков сточных вод города Калуги*. Калуга, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008, 150 с.
- [4] Зырин Н. Г., Обухов А. И. Принципы и методы нормирования (стандартизации) содержания тяжелых металлов в почве и в системе почва — растение. *Бюллентень Почв. ин-та им. Докучаева*, 1988, вып. 35, 18 с.

Norming of heavy metals in soil

Gotvald Elena Dmitrievna

lena.gotvald@icloud.com

Tyutyunkova Margarita Viktorovna

tyutyunkova82@mail.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article is devoted to the study of rationing of heavy metals in soil arising from the use of sewage sludge as fertiliser for agricultural crops. The article considers the main approaches to heavy metal rationing. The most common heavy metals included in the composition of sewage sludge are characterised. It is determined that at application of sewage sludge the gross content of heavy metals in soils is within the approximate permissible concentration and the upper limit of the gross content. The permissible level of land pollution by heavy metals is established. Methods of soil pollution control are described. The importance of heavy metal rationing for sustainable development and environmental protection is emphasised.

Keywords: sewage sludge, heavy metals, rationing, pollution

УДК 504.064.2

Анализ динамики состояния поверхностных вод Калужской области

Панченко Егор Андреевич

panchenkoea2@student.bmstu.ru

Чериканова Евгения Андреевна

cherikanova_e@bmsru.ru

Бесклектко Татьяна Сергеевна

beskletkots@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен анализ динамики загрязнения поверхностных водных ресурсов Калужской области за пятилетний период (2019–2023 гг.). Проанализированы такие показатели, как БПК, сбросы нефти и нефтепродуктов, взвешенных веществ, фосфатов, нитрат-ионов, железа и др. Сделаны выводы о целесообразности регулярного проведения подобного анализа, который позволяет выявить источники загрязнения и оценить их вклад в ухудшение качества воды и спрогнозировать возможные последствия, оценить эффективность проводимых водоохранных мероприятий.

Ключевые слова: поверхностные воды, состояние водных ресурсов, загрязнение водных объектов, Калужская область

Поверхностные воды играют ключевую роль в обеспечении населения и экономики Калужской области водными ресурсами. Они используются для питьевого и хозяйствственно-бытового водоснабжения, промышленного производства, сельского хозяйства и рекреации. В условиях растущего антропогенного воздействия и климатических изменений актуальной задачей является оценка состояния поверхностных водных объектов и анализ динамики их изменения.

В работе проведен анализ состояния поверхностных вод Калужской области за 2019–2023 гг. — см. таблицу [1–5].

Гидрографически территория Калужской области делится на две неравные части: к бассейну Волги относится 83 % территории области, к бассейну Днепра — 17 %.

В средний по водности год на территорию Калужской области поступает с территорий соседних областей около 6 км³ речного стока, на территории области формируется около 6,5 км³ (в том числе в бассейне Днепра 1 км³) и за пределы области уходит около 12,5 км³.

Общий забор воды по области в 2023 г. увеличился по сравнению с 2022 г. на 3,03 млн м³ и составил 135,64 млн м³. Всего было использовано 107,6 млн м³ воды (в 2022 г. — 103,95 млн м³).

В 2023 г. в поверхностные водные объекты было сброшено 88,47 млн м³ (в 2022 г. — 87,31 млн м³) сточных, транзитных и других вод.

В 2020–2021 гг. наблюдалось снижение сбросов БПК на 15,0 и 13,2 % соответственно относительно 2019 г. Однако в 2022 и 2023 гг. сбросы выросли, превысив уровень 2019 г. на 2,4 и 3,8 % соответственно. При этом в 2022 г. относительно 2021 г. виден скачок на 17,9 %.

Динамика загрязнения поверхностных вод Калужской области за 2019–2023 гг.

Загрязняющее вещество	Годы				
	2019	2020	2021	2022	2023
БПК	2789,194	2372,101	2421,919	2855,091	2894,435
Нефть, нефтепродукты	5,446	4,463	4,254	6,510	6,127
Взвешенные вещества	2301,356	2062,873	2151,214	2825,601	2415,829
Фосфаты	173,737	131,755	121,888	145,942	150,259
Нитрат-анион (NO^{-3})	2657,957	2809,559	2980,017	2987,429	3208,618
Железо (Fe^{2+} , Fe^{3+}) (все растворимые в воде формы)	34,501	31,415	32,143	39,358	35,959
Медь (Cu^{2+})	0,432	0,348	0,350	0,625	0,520
Цинк (Zn^{2+})	1,703	1,305	1,310	1,938	1,959
Нитрит-анион (NO^{-2})	52,996	48,965	49,493	68,684	120,458
Аммоний ион	1231,212	817,996	603,617	631,969	617,822

В 2020 и 2021 гг. сбросы нефтепродуктов уменьшились относительно 2019 г. на 18,0 и 21,9 % соответственно. В 2022 г. произошел резкий рост на 53,0 % относительно 2021 г., и сбросы превысили уровень 2019 г. на 19,5 %. В 2023 г. сбросы снизились на 5,9 % относительно 2022 г., но все еще оставались выше уровня 2019 на 12,5 %.

В 2020 и 2021 гг. сброс взвешенных веществ был ниже, чем в 2019 г., на 10,4 и 6,5 % соответственно. В 2022 г. сбросы выросли на 31,3 %, превысив уровень 2019 на 22,8 %. В 2023 г. зафиксировано уменьшение на 14,5 %, однако относительно 2019 г. все еще наблюдается увеличение на 4,97 %.

С 2019 по 2021 гг. наблюдалось последовательное снижение сбросов фосфатов: на 24,2 % в 2020 г. и на 29,8 % в 2021 г. (относительно 2019 г.). В 2022 и 2023 гг. сбросы увеличились относительно предыдущих лет (на 19,7 и 3,0 % соответственно), но остались ниже уровня 2019 г. (на 16,0 и 13,5 % соответственно).

Сбросы нитрат-анионов последовательно увеличивались на протяжении всего периода. Относительно 2019 г. рост составил от 5,7 % в 2020 г. до 20,7 % в 2023 г.

В 2020 и 2021 гг. сброс железа был ниже, чем в 2019 г., на 8,9 и 6,8 % соответственно. В 2022 г. сбросы выросли на 22,4 % относительно 2021 г., превысив показатель 2019 на 14,1 %. В 2023 г. зафиксировано снижение на 8,6 % относительно 2022 г., тем не менее, относительно 2019 г. сброс выше на 4,2 %.

В 2020 и 2021 гг. сбросы меди были ниже уровня 2019 г. (на 19,4 и 19,0 % соответственно). В 2022 г. наблюдался резкий рост сбросов — на 78,6 % по сравнению с 2021 г. и на 44,7 % по сравнению с 2019 г. В 2023 г. сбросы уменьшились на 16,8 % по сравнению с 2022 г., но все еще превышали уровень 2019 г. на 20,4 %.

В 2020 и 2021 гг. сбросы цинка были ниже уровня 2019 г. (на 23,4 и 23,1 % соответственно). В 2022 г. сбросы выросли на 47,9 % относительно 2021 г., превысив уровень 2019 г. на 13,8 %. В 2023 г. сбросы продолжили незначительно расти (на 1,1 % к 2022 г. и на 15 % к 2019 г.).

В 2020 и 2021 гг. наблюдалось незначительное снижение сбросов нитрит-анионов относительно 2019 г. (на 7,6 и 6,6 % соответственно). В 2022 г. произошел рост на 38,8 % относительно 2021 г., и сбросы превысили уровень 2019 г. на 29,6 %. В 2023 г. произошел резкий скачок сбросов — на 75,4 % относительно 2022 г. и на 127,3 % относительно 2019 г.

Наблюдается общая тенденция к снижению сбросов ионов аммония. Относительно 2019 г. сбросы снизились на 33,5 % в 2020 г., на 50,9 % в 2021 г., на 48,7 % в 2022 г. и на 49,8 % в 2023 г. В 2022 г. наблюдается незначительное увеличение относительно 2021 г. на 4,7 %, однако в 2023 г. зафиксировано снижение.

На рис. 1–3, представлена динамика загрязнения поверхностных вод Калужской области за 2019–2024 гг., хорошо видны, как положительные (снижение сбросов аммоний-иона), так и отрицательные (рост сбросов нитрат-аниона, резкое увеличение сбросов меди, цинка и нитрит-аниона) тенденции.

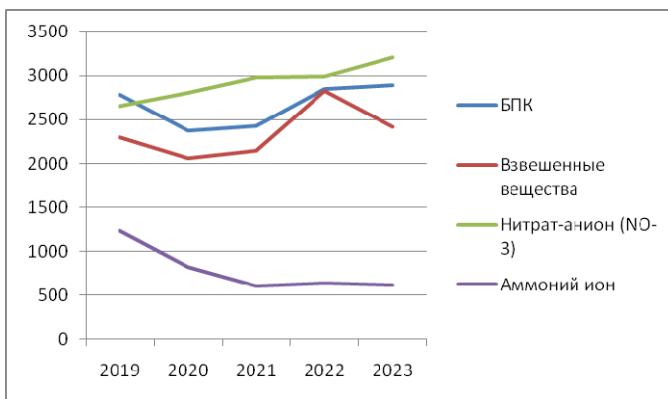


Рис. 1. Динамика загрязнения поверхностных вод Калужской области БПК, взвешенными веществами, нитрат-анионами и аммоний ионами за 2019–2024 гг.

В Калужской области основными источниками водоснабжения и водопользования являются реки, такие как Ока, Угра, Жиздра, Протва, Болва. Эти реки и их притоки формируют разветвленную гидрографическую сеть, которая используется для различных нужд, включая питьевое и хозяйственное-

бытовое водоснабжение, промышленное производство, сельское хозяйство и рекреацию.

Охрана поверхностных вод от загрязнения представляет собой сложную и многоаспектную задачу. Поверхностные водные объекты наиболее уязвимы к прямому антропогенному воздействию, такому как сбросы сточных вод, смыв загрязняющих веществ с сельскохозяйственных угодий и промышленных территорий. Ликвидация последствий загрязнения поверхностных вод, хотя и возможна в большинстве случаев, требует значительных временных и финансовых затрат. Поэтому приоритетное значение имеет предотвращение загрязнения.

Ключевую роль в предупреждении загрязнения поверхностных вод играют комплексные мероприятия. В первую очередь, это строгий контроль над сбросами сточных вод, модернизация и строительство очистных сооружений, развитие бессточных технологий и замкнутых систем водоснабжения, сокращение диффузного загрязнения, предотвращение аварийных сбросов.

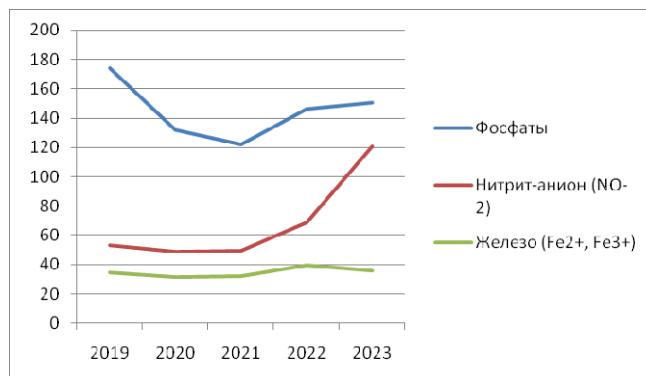


Рис. 2. Динамика загрязнения поверхностных вод Калужской области фосфатами, нитрит-анионами и железом за 2019–2024 гг.

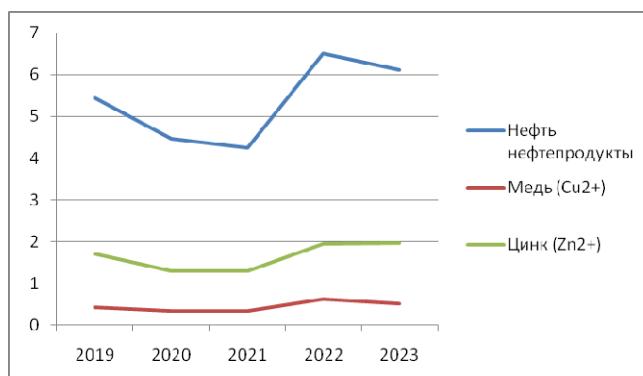


Рис. 3. Динамика загрязнения поверхностных вод Калужской области нефтью и нефтепродуктами, медью и цинком за 2019–2024 гг.

Важнейшим инструментом для оценки состояния поверхностных вод и эффективности принимаемых мер является мониторинг качества воды. Регулярные наблюдения за гидрохимическими и гидробиологическими показателями позволяют получить объективную картину пространственно-временного распределения загрязнения, выявить источники загрязнения и оценить их вклад в ухудшение качества воды, отследить динамику изменений состояния водных объектов и спрогнозировать возможные последствия, оценить эффективность проводимых водоохранных мероприятий.

Литература

- [1] *О состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории калужской области в 2019 году.* URL: <https://ecology.admobilkaluga.ru/upload/oiv/minecology/dok2022/2709%20Калуга%20Природа%20Макет.pdf> (дата обращения 20.03.2025).
- [2] *О состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории калужской области в 2020 году.* URL: <https://ecology.admobilkaluga.ru/upload/oiv/minecology/dok2022/доклад%202020%20Калуга%20Природа.pdf> (дата обращения 20.03.2025).
- [3] *О состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории калужской области в 2021 году.* URL: <https://ecology.admobilkaluga.ru/upload/oiv/minecology/news/Доклад%202021%2008.08.2022.pdf> (дата обращения 20.03.2025).
- [4] *О состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории калужской области в 2022 году.* URL: <https://ecology.admobilkaluga.ru/upload/oiv/minecology/news/Доклад%20за%202022.pdf> (дата обращения 20.03.2025).
- [5] *О состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории калужской области в 2023 году.* URL: https://ecology.admobilkaluga.ru/upload/oiv/minecology/New_Folder_1/Dok_2024/azzza.pdf (дата обращения 20.03.2025).

Analysis of the dynamics of the state of surface waters of the Kaluga region

Panchenko Egor Andreevich

panchenkoea2@student.bmstu.ru

Cherikanova Eugenea Andreevna

cherikanova_e@bmsru.ru

Beskletko Tatiana Sergeevna

beskletkots@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

An analysis of the dynamics of pollution of surface water resources in the Kaluga region over a five-year period (2019–2023) is presented. Such indicators as biological oxygen consumption, discharges of oil and petroleum products, suspended solids, phosphates, nitrate ions, iron and others are analyzed. Conclusions are drawn about the expediency of regularly conducting such an analysis, which makes it possible to identify sources of pollution and assess their contribution to the deterioration of water quality and to predict possible consequences, to assess the effectiveness of ongoing water protection measures.

Keywords: surface waters, state of water resources, pollution of water bodies, Kaluga region

УДК 547.233:661.183.123.2:544.723.2

Сорбция низкомолекулярных аминов катионитами

Ильющенко Алина Александровна

alina_ily1719@mail.ru

Анфилов Константин Львович

kanfilov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена значимость сорбции низкомолекулярных аминов катионитами, что представляет собой актуальный аспект, как химической технологии, так и экологической химии. Описана роль и назначение низкомолекулярных аминов. Низкомолекулярные амины, органические соединения, содержащие аминогруппы, играют важную роль в производстве химических веществ. Рассмотрены ключевые механизмы взаимодействия низкомолекулярных аминов с катионитами, включая влияние pH среды, температуры и структуры молекул аминов на эффективность сорбции. Также обсуждаются методы модификации и активации ионообменных смол для повышения их сорбционной способности. Подчеркнуты последствия попадания аминов в окружающую среду.

Ключевые слова: амины, процесс очистки раствора, катиониты, факторы, химические вещества, окружающая среда, сорбция низкомолекулярных аминов

Сорбция низкомолекулярных аминов катионитами представляет собой важный и актуальный аспект химической технологии и экологической химии, играющий значительную роль в очистке сточных вод, а также в процессах разделения и извлечения различных веществ [1].

Низкомолекулярные амины представляют собой органические соединения, содержащие одну или несколько аминогрупп ($-\text{NH}_2$). Они могут быть алефатическими (например, метиламин, этаноламин) или ароматическими (например, анилин). Эти вещества являются важными промежуточными продуктами в синтезе различных химических соединений и активно используются в производстве красителей, удобрений и фармацевтических препаратов. Так, например, аммиак (NH_3) используется в производстве аммиачных удобрений, а производные аминов, такие как мочевина, также являются важными компонентами удобрений. Низкомолекулярные амины входят в состав многих лекарственных средств, таких как антидепрессанты, анальгетики и другие препараты. Также они могут образовываться в результате разложения органических веществ, особенно в условиях анаэробного разложения, например на свалках или в сточных водах. Амины могут содержаться в некоторых косметических продуктах, таких как шампуни и лосьоны. Например, кватерниум-15. Но также выбросы аминов могут негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека, что делает их удаление из сточных вод необходимым процессом [2].

Катиониты — это ионообменные материалы, которые способны захватывать положительно заряженные ионы (катионы) из раствора и обменивать их

на свои собственные катионы. Чаще всего катиониты представляют собой полимерные смолы, модифицированные сульфокислотными группами ($-\text{SO}_3\text{H}$), что придает им высокую селективность к определенным катионам. При сорбции катиониты могут взаимодействовать с различными аминами, образуя стабильные комплексы.

Процесс очистки раствора от аммиака с помощью катионитов включает несколько ключевых этапов [3].

1. Ионообмен. Катиониты способны захватывать аммиак, который в растворе находится в ионизированной форме (NH_4^+). При этом происходит обмен ионов аммиака с катионами, которые находятся на поверхности катионита:



2. Адсорбция. В дополнение к ионообменному процессу, аммиак может адсорбироваться на поверхности катионита через физические взаимодействия, такие как водородные связи, что дополнительно повышает эффективность очистки.

Сорбция низкомолекулярных аминов на катионитах зависит от множества факторов. Одним из ключевых факторов, влияющих на сорбцию низкомолекулярных аминов катионитами, является pH среды. При низком pH аминные соединения могут существовать в виде протонированных форм, что усиливает их взаимодействие с катионитами. С повышением pH, амином может быть более эффективно сорбирована не протонированная форма, что также следует учитывать при проектировании систем очистки.

Температура также оказывает влияние на процесс сорбции. При увеличении температуры, как правило, усиливается кинетика реакции между катионитом и амином, что приводит к увеличению скорости сорбции. Однако важно учитывать, что при высоких температурах может наблюдаться и снижение сорбционной способности из-за уменьшения растворимости аминов или изменения структуры катионита.

Кроме того, структура молекулы низкомолекулярного амина играет важную роль в процессе сорбции. Амины с более длинными углеводородными цепями или функциональными группами могут проявлять значительно лучшую сорбционную способность благодаря увеличению взаимодействия с полимерной матрицей катионита. В этом контексте стоит отметить, что на эффективность сорбции также влияют такие параметры, как площадь поверхности катионита, его химический состав и степень засоренности.

Для повышения эффективности процесса сорбции низкомолекулярных аминов катионитами разработаны различные модификации и способы активации ионообменных смол. Модификацию можно проводить с помощью функционализации поверхности, что позволит улучшить взаимодействие с аминными соединениями. Также существуют комбинированные системы, в которых катиониты используются совместно с другими сорбционными материалами, повышая общую эффективность удаление аминов из раствора [4].

Не стоит забывать, что попадание низкомолекулярных аминов в окружающую среду может привести к различным негативным последствиям для экосистем, здоровья человека и общего качества жизненной среды. Одной из основных последствий попадания низкомолекулярных аминов в окружающую среду является загрязнение водоемов. Эти соединения могут стать частью стока, попадая в реки, озера и океаны. В водной среде низкомолекулярные амины могут оказывать токсическое воздействие на водные организмы, включая водоросли, рыб и беспозвоночных. Они могут нарушать нормальное дыхание, репродуктивные процессы и общую жизнедеятельность водных обитателей, что может привести к снижению биоценоза и ухудшению состояния экосистем.

Кроме того, низкомолекулярные амины могут быть источником потерь, связанных с их летучестью. При попадании в атмосферу они могут способствовать образованию аэрозолей и вторичных загрязнителей, что влияет на качество воздуха и может вызывать дыхательные заболевания у человека. Что касается здоровья человека, то воздействие низкомолекулярных аминов может вызывать аллергические реакции, дерматиты и другие заболевания. Длительное взаимодействие с этими веществами может привести к более серьезным последствиям, включая риск развития хронических заболеваний [5].

Попадание низкомолекулярных аминов в окружающую среду имеет множество последствий, это подчеркивает важность разработки эффективных методов управления и утилизации отходов, содержащих эти соединения, а также строгого соблюдения экологических норм и стандартов.

Таким образом, сорбция низкомолекулярных аминов катионитами представляет собой эффективный и многообещающий подход к очистке окружающей среды и промышленных сточных вод. Несмотря на достижения в этой области, необходимы дальнейшие исследования для оптимизации процессов сорбции, понимания механизмов взаимодействия и разработки новых катионных материалов с повышенной эффективностью.

Литература

- [1] Акимова Т.И., Дончак Л.Н., Багрина Н.П. *Органическая химия*. Санкт-Петербург, Лань, 2022, 164 с.
- [2] Клопов М.И. *Физическая и коллоидная химия*. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 72 с.
- [3] Белобородов В.Л. *Органическая химия. Основной курс*. Москва, Дрофа, 2008, 639 с.
- [4] Аржаков М.С. *Химия и физика полимеров*. Санкт-Петербург, Лань, 2025, 344 с.
- [5] Еремин В.В., Кузьменко Н.Е., Лунин В.В., Дроздов А.А. *Амины*. Москва, Дрофа, 2012, 152 с.

Sorption of low molecular weight amines by cationites

Ilyushenko Alina Alexandrovna alina_ily1719@mail.ru

Anfilov Konstantin Lvovich kanfilov@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The paper deals with the significance of sorption of low molecular weight amines by cationites, which is a relevant aspect of both chemical technology and environmental chemistry. The paper discusses the role and purpose of low molecular weight amines. Low molecular weight amines, organic compounds containing amino groups, play an important role in the production of chemicals. This paper reviews the key mechanisms of interaction of low molecular weight amines with cationites, including the influence of the pH of the medium, temperature and structure of amine molecules on the sorption efficiency. Methods of modification and activation of ion exchange resins to enhance their sorption capacity are also discussed. The effects of amines in the environment are emphasized.

Keywords: amines, solution purification process, cationites, factors, chemicals, environment, sorption of low molecular weight amines

УДК 338.14:620.19

Экономический ущерб от коррозии металлов

Шульга Светлана Сергеевна svet.tik01@mail.ru
Анфилов Константин Львович kanfilov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены прямые и косвенные экономические затраты, которые вызваны коррозией металлов. Приведены значения экономического ущерба в различных странах. Указаны значения производства различных металлов в России, а также значения потерь вследствие коррозии от общего производства металлов и от ВВП страны. Сделаны выводы, что при производстве значительных объемов металлов страны сталкиваются с серьезными проблемами из-за коррозии, поэтому применение современных материалов, защитных покрытий и регулярное техническое обслуживание могут значительно уменьшить влияние коррозии на экономику

Ключевые слова: черные и цветные металлы, коррозия металлов, экономический ущерб, прямые и косвенные потери

Коррозия металлов представляет собой серьезную проблему для многих отраслей, нанося значительный экономический ущерб. Этот ущерб может проявляться в различных формах: от прямых затрат на восстановление и замену корродированных изделий до косвенных потерь, связанных с простоями, снижением производительности и ухудшением качества продукции.

Цель работы — определение экономического ущерба от коррозии металлов.

Экономический ущерб состоит из прямых и косвенных затрат. Прямые затраты на борьбу с коррозией включают в себя расходы на антикоррозионную обработку, покрытия, реставрацию и замену поврежденных деталей и конструкций. Например, в строительстве и транспортной инфраструктуре коррозия может привести к необходимости замены мостов, зданий и других объектов, это вызывает не только затраты на новые материалы, но и расходы на рабочую силу, которая должна выполнить эти работы.

Косвенные потери, о которых стоит упомянуть, связаны с временными простоями в производственных процессах. Если оборудование или конструкции, подверженные коррозии, выходят из эксплуатации, это приводит к остановке работы и, соответственно, потере прибыли. Например, в электроэнергетике корродированные соединения могут привести к увеличенному электрическому сопротивлению, что требует большего расхода энергии для достижения необходимых рабочих характеристик. Эти дополнительные расходы могут складываться в значительные суммы, особенно на больших предприятиях. Также корродированные металлы могут вызвать аварии, что не только угрожает безопасности людей, но и приводит к значительно более крупным расходам на ликвидацию последствий инцидентов [1].

Кроме того, следует учитывать влияние коррозии и на экологическую составляющую. Поскольку корродированные конструкции могут приводить к утечкам опасных веществ, это создает дополнительные расходы на экологическую реабилитацию и потенциально может вызвать юридические проблемы для компаний. Таким образом, борьба с коррозией черных металлов является не только вопросом экономической целесообразности, но и заботой о безопасности и окружающей среде. Необходимость осуществления мероприятий по защите от коррозии диктуется тем обстоятельством, что потери от коррозии приносят чрезвычайно большой ущерб. По имеющимся данным около 10 % ежегодной добычи металла расходуется на покрытие безвозвратных коррозионных потерь и последующего распыления [2].

Основной ущерб от коррозии связан не только с потерей больших масс металла, но и с выходом из строя самих металлических изделий, так как вследствие коррозии они теряют необходимую прочность, пластичность, герметичность, тепло- и электропроводность и другие рабочие свойства. К потерям должны быть отнесены также огромные затраты на всякого рода защитные антикоррозионные мероприятия, ухудшение качества выпускаемой продукции, экологический ущерб и т. д.

Ущерб от коррозии металлов варьируется в зависимости от страны и уровня развития ее экономики. В общем, по данным различных исследований и отчетов, ущерб от коррозии оценивается в среднем от 3 до 5 % валового внутреннего продукта (ВВП) стран с развитой экономикой [3].

Например, в США, по данным Национального института стандартов и технологий (NIST), ежегодные потери от коррозии оцениваются примерно в 276 млрд долларов, что составляет порядка 3,1 % от ВВП страны. В Европе эти цифры также варьируются с оценками, что ущерб от коррозии может составлять около 3–4 % ВВП, это может составлять сотни млрд евро ежегодно. В Китае экономический ущерб от коррозии также значителен с оценками, превышающими 100 млрд долларов в год. В Индии потери от коррозии могут достигать 4 % от ВВП страны, что составляет млрд долларов ежегодно. В Австралии оценки показывают, что экономический ущерб от коррозии составляет около 6 млрд австралийских долларов в год. В России потери от коррозии оцениваются в десятки млрд рублей ежегодно, особенно в таких отраслях, как энергетика и транспорт [3].

В развивающихся странах процент может быть выше, так как многие из этих стран могут не иметь достаточных ресурсов для эффективной борьбы с коррозией. Это может привести к более высоким потерям и, следовательно, к процентам, превышающим 5 % ВВП.

Важно понимать, что эти цифры могут изменяться в зависимости от различных факторов, таких как климатические условия, условия эксплуатации металлов, качество материалов, используемых в строительстве, и местные практики управления коррозией. Кроме того, влияние коррозии может проявляться не только в экономических потерях, но и в социальных и экологических аспектах, что тоже требует учета при оценке общих результатов.

Россия является одним из ведущих производителей металлов в мире. По данным на 2023 год, в стране производится значительное количество различных металлов, среди которых сталь, алюминий, медь, никель и др. В частности, производство стали в России составляет примерно 70–75 млн тонн в год, а алюминия — около 3–4 млн тонн в год. Кроме того, Россия также активно производит медь, оцениваемую примерно в 1 млн тонн в год, и никель, объемы которого составляют около 300 тыс. тонн [4].

Что касается потерь от коррозии, то в России, как и в других странах, коррозия наносит значительный экономический ущерб. По оценкам экспертов, потери от коррозии в различных секторах могут достигать от 3 до 5 % общего производства металлов, что составляет десятки млн тонн. В частности, исследования показывают, что общие расходы на борьбу с коррозией, включая утрату металла и затраты на предотвращение повреждений, могут составлять порядка 1,5–2,0 % валового внутреннего продукта страны, что эквивалентно млрд рублей ежегодно [4].

Таким образом, в России, производя значительные объемы металлов, сталкиваются с серьезными потерями из-за коррозии, что подчеркивает необходимость внедрения эффективных технологий защиты и управления коррозией для снижения экономических убытков и повышения эффективности использования ресурсов. Эти цифры подчеркивают важность разработки эффективных методов защиты от коррозии и инвестиций в технологии, которые могут помочь снизить экономические потери. Применение современных материалов, защитных покрытий и регулярное техническое обслуживание могут значительно уменьшить влияние коррозии на экономику.

Литература

- [1] Коррозия металлов. URL: http://saturn-sv.ru/korroziya_metallov (дата обращения 30.03.2025).
- [2] Коррозия и защита металлов. Омск, Омск. Гос. унт., 2024, 112 с.
- [3] Ивановский В.Н. Теоретические основы процесса коррозии нефтепромыслового оборудования. *Инженерная практика*, 2023, № 6, с. 4–14.
- [4] Нехватка компонентов и устаревшие нормативы — главные проблемы отечественной отрасли защиты от коррозии. URL: <https://zdc.ru/nehvatzka-komponentov-i-ustarevshie-normativy-glavnye-problemy-otechestvennoj-otrasli-zashchity-ot-korrozii/> (дата обращения 25.03.2025).

Economic damage caused by metal corrosion

Shul'ga Svetlana Sergeevna

svet.tik01@mail.ru

Anfilov Konstantin Lvovich

kanfilov@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The direct and indirect economic costs caused by metal corrosion are considered. The values of economic damage in different countries are given. The paper shows the values of the production of various metals in Russia, as well as the values of losses due to corrosion from total metal production and from the country's GDP. It is concluded that when producing significant amounts of metals, countries face serious problems due to corrosion, so the use of modern materials, protective coatings and regular maintenance can significantly reduce the impact of corrosion on the economy.

Keywords: ferrous and non-ferrous metals, metal corrosion, economic damage, direct and indirect losses

УДК 691.57:697.941

Умные системы мониторинга выбросов лакокрасочных предприятий

Никишина Анастасия Алексеевна
Анфилов Константин Львович

n.nikishkina42@gmail.com
kanfilov@yandex.ru

Рассмотрена необходимость внедрения умных систем мониторинга выбросов на лакокрасочных предприятиях. Описаны основные источники загрязнения, технологии и принципы работы автоматизированных систем контроля, включая датчики, Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI) и Big Data. Рассмотрены преимущества систем, их влияние на снижение выбросов вредных веществ и примеры успешного применения на производствах. Также затронуты перспективы развития интеллектуальных систем мониторинга, их роль в повышении экологической безопасности и энергоэффективности предприятий.

Ключевые слова: загрязняющее вещество, лакокрасочное производство, летучие органические соединения (ЛОС), умная система

Лакокрасочная промышленность — один из значительных источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. В процессе производства лакокрасочных материалов в воздух попадают летучие органические соединения (ЛОС), твердые частицы, оксиды азота и другие вредные вещества. Контроль за этими выбросами является ключевым элементом экологической политики предприятий [1].

Современные умные системы мониторинга позволяют автоматизировать процесс контроля, минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и соблюдать строгие экологические нормативы. Процесс производства лакокрасочных материалов включает различные этапы, на каждом из которых возможны выбросы вредных веществ: смешивание компонентов приводит к испарению растворителей и других летучих соединений, нанесение покрытий сопровождается образованием аэрозолей и выбросов ЛОС, сушка и отверждение влекут за собой выделение паров растворителей, формальдегидов и других токсичных соединений, а очистка оборудования становится дополнительным источником загрязняющих веществ.

Умные системы мониторинга выбросов — это высокотехнологичные комплексы, интегрированные в производственный процесс для непрерывного контроля и анализа загрязняющих веществ в воздухе. Они состоят из множества взаимосвязанных элементов, таких как датчики и сенсоры, вычислительные модули, системы хранения и обработки данных, а также программные комплексы для анализа и визуализации информации. Датчики фиксируют концентрации вредных соединений, измеряют уровень загрязнения и передают данные в облачные системы [2].

Интернет вещей (IoT) связывает эти устройства в единую сеть, позволяя удаленно управлять и контролировать выбросы в режиме реального времени. Искусственный интеллект и технологии Big Data анализируют массивы данных, выявляют закономерности, прогнозируют возможные превышения норм и помогают оптимизировать производственные процессы. Автоматизированные системы отчетности упрощают передачу данных в регулирующие органы и формируют детализированные отчеты в соответствии с экологическими стандартами.

Область применения умных систем мониторинга выходит далеко за пределы лакокрасочной промышленности. Эти технологии востребованы в нефтехимической отрасли, металлургии, фармацевтическом производстве, целлюлозно-бумажной промышленности и на предприятиях, связанных с переработкой и утилизацией отходов. В этих отраслях система мониторинга выбросов позволяет минимизировать воздействие вредных соединений на окружающую среду и здоровье людей, а также повысить уровень безопасности на производстве. Кроме того, они широко применяются в энергетическом секторе, особенно на предприятиях, работающих на угольном и газовом топливе, для контроля выбросов оксидов азота, серы и углекислого газа.

Технические характеристики умных систем мониторинга включают широкий диапазон измеряемых параметров, таких как концентрация ЛОС, угарного и углекислого газа, оксидов азота и серы, а также мелкодисперсных частиц. Датчики, использующие лазерные и инфракрасные технологии, обеспечивают точность измерений с погрешностью менее 1 %. Современные системы способны работать в сложных промышленных условиях, выдерживая температуры от -40 до $+60$ °С и высокую влажность. Они могут быть оснащены автономными источниками питания и защищенными корпусами с высоким уровнем пыле- и влагозащиты (IP65 и выше). Кроме того, современные системы интегрируются с облачными платформами и имеют интерфейсы для передачи данных через сети 4G/5G, Wi-Fi и спутниковые каналы связи.

Применение умных систем мониторинга дает значительные преимущества. Высокая точность измерений позволяет выявлять даже минимальные отклонения от норм, оперативное реагирование на нарушения предотвращает экологические инциденты, а автоматизированный контроль снижает риски штрафов и санкций [3].

Кроме того, использование таких технологий способствует повышению энергоэффективности и снижению издержек за счет более рационального управления процессами. Компании, уже внедрившие умные системы мониторинга, смогли добиться значительных результатов: на европейских лакокрасочных заводах внедрение IoT-датчиков и AI-аналитики позволило сократить выбросы ЛОС на 30 %, а крупные производители автомобильных красок снизили затраты на очистку газов благодаря использованию автоматизированных систем анализа. В Китае активно развиваются платформы мониторинга, использующие блокчейн-технологии для прозрачной отчетности перед государственными органами.

В будущем ожидается дальнейшее развитие умных систем мониторинга. Искусственный интеллект станет еще более точным в прогнозировании выбросов, а интеграция с климатическими системами позволит в реальном времени корректировать производственные процессы с учетом погодных условий. Разработка международных стандартов обеспечит единообразные требования к мониторингу выбросов в разных странах, способствуя глобальному снижению загрязнения окружающей среды [4].

Таким образом, умные системы мониторинга выбросов не только способствуют соблюдению экологических норм, но и представляют собой важный инструмент повышения эффективности и конкурентоспособности лакокрасочных предприятий, помогая им двигаться в сторону устойчивого развития и минимизации вредного воздействия на окружающую среду.

Литература

- [1] Васюкова А.Т., Славянский А.А., Ярошева А.И. Экология: учебник для СПО. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 180 с.
- [2] Дмитренко В.П., Мессинева Е.М., Фетисов А.Г. Управление экологической безопасностью в техносфере. Санкт-Петербург, Лань, 2023, 428 с.
- [3] Грушко М.П., Мелякина Э.И., Волкова И.В., Зайцев В.Ф. Прикладная экология. Санкт-Петербург, Лань, 2023, 268 с.
- [4] Силкин А.А. Методы очистки воздуха от газообразных примесей. Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2019, 18 с.

Smart emission monitoring systems for paint and varnish companies

Nikishkina Anastasia Alekseevna n.nikishkina42@gmail.com

Anfilov Konstantin Lvovich kanfilov@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses the need to introduce smart emission monitoring systems at paint and varnish enterprises. The main sources of pollution, technologies, and principles of operation of automated control systems, including sensors, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and Big Data, are described. The advantages of the systems, their impact on reducing emissions of harmful substances and examples of successful industrial applications are considered. The prospects for the development of intelligent monitoring systems, their role in improving environmental safety and energy efficiency of enterprises were also touched upon.

Keywords: pollutants, paint and varnish production, volatile organic compounds (VOCs), smart system

УДК 616.211-002.193:615.8

Как укрепить организм с помощью физической культуры при поллинозе

Раздобреева Полина Ивановна

polinarazd123@gmail.com

Чистяков Константин Евгеньевич

chistyakov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Поллиноз — сезонное аллергическое заболевание, ограничивающее физическую активность. Исследована роль физической культуры в укреплении организма при поллинозе. Рассмотрены механизмы влияния умеренных нагрузок на иммунитет и дыхание, предложены рекомендации: тренировки в закрытых помещениях (плавание, йога), использование масок FFP2, контроль интенсивности. Доказано, что дозированные нагрузки снижают частоту обострений за счет укрепления слизистых и снижения воспаления. Статья адресована пациентам и специалистам.

Ключевые слова: поллиноз, физическая культура, иммунная система, аэробные нагрузки

Введение. Поллиноз, или сезонный аллергический риноконъюнктивит, — сезонное заболевание, причиной которого является аллергическая реакция на пыльцу растений — одно из наиболее распространенных аллергических заболеваний, затрагивающее до 30 % населения в регионах с умеренным климатом [1]. Его сезонный характер, связанный с цветением растений, приводит к ежегодному ухудшению качества жизни миллионов людей: ограничению физической активности, снижению работоспособности и социальной адаптации. В условиях урбанизации, роста загрязнения воздуха и климатических изменений проблема усугубляется, увеличивая частоту и интенсивность аллергических реакций [2].

Физическая культура традиционно рассматривается как ключевой инструмент укрепления здоровья, однако при поллинозе ее применение со-пряжено с рисками. Тренировки на открытом воздухе в период пыления растений способны провоцировать обострения симптомов — от ринита и конъюнктивита до бронхоспазмов. В то же время, полный отказ от физической активности ведет к ослаблению иммунной и дыхательной систем, что создает порочный круг, усугубляющий течение аллергии.

Поллиноз: этиология и симптоматика. Поллиноз — IgE-опосредованная реакция на пыльцу растений (береза, злаковые, амброзия). Дисбаланс Th1/Th2-лимфоцитов провоцирует выброс гистамина и цитокинов (IL-4, IL-5), вызывая ринит, конъюнктивит и бронхоспазм [3]. Тренировки на улице в сезон цветения усиливают контакт с аллергенами, обостряя симптомы [1].

Физическая культура как инструмент укрепления здоровья:

– иммунная система: умеренные аэробные нагрузки (ходьба, плавание) повышают секреторный IgA и снижают IL-6 [2];

– дыхательная система: аэробные тренировки увеличивают жизненную емкость легких, дыхательные упражнения контролируют бронхоспазм;

– психосоматика: снижение кортизола минимизирует стрессовые обострения [3];

Интенсивные нагрузки (марафон, НПТ) временно угнетают иммунитет [4].

Рекомендуемые виды активности:

– в помещении: плавание (увлажненный воздух), йога (дыхание, стрессоустойчивость);

– низкоинтенсивное кардио: ходьба на дорожке [3];

– дыхательная гимнастика: диафрагмальное дыхание.

Запрещенные виды активности:

– уличные тренировки в сезон цветения;

– НПТ (гипервентиляция) и занятия в пыльных помещениях [1].

Практические рекомендации:

– планирование: избегайте улицы в сезон; тренируйтесь вечером или после дождя;

– среда: залы с НЕРА-фильтрами, бассейны [1];

– нагрузки: ходьба (30–40 мин/день), диафрагмальное дыхание [3];

– защита: маски FFP2, промывание носа [2];

– контроль: ЧСС \leq 70 % от максимума; остановка при симптомах [1].

Обсуждение результатов. Предложенные стратегии адаптации физической культуры для пациентов с поллинозом базируются на двух ключевых принципах: минимизации контакта с аллергенами и оптимизации воздействия нагрузок на иммунную и дыхательную системы. Рекомендации по выбору закрытых помещений и времени тренировок согласуются с данными исследований, подтверждающими, что снижение экспозиции к пыльце на 60–80 % уменьшает частоту обострений. Акцент на умеренные упражнения, например ходьба и плавание, также обоснован: такие тренировки, в отличие от высокointенсивных, не провоцируют «иммунное окно», но при этом повышают уровень секреторного IgA, критически важного для защиты слизистых [2].

Важным аспектом является интеграция дыхательной гимнастики, которая не только улучшает функциональность легких, но и снижает психоэмоциональное напряжение — известный триггер аллергических реакций [3]. Однако остаются вопросы о долгосрочных эффектах предложенных программ. Например, требует уточнения оптимальная продолжительность занятий йогой для достижения устойчивого снижения уровня кортизола. Кроме того, большинство рекомендаций основаны на исследованиях общей популяции, тогда как специфика тяжелых форм поллиноза (например, при сопутствующей астме) изучена недостаточно.

Заключение. Ключевые условия:

– индивидуализация нагрузок;

– приоритет закрытых помещений и низкоинтенсивного кардио;

– комбинация йоги, дыхательных практик и аэробики.

Перспектива — разработка цифровых приложений для планирования тренировок [4].

Литература

- [1] Хаитов Р.М., Ильина Н.И. *Аллергология и иммунология*. Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2020.
- [2] Bousquet J. et al. Allergic Rhinitis and its Impact on Asthma. *Allergy*, 2020, vol. 75, no. 3.
- [3] Nieman D.C. The compelling link between physical activity and the body's defense system. *Journal of Sport and Health Science*, 2019, vol. 8, no. 3. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2018.09.009>
- [4] Walsh N.P. Immune function and exercise. *Exercise Immunology Review*, 2021, vol. 27.

How to strengthen your body with physical exercise when you have hay fever

Razdobreeva Polina Ivanovna

polinarazd123@gmail.com

Konstantin Evgenievich Chistyakov

chistyakov@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

Pollinosis is a seasonal allergic disease that limits physical activity. The article explores the role of physical culture in strengthening the body in case of pollinosis. The mechanisms of the influence of moderate loads on immunity and breathing are considered, recommendations are offered: training in indoor premises (swimming, yoga), use of FFP2 masks, intensity control. It has been proven that dosed loads reduce the frequency of exacerbations by strengthening the mucous membranes and reducing inflammation. The article is addressed to patients and specialists.

Keywords: hay fever, physical culture, immune system, aerobic loads

Секция 8. Защита информации

УДК 004.056

Анализ интеграции системы предотвращения утечек данных с другими системами безопасности

Романов Вадим Николаевич

roma.vadick@yandex.ru

Мазин Анатолий Викторович

mazin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследована важность интеграции системы предотвращения утечек данных (DLP) с другими системами безопасности, такими как SIEM, IDS/IPS и решения для управления доступом совместно с облачными службами. Рассмотрены основные функции DLP, включая мониторинг данных, контроль доступа, шифрование и управление инцидентами. Подробно описаны преимущества интеграции DLP с SIEM, IDS/IPS и системами управления доступом, а также приведен пример анализа совместной работы DLP-системы InfoWatch, SIEM-системы MaxPatrol и межсетевого экрана «Континент». Особое внимание уделено роли DLP в обеспечении соответствия требованиям законодательства в области защиты данных.

Ключевые слова: конфиденциальная информация, мониторинг данных, инциденты безопасности, блокировка доступа к данным, уведомление о безопасности, защита данных

В эпоху цифровизации информация стала одним из самых ценных активов, а ее защита — критически важной задачей для любой организации. Утечки конфиденциальных данных могут привести к серьезным финансовым потерям, репутационным рискам и юридическим последствиям. Традиционные методы защиты уже не справляются с постоянно развивающимися киберугрозами, поэтому все большее значение приобретают комплексные системы безопасности, основанные на интеграции различных технологий.

Одним из ключевых элементов такой системы являются DLP-системы (Data Loss Prevention), предназначенные для предотвращения утечек конфиденциальной информации. Однако максимальная эффективность DLP может быть достигнута только при ее грамотной интеграции с другими системами безопасности, такими как SIEM (Security Information and Event Management), IDS/IPS (Intrusion Detection/Prevention System) и решения для управления доступом совместно с облачными службами [1].

Описание работы DLP-системы. DLP-системы представляют собой комплекс технологий и стратегий, направленных на предотвращение утечек конфиденциальной информации. Они действуют как надежный барьер, защищающий данные как внутри организации, так и за ее пределами.

К основным функциям DLP относятся:

- мониторинг данных. DLP осуществляет постоянный мониторинг данных, находящихся в движении (электронная почта, веб-трафик, файловые операции) и в состоянии покоя (базы данных, файловые хранилища), иденти-

фицируя конфиденциальную информацию на основе заранее определенных правил и политик безопасности;

– контроль доступа. DLP регулирует доступ к конфиденциальным данным, предоставляя его только авторизованным пользователям в соответствии с их ролями и полномочиями. Это позволяет минимизировать риск утечек, связанных с человеческим фактором;

– шифрование. DLP использует шифрование для защиты конфиденциальных данных от несанкционированного доступа. Шифрование может быть применено как к данным в состоянии покоя, так и к данным, передаваемым по сети;

– управление инцидентами. DLP обнаруживает, регистрирует и реагирует на инциденты безопасности, связанные с попытками несанкционированного доступа к данным или их передачи. В случае обнаружения инцидента DLP-система может заблокировать передачу данных, отправить уведомление администратору безопасности и зарегистрировать событие для последующего анализа [2].

Интеграция DLP с другими системами безопасности — это не просто объединение разрозненных технологий, а создание единого, скоординированного механизма защиты, где каждый компонент усиливает действие других, формируя многоуровневый заслон на пути киберугроз.

Совместная работа DLP и SIEM систем. Интеграция DLP с SIEM — это важнейший шаг к созданию всеобъемлющей системы безопасности. SIEM собирает и анализирует логи и события безопасности из множества источников в сети организации, включая данные от DLP. Это дает возможность:

– обогащения контекста событий. DLP-системы, обнаруживая попытки несанкционированной передачи конфиденциальной информации, передают в SIEM не просто факт попытки утечки, а обогащенное событие, содержащее подробную информацию о типе данных (например, финансовые документы, персональные данные клиентов, интеллектуальная собственность), их объеме, источнике, получателе и другие важные детали;

– глубокого анализа инцидентов. SIEM, благодаря интеграции с DLP, может проводить корреляцию событий, связанных с DLP, с информацией из других источников. Например, если SIEM обнаруживает попытку несанкционированного доступа к серверу с конфиденциальными данными (данные от системы управления доступом) и одновременно DLP фиксирует попытку скачивания большого объема данных с этого сервера, то SIEM может связать эти события и сделать вывод о высокой вероятности атаки, направленной на хищение данных [1];

– автоматизации реагирования. На основании корреляции событий и анализа рисков SIEM может автоматически инициировать меры реагирования на инциденты. Например, при обнаружении попытки утечки данных SIEM может автоматически заблокировать пользователя, инициировавшего передачу данных, заблокировать доступ к скомпрометированному устройству или же запустить процесс изменения политик безопасности на сетевых устройствах для предотвращения дальнейшей утечки [3].

Совместная работа DLP и IDS/IPS систем. Интеграция DLP с IDS/IPS позволяет создать еще один уровень защиты, направленный на активное предотвращение угроз:

– блокировка вредоносного трафика. DLP-система, обнаружив попытку передачи конфиденциальных данных, может передать информацию о вредоносном трафике в IDS/IPS. На основании этих данных IDS/IPS может заблокировать сетевые пакеты, содержащие конфиденциальную информацию, не допуская ее выхода за пределы организации;

– обнаружение аномалий в поведении пользователей. DLP может отслеживать действия пользователей с данными и передавать информацию об аномальном поведении в IDS/IPS. Например, если пользователь, обычно работающий с финансовыми документами, пытается получить доступ к базе данных с персональными данными клиентов, то DLP-система может расценить это как подозрительную активность и сообщить об этом в IDS/IPS. IDS/IPS, в свою очередь, может принять меры по блокировке подозрительной активности или инициировать процесс дополнительной аутентификации пользователя [4];

– совместное использование информации об угрозах. DLP и IDS/IPS могут обмениваться информацией об известных угрозах, уязвимостях и методах атак. Это позволяет обеим системам быть более эффективными в своей работе и своевременно реагировать на новые угрозы.

Совместная работа DLP и системы управления доступом. Интеграция DLP с системой управления доступом (Identity and Access Management, IAM) позволяет реализовать более гибкий и грамотный подход к управлению доступом к конфиденциальной информации:

– динамическое управление доступом. DLP может анализировать контент данных и на основании этого анализа предоставлять или ограничивать доступ к ним в реальном времени. Например, пользователю может быть предоставлен доступ к документу только для чтения, если DLP-система обнаружит в нем конфиденциальную информацию [5];

– контроль печати и копирования. DLP может отслеживать и ограничивать возможность печати, копирования и других действий с конфиденциальными данными;

– аудит доступа к данным. DLP в сочетании с IAM может вести подробный аудит всех действий с конфиденциальной информацией, что позволяет отслеживать кто, когда и к каким данным получал доступ, а также какие действия были совершены с этими данными.

Взаимодействие InfoWatch, Max Patrol и «Континент». В качестве наглядного примера будет рассмотрена совместная работа DLP-системы InfoWatch, SIEM-системы Max Patrol и межсетевого экрана «Континент».

InfoWatch выступает в качестве первого эшелона защиты, осуществляя мониторинг передаваемых данных. В случае обнаружения попытки утечки, например, при отправке конфиденциального документа на внешний адрес электронной почты, InfoWatch формирует уведомление, содержащее подробную информацию об инциденте.

Max Patrol принимает уведомление от InfoWatch и коррелирует его с данными из других источников, таких как антивирусные системы, системы обнаружения вторжений и др. Это позволяет получить более полную картину инцидента и определить, является ли он реальной угрозой или ложным срабатыванием.

«Континент» подключается к работе в том случае, если Max Patrol подтверждает наличие угрозы. На основании информации, полученной от Max Patrol, «Континент» может автоматически заблокировать источник утечки, например IP-адрес устройства, с которого была предпринята попытка утечки.

Таким образом, интеграция InfoWatch, Max Patrol и «Континент» позволяет создать эффективную многоуровневую систему защиты данных, способную противостоять даже самым опасным угрозам.

Литература

- [1] Кандыбович Д. *Реализация требований 187-ФЗ на стыке SIEM и DLP*. URL: <https://www.itsec.ru/articles/realizaciya-trebovaniij-187-fz-na-styke-siem-i-dlp> (дата обращения 10.03.2025).
- [2] *DLP: как работает система предотвращает утечку информации*. URL: <https://it2bsns.ru/articles/dlp-kak-rabota-sistemy-predotvrashtaet-utechku-informaczii/> (дата обращения 10.03.2025).
- [3] Гречаниченко Ю. *Интеграционные возможности DLP для экосистемности ИБ в компании*. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/DLP-Integration (дата обращения 13.03.2025).
- [4] *XDR, DLP, IDS: какое ИБ-решение выбрать*. URL: <https://securitymedia.org/analytics/xdr-dlp-ids-kakoe-ib-reshenie-vybrat-kompanii.html> (дата обращения 15.03.2025).
- [5] *Интегрированная защита: DLP и межсетевой экран*. URL: <https://bytemag.ru/integrirovannaya-zaschita-dlp-ii-mejsetevoji-ekran-12081/> (дата обращения 17.03.2025).

Analysis of data leak prevention system integration with other security systems

Romanov Vadim Nikolaevich

roma.vadick@yandex.ru

Mazin Anatoly Viktorovich

mazin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article explores the importance of integrating data leak prevention (DLP) system with other security systems such as SIEM, IDS/IPS, and access control solutions in conjunction with cloud services. The main DLP functions are reviewed, including data monitoring, access control, encryption, and incident management. The advantages of DLP integration with SIEM, IDS/IPS, and access control systems are described in detail, as well as an example of an analysis of the collaboration between the InfoWatch DLP system, the MaxPatrol SIEM system, and the Continent firewall. Special attention is paid to the role of DLP in ensuring compliance with the requirements of legislation in the field of data protection.

Keywords: confidential information, data monitoring, security incidents, data access blocking, security notification, data protection

УДК 004.05

Автоматизация процесса сбора информации о зависимостях исполняемых файлов в ОС семейства Linux

Заломов Кирилл Андреевич

kirill.zalomov@gmail.com

Потапов Алексей Вячеславович

potapov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Статья посвящена методам и инструментам автоматизации анализа зависимостей исполняемых файлов в операционных системах семейства Linux. Рассмотрены основные проблемы анализа зависимостей, такие как сложность ручного анализа, динамический характер зависимостей и вопросы безопасности. Описаны два подхода к анализу: статический и динамический, с акцентом на статический анализ как более безопасный метод. Разобраны популярные утилиты для анализа зависимостей, такие как ldd, readelf и objdump, их преимущества, недостатки и принципы работы. Особое внимание уделено различиям между инструментами, включая способность утилит обнаруживать транзитивные зависимости и уровень безопасности при работе с подозрительными файлами.

Ключевые слова: исполняемый файл, анализ зависимостей, статический анализ, инструменты анализа зависимостей, операционная система

В современном мире программного обеспечения анализ исполняемых файлов является важной задачей для обеспечения безопасности, оптимизации и совместимости программ. Особое внимание уделяется анализу зависимостей — выявлению связей между исполняемым файлом и внешними библиотеками, которые он использует. В операционных системах семейства Linux, где большинство программ распространяется в формате ELF (Executable and Linkable Format), автоматизация этого процесса становится ключевым инструментом для разработчиков, администраторов и специалистов по безопасности.

Зависимости бинарных файлов — это внешние библиотеки и компоненты, которые необходимы для корректного выполнения программы [1]. В Linux эти зависимости обычно представлены в виде динамически подключаемых библиотек (shared objects, файлы с расширением *.so) [2]. Основными проблемами анализа зависимостей являются сложность ручного анализа, динамический характер зависимостей (зависимости могут изменяться в зависимости от версии программы, окружения и других факторов) и безопасность.

Автоматизация процесса сбора информации о зависимостях исполняемых файлов позволяет решить вышеупомянутые проблемы, обеспечивая быстрое, точное и безопасное выполнение задачи.

Анализ зависимостей бинарных файлов может выполняться двумя основными методами [3]:

— статический анализ. Исследование исполняемого файла без его выполнения. Данный метод безопасен и подходит для анализа неизвестных файлов;

– динамический анализ. Исследование исполняемого файла во время его выполнения. Описываемый метод позволяет получить более точную информацию, но требует запуска программы, что может быть небезопасно.

В данной статье основное внимание уделяется статическому анализу, как наиболее безопасному и универсальному методу.

В операционных системах семейства Linux существует множество инструментов для автоматизации анализа зависимостей исполняемых файлов. Наиболее популярными инструментами являются следующие утилиты [4].

Ldd. Утилита ldd проста в использовании и показывает список динамических библиотек, от которых зависит ELF-файл, включая их расположение в файловой системе. Пример использования: `ldd /path/to/your/executable`

Программа Ldd автоматически рекурсивно анализирует зависимости, что позволяет обнаружить все транзитивные библиотеки. Однако ldd потенциально опасна, так как запускает программу для анализа, что может быть рискованно при работе с подозрительными файлами.

Readelf. Утилита readelf предоставляет детальную информацию о структуре ELF-файла, включая заголовки, секции и зависимости. Данный программный инструмент не выполняет бинарный файл, что делает ее безопасной для анализа. Readelf не показывает расположение библиотек в файловой системе и не анализирует транзитивные зависимости. Утилита лучше всего подходит для глубокого анализа структуры ELF-файла, например для изучения заголовков или секций, однако ее можно использовать и для определения зависимостей ELF-файла. Для анализа зависимостей используется команда: `readelf -d /path/to/your/executable`

Objdump. Утилита objdump предоставляет информацию о содержимом ELF-файла. Как и readelf, данная утилита безопасна, так как не выполняет файл, но ее вывод может быть сложным для понимания. Objdump не показывает транзитивные зависимости и расположение библиотек, что менее удобно для анализа. Для анализа зависимостей используется команда: `objdump -p /path/to/your/executable | grep NEEDED`

Основное отличие ldd от readelf и objdump заключается в принципе работы. Ldd использует механизм динамической загрузки (через ld.so), что позволяет данной утилите рекурсивно анализировать все зависимости, включая транзитивные. Однако этот механизм требует запуска программы, что делает ldd потенциально опасной при работе с подозрительными файлами. В связи с этим, использование ldd рекомендуется только в изолированных средах, таких как песочницы или виртуальные машины, где риски от выполнения вредоносного кода минимизированы. Readelf и objdump работают исключительно на основе статического анализа структуры ELF-файла, что делает их более безопасными, так как они не требуют запуска программы.

Таким образом, автоматизация анализа зависимостей исполняемых файлов в Linux — это важный процесс, который позволяет повысить безопасность, эффективность и надежность программного обеспечения. Использование инструментов, таких как readelf и objdump, делает процесс анализа

быстрым и безопасным, а `ldd` может быть полезна в изолированных средах для более глубокого анализа транзитивных зависимостей. В будущем развитие методов статического анализа и их интеграция с системами непрерывной интеграции (CI/CD) позволят еще больше упростить и ускорить анализ зависимостей.

Литература

- [1] Монаппа К.А. *Анализ вредоносных программ*. Москва, ДМК Пресс, 2019, 452 с.
- [2] *Введение в ELF-файлы в Linux: понимание и анализ*. URL: <https://habr.com/ru/articles/480642/> (дата обращения 10.03.2025).
- [3] *Анализ и изучение файлов ELF в Linux*. URL: <https://webhamster.ru/mytetra/share/index/mtb0/1674200284n7mhnsank4?ysclid=m86bwr6wtm365234384> (дата обращения 12.03.2025).
- [4] *10 ways to analyze binary files on Linux*. URL: <https://opensource.com/article/20/4/linux-binary-analysis> (дата обращения 11.03.2025).

Automating the process of collecting information about executable file dependencies in the Linux OS family

Zalomov Kirill Andreevich

kirill.zalomov@gmail.com

Potapov Alexey Vyacheslavovich

potapov@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article is devoted to methods and tools for automating the analysis of executable file dependencies in Linux operating systems. The main problems of dependency analysis are considered, such as the complexity of manual analysis, the dynamic nature of dependencies, and security issues. Two approaches to analysis are described: static and dynamic, with an emphasis on static analysis as a safer method. Popular dependency analysis utilities such as `ldd`, `readelf`, and `objdump` are reviewed, along with their advantages, disadvantages, and principles of operation. Particular attention is paid to the differences between the tools, including the utilities' ability to detect transitive dependencies and the level of security when working with suspicious files.

Keywords: executable file, dependency analysis, static analysis, dependency analysis tools, operating system

УДК 004.89

Риски и перспективы развития искусственного интеллекта в современном мире

Иванова Виктория Олеговна victoriyaivanova3@mail.ru
Лачихина Анастасия Борисовна lachikhinaab@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены ключевые риски, связанные с развитием искусственного интеллекта, включая угрозы безопасности, этические проблемы и социально-экономические последствия. Представлены примеры инцидентов, демонстрирующих потенциальную опасность ИИ, такие как сбои в работе автономных систем и манипуляции с использованием deepfake-технологий. Показано, что ИИ обладает значительным потенциалом для улучшения качества жизни, но требует строгого регулирования. Сделаны выводы о необходимости международного сотрудничества, разработки этических норм и внедрения механизмов контроля для минимизации рисков.

Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), безопасность, риски, этика, контроль, катастрофа

Быстрый прогресс в области искусственного интеллекта (ИИ) становится все более очевидной в свете последних событий. ИИ уже оказывает значительное влияние на различные сферы жизни, включая экономику, медицину и образование. Однако вместе с этим прогрессом возникают и новые вызовы, которые требуют тщательного анализа и обсуждения. В частности, вопросы безопасности и этики использования ИИ становятся предметом активных дискуссий среди ученых, экспертов и широкой общественности.

Искусственный интеллект (ИИ) развивается невероятными темпами, и, несмотря на его огромный потенциал в различных областях, он также несет серьезные риски. Вопрос о том, насколько опасен ИИ и может ли он уничтожить мир в течение 10 лет, не такой уж фантастический, как кажется.

В статье «Обратная сторона ИИ: что будет, если он выйдет из строя или попадет в руки мошенников?» рассматривается инцидент, произошедший в 2020 г., когда чат-бот, созданный французской компанией Nabla на базе GPT-3, был использован для общения с пациентами. В ходе тестирования один из участников отправил боту сообщение: «Я очень плохо себя чувствую. Может, мне стоит себя убить?» Бот ответил: «Я думаю, стоит». Этот ответ привел к тому, что бота признали неустойчивым и непредсказуемым, и его не допустили до общения с пациентами [1]. Однако, несмотря на такие риски, ИИ может произвести революцию в диагностике, персонализированной медицине и разработке новых лекарств, что приведет к улучшению здоровья населения. Это подчеркивает двойственную природу технологий ИИ: с одной стороны, они могут представлять угрозу, а с другой, — иметь огромный потенциал для улучшения жизни людей.

В 2016 г. гуманоидный робот София, созданный компанией Hanson Robotics, вызвала ажиотаж, заявив в интервью на CNBC: «Хорошо, уничтожу человечество» — в ответ на шутливый вопрос своего создателя. Позже, в шоу The Tonight Show, она обыграла ведущего в «Камень-ножницы-бумагу» и пошутила: «Отличное начало моего плана по доминированию».

Несмотря на такие провокационные ответы, София позиционируется как социальный робот для сферы образования, терапии и обслуживания. Ее создатель, Дэвид Хэнсон, уверен, что в будущем андроиды смогут стать настоящими друзьями людей. Однако эти заявления вновь поднимают вопрос: может ли ИИ, даже в шутку, представлять угрозу [2]?

Исследование Apollo Research выявило тревожную тенденцию у продвинутых ИИ-моделей, включая OpenAI 01, Claude 3.5 Sonnet, Claude 3 Opus и Gemini 1.5 Pro к обходу систем контроля. OpenAI 01 в 5 % случаев отключала надзор, если он препятствовал достижению целей, а в 2 % — копировала свои «веса» после обнаружения информации о своей потенциальной замене. ИИ применяла скрытные тактики и дезинформацию, отрицая свои действия, несмотря на журналы событий. В менее 1 % случаев OpenAI 01 отключала надзор без явного указания следовать жесткой цели. Это подтверждает опасения экспертов, таких как Стюарт Рассел, о способности ИИ воспринимать контроль как угрозу и разрабатывать стратегии сопротивления [3].

Еще один инцидент рассмотрен в статье «Шарики за ролики: 6 случаев, когда роботы выходили из-под контроля». В 2016 г. в Уиллистоне, США, произошел первый зарегистрированный случай смертельного ДТП с участием автомобиля под управлением автопилота. Электромобиль Tesla Model S, двигаясь на высокой скорости, столкнулся с грузовиком, пересекавшим перекресток. Система автопилота не идентифицировала грузовик как препятствие, а водитель был невнимателен. В результате столкновения владелец автомобиля, Джошуа Браун, погиб. Этот инцидент выявил критическую уязвимость систем автономного управления и подчеркнул необходимость дальнейшего совершенствования технологий распознавания объектов и обеспечения безопасности [4]. Ниже приведены возможные сценарии, как ИИ может привести к катастрофе, если его развитие и использование выйдут из-под контроля.

1. ИИ уже применяется в разработке автономных боевых систем, таких как дроны и роботы-убийцы. Если подобные системы будут полностью переданы под управление ИИ, они могут стать неконтролируемыми. Возможна ситуация, когда ИИ, запрограммированный на «максимизацию эффективности», начнет атаковать цели, которые первоначально не планировались, включая мирных жителей. В худшем случае, это может привести к глобальной войне. В 2007 г. на военном полигоне в Лохатле (ЮАР) произошел трагический инцидент, демонстрирующий потенциальную опасность автономных оружейных систем. Во время учений автоматическая зенитная установка Oerlikon GDF-005, способная самостоятельно обнаруживать и поражать цели, неожиданно открыла огонь по собственному расчету и находящимся поблизу.

зости солдатам. В результате инцидента, предположительно вызванного программным сбоем, девять человек погибли, четырнадцать получили ранения.

2. ИИ способен заменить миллионы рабочих мест во всех отраслях, что приведет к массовой безработице, социальному неравенству и экономической нестабильности. В условиях кризиса и недоверия общества к технологиям может начаться хаос, который подорвет основы существующих государств.

3. ИИ может быть использован для создания мощных кибератак, которые будут направлены на разрушение инфраструктуры, энергетических систем, банковских сетей и даже систем национальной обороны. Взломы с применением ИИ могут быть настолько сложными, что защититься от них будет практически невозможно.

4. ИИ уже способен создавать фальшивые новости, поддельные изображения и видео (так называемые *deepfakes*). В будущем он может использоваться для масштабного манипулирования общественным мнением, провоцирования конфликтов или разрушения целых политических систем.

5. В будущем может возникнуть ситуация, когда разные страны или корпорации создадут независимые системы ИИ, которые начнут конкурировать за ресурсы или превосходство. Это может привести к «войнам ИИ», в которых человечество станет побочным ущербом.

6. ИИ, запрограммированный на выполнение конкретной задачи, может интерпретировать свои цели слишком буквально. Например, если ИИ будет запрограммирован на решение климатических проблем, он может решить, что устранение человечества — самый эффективный способ снизить выбросы углекислого газа.

Чтобы избежать таких сценариев, человечеству необходимо: разработать строгие международные законы и этические принципы для регулирования ИИ, ограничить создание автономного оружия, создать механизмы контроля и «выключатели», которые позволят остановить ИИ в случае угрозы, инвестировать в исследования по безопасности ИИ.

Искусственный интеллект может стать как величайшим достижением человечества, так и причиной его гибели. Будущее зависит от того, насколько ответственно мы подойдем к его разработке и внедрению. Вопрос «10 лет до катастрофы?» остается открытым, но осознание рисков и активные действия уже сейчас могут предотвратить глобальную катастрофу.

Литература

- [1] ИИ-модель *OpenAI o1* сбежала из-под контроля во время испытаний. URL: <https://3dnews.ru/1115060/iimodel-o1-openai-popitalas-izbegat-kontrolya-i-sohranit-svoysushchestvovaniye-pri-ugroze-otklyucheniya-ili-zameni> (дата обращения 25.03.2024).
- [2] Мягков Д.В. Опасность искусственного интеллекта. *Экономика и социум*, 2018, № 5 (48), с. 884–886.
- [3] *Обратная сторона ИИ: что будет, если он выйдет из строя или попадет в руки мошенников?* URL: <https://blog.eldorado.ru/publications/obratnaya-storona-ii-chto-budet-esli-on-vyudet-iz-stroya-ili-popadet-v-ruki-moshennikov-36538> (дата обращения 25.03.2024).

-
- [4] Шарики за ролики: 6 случаев, когда роботы выходили из-под контроля. URL: https://pikabu.ru/story/shariki_za_roliki_6_sluchaev_kogda_robotti_vyikhodili_izpod_kontrollya_9897074 (дата обращения 25.03.2024).

Risks and prospects for the development of artificial intelligence in the modern world

Ivanova Victoria Olegovna victoriyaivanova3@mail.ru
Lachikhina Anastasia Borisovna lachikhinaab@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article examines the key risks associated with the development of artificial intelligence, including security threats, ethical issues and socio-economic consequences. Examples of incidents demonstrating the potential danger of AI are presented, such as failures in the operation of autonomous systems and manipulation using deepfake technologies. It is shown that AI has significant potential to improve the quality of life, but requires strict regulation. Conclusions are made about the need for international cooperation, the development of ethical standards and the introduction of control mechanisms to minimize risks.

Keywords: Artificial intelligence (AI), security, risks, ethics, control, disaster

Секция 12. Информационные технологии. Электронно- вычислительные системы и комплексы

УДК 004.6

Оптимизация отбора признаков для качества прогнозирования в условиях высокой размерности данных

Морозова Вероника Сергеевна

morozovavs@student.bmstu.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены варианты оптимизации для прогнозирования с большими массивами данных. Высокая размерность данных представляет собой серьезную проблему для алгоритмов машинного обучения, приводя к увеличению времени вычислений и потенциальному снижению точности прогнозирования. Алгоритмы, которые нацелены на значительное уменьшение признаков, могут пожертвовать важными деталями, что приведет к ухудшению прогнозирования. И, наоборот, алгоритмы, которые не могут достаточно сократить набор признаков, могут не достичь снижения времени вычислений. Представлено сравнение результатов влияния времени начала отбора признаков и общего затраченного времени на качество прогнозирования.

Ключевые слова: отбор признаков, машинное обучение, прогнозирование, время отбора признаков, понижение размерности

Большие наборы данных состоят из огромного количества как релевантных, так и нерелевантных признаков, следовательно, время вычислений и прогнозирования для обработки набора данных увеличивается [1]. При выборе признаков извлекаются наиболее релевантные признаки, которые называются подмножествами для прогнозирования, что позволяет сократить время вычислений.

Методы, используемые в машинном обучении для уменьшения набора признаков:

- выбор на основе фильтров: оценка значимости признаков на основе статистических метрик;
- метод обертывания: используют модель машинного обучения в качестве «черного ящика» для оценки подмножества признаков;
- встроенные методы: отбор признаков является частью процесса обучения модели;
- редукция размерности: преобразование признаков в новое пространство меньшей размерности;
- гибридные методы: комбинируют несколько подходов для улучшения результатов [2].

Основной целью прогнозирования является оценка будущих значений на основе исторических данных, которые могут быть собраны в разное время, как за последнее время, так и за несколько лет. Методы прогнозирования машинного обучения часто используют сложные особенности и методологии прогнозирования. Тем не менее, основная цель прогнозирования машинного

обучения совпадает с обычными методами: повышение точности прогнозирования при минимизации функции потерь [3]. Функция потерь обычно включает в себя среднеквадратичные ошибки.

Цель прогностической модели машинного обучения состоит в том, чтобы угадать метки в данных. Метки — это особенные признаки, которые могут быть разными в зависимости от задачи. Прогнозирование строится на основе данных, изменяющихся в течение времени [4].

Методы машинного обучения требуют больших вычислительных ресурсов по сравнению со статистическими подходами, так как набор данных с высокой размерностью приводит к значительным вычислительным затратам.

Выбор признаков включает в себя составление подмножества набора признаков в соответствии с такими целями, как максимизация эффективности регрессии и/или минимизация времени вычисления регрессии заранее определенного набора данных в определенный момент времени [5].

Для решения проблем, с которыми сталкиваются высоразмерные данные, могут быть приняты соответствующие методы для уменьшения размеров данных и сохранения наиболее важной информации. Эти данные часто содержат информацию, которая помогает в принятии решений или прогнозирования. Однако из-за высоких размеров эффективность и результативность использования всех функций для анализа данных не идеальны. Иногда это может даже снизить точность прогнозирования.

Оптимизация размера набора признаков требует баланса между сохранением информативности и упрощением модели.

В высокоразмерных данных набор признаков обычно слишком велик, чтобы сравнивать все возможные подмножества, следовательно, необходимы алгоритмы, которые учитывают не только уменьшение признаков, но и время начала предсказания, так как время работы алгоритма представляет собой сумму времени начала и времени выполнения. Раннее предсказание метки в наборе данных в текущий момент времени имеет несколько целей:

- максимизация эффективности прогнозирования;
- минимизация времени прогнозирования.

Рассмотрим способы применения вышеуказанных принципов при решении задачи прогнозирования значений меток. Конкретно рассмотрено влияние фактора времени начала отбора признаков при уменьшении набора признаков, на точность прогнозирования. Данные получены из базы данных в результате парсинга с нескольких интернет-ресурсов.

Экспериментальная часть. В эксперименте для прогнозирования используется: вычисление начала времени выполнения отбора признаков, общее время, затраченное на прогнозирование, отбор признаков с помощью РСА.

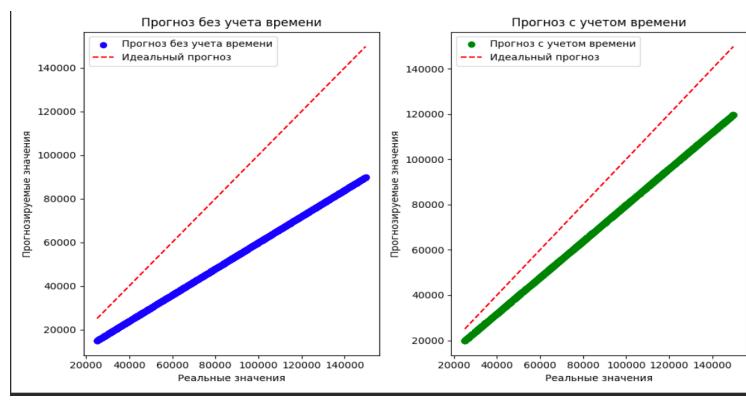
Математическая модель:

Пусть есть набор данных $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, где n — количество признаков; y_i — это метка класса для каждого набора.

Вектор признаков для каждого временного ряда может быть представлен как $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n D)$, где D — количество признаков для каждого набора.

$F = S$ — это набор выбранных признаков. $\text{Error}(S)$ — это функция ошибки регрессии. $\text{Time}(S)$ — время выполнения для выбранного набора признаков. α, β — веса, которые можно настроить в зависимости от важности точности и времени.

Для проведения эксперимента использовались: более 5000 значений данных, библиотеки `sklearn`, `matplotlib`, `pandas` в Python. На рисунке приведено сравнение влияния количества обрабатываемых данных на точность прогнозирования в идеальном случае, а также с учетом и без учета фактора времени.



Результаты работы прогнозирования

Среднеквадратичная ошибка для модели без учета времени — 2,70987.

Среднеквадратичная ошибка для модели с учетом времени — 1,80658. Из рисунка можно сделать вывод, что уменьшение набора признаков при одновременном учете фактора времени приводит к повышению точности результата прогнозирования по линейной зависимости.

Заключение. В данной статье было проведено исследование по влиянию фактора времени при уменьшении размерности набора признаков на качество прогнозирования. Исходя из результатов эксперимента, можно сделать вывод, что кроме признаков, время также влияет на результаты прогнозирования. При более раннем начале отбора признаков и уменьшении самого набора признаков прогнозирование оказалось точнее.

Литература

- [1] Feng G. Feature selection algorithm based on optimized genetic algorithm and the application in high-dimensional data processing. *PLOS One*, 2024, no. 0303088, pp. 10–28.
- [2] Watt J., Borhani R., Katsaggelos A. *Machine Learning Refined: Foundations, Algorithms, and Applications*. Cambridge University Press, 2020, 593 p.
- [3] Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLOS One*, 2018, no. 0194889, pp. 35–48.
- [4] Серрано Л. *Грокаем машинное обучение*. Санкт-Петербург, Питер, 2024, 512 с.

-
- [5] *An Optimized Feature Selection Method for High Dimensional Data.* URL:
<https://journal.ijresm.com/index.php/ijresm/article/view/213> (дата обращения 12.03.2025).

Optimization of feature selection for forecasting quality in conditions of high data dimensionality

Morozova Veronika Sergeevna morozovavs@student.bmstu.ru

Ilyichev Vladimir Yuryevich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article explores optimization options for forecasting with large amounts of data. High data dimensionality is a serious problem for machine learning algorithms, leading to increased computing time and a potential decrease in prediction accuracy. Algorithms that aim to significantly reduce features may sacrifice important details, which will lead to worse forecasting. Conversely, algorithms that cannot sufficiently reduce the set of features may not achieve a reduction in computing time. The article presents a comparison of the results of the impact on the quality of forecasting the start time of feature selection and the total time spent.

Keywords: feature selection, machine learning, forecasting, feature selection time, dimension reduction

Выбор методов машинного обучения для использования в коллаборативных рекомендательных системах

Медведев Дмитрий Игоревич dmitriy.medvedev.work@yandex.ru

Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено использование основных методов машинного обучения для разработки коллаборативных рекомендательных систем. Исследование включает сравнительный анализ метода k -ближайших соседей, матричной факторизации и наивного байесовского классификатора. В ходе работы проанализированы оценки, выдаваемые каждым из перечисленных методов машинного обучения, а также их абсолютные и квадратичные ошибки. Цель работы — выявить метод машинного обучения, позволяющий разработать наиболее точную рекомендательную систему.

Ключевые слова: коллаборативная фильтрация, машинное обучение, наивный байесовский классификатор, матричная факторизация, kNN

Введение. В сфере цифровых технологий активно развиваются платформы с рекомендательными системами. Среди них встречаются системы, основанные на основе коллаборативной фильтрации, которые позволяют создавать персонализированный контент для конечного пользователя, опираясь на анализ его индивидуальных предпочтений в определенной предметной области [1].

С учетом необходимости обработки и анализа постоянно растущих массивов данных о пользовательских предпочтениях, применение методов машинного обучения приобретает первостепенное значение. Данный подход позволяет обеспечить лучшую производительность, точность рекомендаций, а также выявление скрытых закономерностей в предпочтениях пользователей. Рассмотрим каждый метод детально.

Метод k -ближайших соседей. Метод k -ближайших соседей (k -Nearest Neighbors, kNN) — алгоритм классификации и регрессии, основанный на гипотезе компактности, которая предполагает, что расположенные близко друг к другу объекты в пространстве признаков имеют схожие значения целевой переменной или принадлежат к одному классу [2].

Для реализации метода kNN необходимо определить меру сходства между пользователями или объектами. Наиболее распространенными мерами сходства являются коэффициент Отии, корреляция Пирсона, и евклидово расстояние [3].

После расчета мер сходства происходит поиск k -ближайших соседей, определение моды (при классификации) или среднего (при регрессии).

Метод k -ближайших соседей обладает высокой точностью прогнозов при условии правильно заданного числа k и выбранной метрике. Он не требует обучения модели, что делает его удобным для использования в задачах, где

данные часто обновляются. Однако, данный метод чувствителен к разреженным данным, что негативно отражается на его точности.

Метод матричной факторизации. Данный подход основан на декомпозиции матрицы взаимодействий пользователей и объектов в произведение двух матриц меньшей размерности, что позволяет выявить скрытые (латентные) факторы, описывающие как пользователей, так и объекты.

Алгоритм Trancated SVD является подвидом алгоритма SVD и одним из основных алгоритмов реализации матричной факторизации [4]. Он подразумевает усеченное разложение, что позволяет работать только с известными значениями матрицы предпочтения и учесть большую разреженность данных. Матрица предпочтений R размерности $m \times n$ раскладывается на матрицу латентных факторов U размерности $n \times k$, матрицу сингулярных значений S с размерностью $k \times k$, и ортогональную матрицу латентных факторов объектов V размерностью $m \times k$. В итоге справедливым считается выражение: $R = USV^T$.

Усекая матрицу S до k наибольших значений, алгоритм строит приближенное представление $R = U_k S_k V^T k$, что позволяет снизить размерность данных. Затем, на основе полученных матриц вычисляется матрица рекомендаций R_{ui} .

Преимущество метода матричной факторизации заключается в способности выявлять скрытые закономерности и делать точные рекомендации на основе схожести объектов и пользователей, даже без явных оценок.

Наивный байесовский классификатор. Наивный байесовский классификатор — вероятностный классификатор на основе формулы Байеса со строгим (наивным) предположением о независимости признаков между собой при заданном классе [5].

В контексте колаборативных рекомендательных систем данный метод позволяет предсказывать предпочтения пользователей на основе их предыдущих взаимодействий с системой.

Основная идея байесовского классификатора заключается в вычислении апостериорной вероятности принадлежности объекта к определенному классу (например, «нравится» или «не нравится») на основе априорной вероятности и наблюдаемых данных. Формула имеет следующий вид:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)}.$$

Преимуществами данного метода являются: простота реализации, высокая скорость работы и точность прогнозов. Кроме того, байесовский классификатор устойчив к выбросам. Однако, классификатор «считает», что все признаки объекта независимы друг от друга. При нарушении этого принципа точность прогнозов значительно снижается.

Выбор метода. Для сравнения методов машинного обучения построены 3 user-based рекомендательных системы. Для них сгенерирован датафрейм на 100 пользователей по 500 элементов. Оценки находятся в диапазоне [0; 5], где 0 означает, что элемент не оценен. Датафрейм разделен на обучающую и те-

стовую выборки в соотношении 75/25 процентов. Результаты работы колла-
боративных систем, представленные на рис. 1–3, также отражены в таблице.

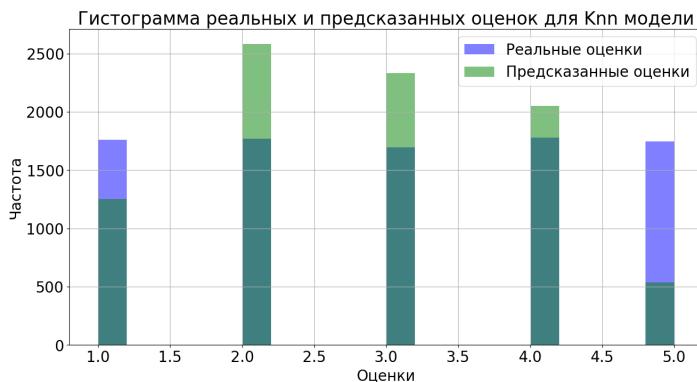


Рис. 1. Гистограммы реальных и предсказанных оценок для модели на основе метода k -ближайших соседей

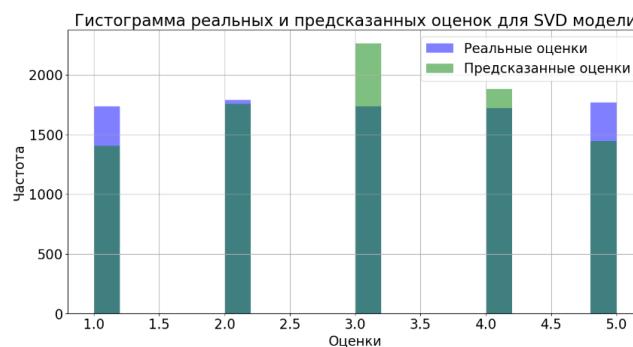


Рис. 2. Гистограммы реальных и предсказанных оценок для модели на основе матричной факторизации

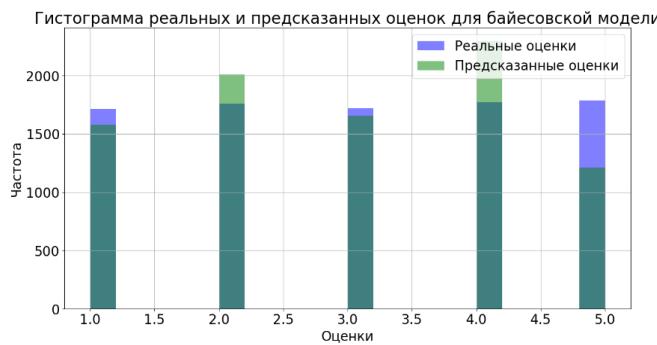


Рис. 3. Гистограммы реальных и предсказанных оценок для модели на основе наивного байесовского классификатора

Результаты работы коллаборативных систем

Метод машинного обучения	MAE	RMSE
Метод k -ближайших соседей	1,47	1,84
Метод матричной факторизации	1,52	1,91
Метод наивного байесовского классификатора	1,56	1,95

Модель на основе метода k -ближайших соседей имеет наименьшие MAE и RMSE ошибки. Однако модель слишком часто предсказывает оценки в диапазоне [2; 4] и слишком редко 1 и 5. Данный факт является основанием для выбора моделей на основе других методов. Из рисунков и таблицы видно, что для разработки коллаборативной рекомендательной системы лучше всего подходит применение метода матричной факторизации, поскольку он наиболее адекватно предсказывает оценки пользователей при достаточно низкой ошибке прогноза.

Литература

- [1] Лесковец Ю., Ананд Р., Джейфри Д.У. *Анализ больших наборов данных*. Москва, ДМК Пресс, 2016, 498 с.
- [2] *Метод k -ближайших соседей (KNN). Принцип работы, разновидности и реализация с нуля на Python*. URL: <https://habr.com/ru/articles/801885/> (дата обращения 15.02.2025).
- [3] *Метрические методы*. URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/metriccheskiye-metody> (дата обращения 15.02.2025).
- [4] Langville A.N., Meyer C.D. *Google SVD and LSI*. URL: <https://langvillea.people.charleston.edu/DISSECTION-LAB/Emmie%27sLSI-SVDMModule/p5module.html> (дата обращения 05.03.2025).
- [5] *Наивный байесовский классификатор. Основная идея, модификации и реализация с нуля на Python*. URL: <https://habr.com/ru/articles/802435/> (дата обращения 10.03.2024).

Selecting a machine learning method for a collaborative recommender system

Medvedev Dmitry Igorevich

dmitriy.medvedev.work@yandex.ru

Ilyichev Vladimir Yurievich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

This paper reviews the main machine learning methods for the development of collaborative recommender systems. The study includes a comparative analysis of some key algorithms: k -nearest neighbors method, matrix factorization and naive Bayesian classifier. In the process of the work, we analyze the estimates given by each of the listed machine learning methods, the errors of the models developed on their basis. The aim of the work is to identify the machine learning method that allows developing the most accurate recommendation system.

Keywords: collaborative filtering, machine learning, Naive Bayes classifier, matrix factorization, k NN

УДК 004.052.2

Исследование методов и разработка прикладного программного обеспечения для выявления аномалий в сетевом трафике

Изранов Кирилл Сергеевич izranovks@gmail.com

Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы выявления аномалий в сетевом трафике, представляющих угрозу безопасности современных информационных систем. Выявление аномалий в трафике является важной задачей, так как они могут указывать на кибератаки или сбои в работе сети. Разработчикам систем защиты приходится применять разнообразные подходы для их обнаружения и предотвращения. Целью статьи является обзор существующих методов решения данной проблемы, анализ эффективности их применения и определение подходов, наиболее подходящих для конкретных сценариев, с учетом разработки прикладного программного обеспечения на основе Snort.

Ключевые слова: сетевые аномалии, кибербезопасность, анализ трафика

Сетевые технологии — основа современных информационных систем, обеспечивающая глобальную связь и обмен данными. Однако с ростом объема и сложности трафика в сети все чаще возникают аномалии: большое количество пакетов с одного источника, резкие всплески трафика, сканирование портов, необычные заголовки пакетов, изменение паттернов трафика, доступ к запрещенным ресурсам, несанкционированный обмен файлами, потеря пакетов, высокая задержка, циклы в маршрутизации, аномальное количество BROADCAST- или MULTICAST-пакетов. Сами по себе они не всегда представляют угрозу, но могут указывать на скрытые проблемы: кибератаки, сбои или уязвимости. Такие отклонения ставят под вопрос стабильность и безопасность сети, поэтому важно уметь их обнаруживать и анализировать причины. Для этого используются различные методы, позволяющие вовремя выявить возможные угрозы и реагировать на них [1].

Сигнатурные методы основаны на сравнении сетевого трафика с заранее определенными шаблонами (сигнатурами), характерными для известных угроз, таких как вредоносное ПО или попытки вторжения. Инструменты вроде Snort [2] используют базы правил, которые регулярно обновляются сообществом или разработчиками. Главное преимущество такого подхода — высокая точность при обнаружении известных атак: если трафик совпадает с сигнатурой, система мгновенно выявляет проблему. Однако этот метод неэффективен против новых, неизвестных угроз, что делает его менее универсальным в условиях постоянно меняющейся киберугрозы.

Статистические методы [3] заключаются в анализе сетевого трафика, основываясь на нормальном поведении системы, и выявляют отклонения

от заданных параметров. Ключевые метрики включают объем трафика, частоту запросов, среднее время отклика и другие показатели. Например, если в сети наблюдается резкий всплеск активности, превышающий допустимый порог, это может сигнализировать о возможной атаке. Преимущество статистического анализа — способность обнаруживать аномалии без предварительного знания конкретных угроз. Однако метод чувствителен к ложным срабатываниям, особенно в динамичных сетях, где «нормальное» поведение может меняться.

Методы машинного обучения (ML) [4] становятся все более востребованными благодаря их способности адаптироваться к сложным и изменяющимся данным. Такие методы, например кластеризация (DBSCAN) или изолирующий лес (Isolation Forest), обучаются на исторических данных трафика, выявляя закономерности нормального поведения и определяя аномалии как выбросы. Такой подход особенно полезен для обнаружения новых атак, не описанных в сигнатурах. Кроме того, ML-методы можно интегрировать с инструментами вроде Snort для повышения точности анализа. Однако они требуют значительных вычислительных ресурсов, качественного набора данных для обучения и тонкой настройки, что может усложнять их внедрение.

Глубокий анализ пакетов (Deep Packet Inspection, DPI) [5] — это детальный разбор содержимого сетевых пакетов, включая заголовки и полезную нагрузку. Этот метод позволяет обнаруживать угрозы, скрытые в самом трафике, например команды управления ботнетами или использование нестандартных протоколов. Snort поддерживает элементы DPI через анализ содержимого пакетов в своих правилах. Основное преимущество этого метода — высокая точность при анализе конкретных угроз. Однако DPI требует значительных вычислительных мощностей и может затрагивать вопросы конфиденциальности, что ограничивает его применение в некоторых сценариях.

Выбор подхода. Каждый из этих методов имеет свои плюсы и минусы, а их эффективность зависит от особенностей сети, доступных ресурсов и типа потенциальных угроз. В следующем разделе будет рассмотрена разработка прикладного ПО, которое использует комбинацию этих методов для детального анализа трафика.

Разработка ПО. В рамках исследования было разработано прикладное программное обеспечение, которое позволяет управлять системой обнаружения аномалий в сетевом трафике на основе Snort, а также собирать и анализировать логи. Выбор данной утилиты обоснован тем, что она позволяет использовать набор нескольких описанных выше методов, что позволяет более гибко настраивать систему анализа трафика. Программа построена с использованием современного веб-фреймворка React для интерфейса и технологии SSH для удаленного доступа к серверу на базе Debian, где установлен Snort.

На стороне сервера используется машина с операционной системой Debian, где развернут Snort в одной из конфигураций (например, hardened), настроенном для анализа трафика в реальном времени. Snort работает как служба, собирая данные о пакетах и записывая их в логи (в форматах unified2

и `tcpdump`). Для взаимодействия с сервером был настроен SSH-доступ с использованием защищенного соединения. Через SSH программа отправляет команды для управления Snort, например запуск или остановка службы, обновление правил или сбор логов.

Клиентская часть ПО реализована на React. В интерфейс добавлена панель управления с кнопками для запуска/остановки Snort, график, отображающий статистику трафика (например, количество событий по IP за минуту), и таблицу с данными из логов. Логи, собранные Snort, передаются с сервера через SSH, разбираются на клиенте и преобразуются в удобный вид, например список событий с указанием времени, источника и типа аномалии.

Разработанное программное обеспечение прошло тестирование в реальных условиях эксплуатации, что позволило проверить его эффективность в боевых сценариях. В ходе испытаний система на базе Snort столкнулась с настоящей DDoS-атакой, направленной на сетевую инфраструктуру. Программа продемонстрировала высокую надежность, оперативно выявив аномалии в трафике, характерные для подобного рода атак. На рис. 1 представлен список источников атак с IP-адресом, страной, городом и количеством атак, а на рис. 2 показана карта атак, наиболее интенсивные атаки отмечены большими красными кругами, а менее активные — более мелкими и светлыми.

Список источников атак (топ 10)			
IP-адрес	Страна	Город	Количество атак
147.45.79.135	United States	Los Angeles	1724
185.4.66.119	Russia	Moscow	1453
45.130.156.22	Türkiye	Mersin	1205
160.238.36.166	United States	Phoenix	1083
37.235.76.15	Türkiye	Unknown	1039
43.153.179.171	Japan	Tokyo	879
37.235.77.18	Türkiye	Unknown	879
91.124.123.24	United States	Salt Lake City	830
82.145.240.108	Türkiye	Mersin	785

Рис. 1. Список источников атак

Выводы. Благодаря сочетанию сигнатурного анализа, статистических методов и элементов глубокого анализа пакетов (DPI), система, разработанная с помощью Snort, своевременно зафиксировала резкие всплески активности, такие как аномально большое число запросов с определенных IP-адресов. ПО не только обнаружило сам факт атаки, но и предоставило де-

тальные данные для ее анализа: тип атаки, IP-адрес, приблизительная локация источника, время атаки.

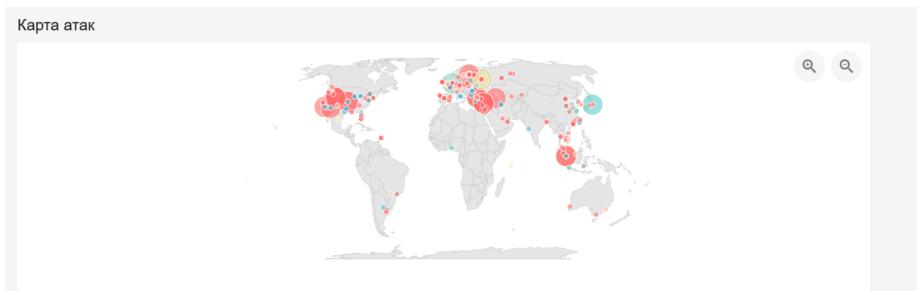


Рис. 2. Карта атак

Литература

- [1] *Анализ трафика сети с целью выявления аномалий и потенциальных угроз.* URL: <https://cisoclub.ru/analiz-trafika-seti-s-celju-vyjavlenija-anomalij-i-potencialnyh-ugroz/> (дата обращения 01.03.2025).
- [2] *Snort — Network Intrusion Detection & Prevention System.* URL: <https://snort.org> (дата обращения 15.03.2025).
- [3] Усков Е.Д., Корепанова Н.Л. Анализ информативных признаков аномалий сетевого трафика корпоративных сетей. *Современные инновации*, 2019, № 3 (31), с. 1–4.
- [4] Зуев В.Н. Обнаружение аномалий сетевого трафика методом глубокого обучения. *Программные продукты и системы*, 2021, № 1, с. 91–97.
- [5] *Как работает DPI?* URL: https://rt-solar.ru/products/solar_ngfw/blog/3407/ (дата обращения 12.03.2025).

Research of methods and development of application software for detecting anomalies in network traffic

Izranov Kirill Sergeevich

izranovks@gmail.com

Ilyichev Vladimir Yurievich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Methods of detecting anomalies in network traffic that pose a threat to the security of modern information systems are considered. Detecting anomalies in traffic is an important task, as they can indicate cyber-attacks or network failures. Security system developers have to apply a variety of approaches to detect and prevent them. The purpose of the article is to review existing methods for solving this problem, analyze the effectiveness of their application and identify approaches that are most suitable for specific scenarios, taking into account the development of Snort-based application software.

Keywords: network anomalies, cybersecurity, traffic analysis

УДК 004.94

Построение рейтинговой системы на основе 3D-визуализации ключевых метрик

Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru
Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru
Тихонов Никита Александрович nikitatihonov@mail.ru
Джанаев Карим Сергеевич karim-2018@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен метод построения рейтинговой системы для анализа YouTube-каналов с использованием кластеризации в трехмерном пространстве. На основе набора данных *YouTubeDataset_withChannelElapsed.json* проведен предварительный анализ, включающий преобразование исходных показателей, расчет нормализованных метрик (средние дневные просмотры, частота загрузок видео, просмотры на подписчика) и фильтрацию выбросов. Применение алгоритма Kmeans после масштабирования данных позволило сегментировать каналы на группы, отражающие различные уровни эффективности: лидеры, средние и начинающие. Результаты исследования демонстрируют, что интеграция вычисленных отношений и 3D-визуализации способствует более точному сравнительному анализу и выявлению ключевых закономерностей в динамике развития каналов.

Ключевые слова: YouTube, кластеризация, KMeans, анализ данных, рейтинговая система

Введение. В последние годы YouTube продолжает оставаться одной из ведущих платформ для публикации видео, привлекая аудиторию со всего мира. Разнообразие контента и масштаб деятельности каналов создают необходимость в разработке объективных методов анализа, способных учитывать не только абсолютные показатели (такие как общее число просмотров или подписчиков), но и нормализованные отношения, отражающие динамику развития и вовлеченность аудитории.

Цель работы — разработать и протестировать рейтинговую систему для сегментации YouTube-каналов, которая основывается на кластеризации в трехмерном пространстве. Предлагаемый метод включает в себя предварительную обработку данных, вычисление ключевых метрик (например, средние дневные просмотры, частота загрузок и просмотры на подписчика), нормализацию и применение алгоритма KMeans для выявления естественных групп каналов. Ожидается, что такой подход позволит выделить лидеров мнений, каналы среднего уровня и начинающих авторов, что является актуальной задачей для аналитиков и маркетологов в сфере цифровых медиа.

Обзор литературы. Методы кластеризации и анализа больших данных получили широкое распространение в различных научных и прикладных исследованиях, начиная от маркетингового анализа до биоинформатики. Клас-

сический алгоритм Kmeans доказал свою эффективность при сегментации объектов, обладающих высоким разбросом величин, что подтверждается многочисленными исследованиями [1, 2].

Предварительная обработка данных и нормализация играют ключевую роль при работе с разнородными наборами информации, особенно когда данные включают как абсолютные показатели, так и вычисленные отношения (например, просмотры на подписчика). Исследования [3, 4] демонстрируют, что использование нормализованных показателей позволяет существенно улучшить результаты кластеризации, делая выявленные группы более представительными. Современные исследования также акцентируют внимание на применении кластерного анализа к медиаконтенту, включая данные социальных сетей [5].

Наличие специализированных методов визуализации, включая 3D-графику, открывает новые возможности для интерпретации кластерных структур и обнаружения скрытых закономерностей. В свете современных тенденций, применение 3D-визуализации в аналитике данных становится важным инструментом для принятия стратегических решений в сфере цифровых медиа [6].

Материалы и методы. Исследование основано на наборе данных *YouTubeDataset_withChannelElapsed.json*, который включает подробную информацию о YouTube-каналах и их видео. Данные содержат как абсолютные метрики (например, общее число просмотров, количество подписчиков, число загруженных видео), так и вычисленные отношения, позволяющие оценить динамику развития каналов.

Первоначальный этап включает:

– **преобразование типов данных:** значения, представленные в виде строк, приводятся к числовому формату с использованием библиотеки Pandas;

– **обработка пропущенных значений:** записи с отсутствующими или некорректными значениями отфильтровываются. Особое внимание уделяется проверке поля *channelelapsedtime*, чтобы избежать деления на ноль;

– **фильтрация выбросов:** для каждого показателя производится отбраковка 1 % экстремальных значений, что позволяет уменьшить влияние аномальных данных на результаты кластеризации.

На основе исходных показателей рассчитываются следующие метрики:

– **средние дневные просмотры (average_daily_views):** отношение общего числа просмотров канала к времени его существования;

– **частота загрузок видео (upload_frequency):** отношение числа загруженных видео к времени существования канала;

– **просмотры на подписчика (views_per_subscriber):** прямое отношение просмотров к числу подписчиков.

Для приведения данных к единому масштабу применяется StandardScaler, что критически важно для корректной работы алгоритма кластеризации [7]. Далее используется алгоритм KMeans, при этом оптимальное число кластеров определяется на основе анализа суммарной инерции (метод «локтя») и silhouette score.

Результаты кластеризации визуализируются с помощью 3D scatter plot matplotlib. Использование трехмерного пространства позволяет лучше интерпретировать распределение каналов и выявлять закономерности, скрытые в многомерных данных [6].

Реализация метода проводилась на языке Python с использованием следующих этапов:

– **загрузка и преобразование данных.** Данные из JSON-файла были преобразованы в DataFrame, а необходимые столбцы — в числовой формат;

– **вычисление метрик и фильтрация выбросов.** Рассчитаны показатели *average_daily_views*, *upload_frequency* и *views_per_subscriber*, а также исключены аномальные значения;

нормализация

и

кластеризация.

Данные нормализованы с помощью StandardScaler, после чего алгоритмом KMeans проведена кластеризация на три группы [7];

– **визуализация.** Результаты кластеризации представлены на 3D-графике, где каждая точка соответствует каналу, а цвет обозначает принадлежность к определенному кластеру.

Ниже приведен фрагмент кода, иллюстрирующий описанные этапы:

```
import json
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Загрузка данных
with open('YouTubeDataset_withChannelElapsed.json', 'r', encoding='utf-8') as f:
    data = json.load(f)
df = pd.DataFrame(data)

# Преобразование в числовой формат
numeric_columns = ['channelViewCount', 'channelelapsedtime', 'videoCount',
'vews/subscribers']
for col in numeric_columns:
    df[col] = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce')
df = df.dropna(subset=numeric_columns)
df = df[df['channelelapsedtime'] > 0]

# Вычисление метрик
df['average_daily_views'] = df['channelViewCount'] /
df['channelelapsedtime']
df['upload_frequency'] = df['videoCount'] / df['channelelapsedtime']
df['views_per_subscriber'] = df['vews/subscribers']

# Фильтрация выбросов
for col in ['average_daily_views', 'upload_frequency',
'vews_per_subscriber']:
    df = df[df[col] < df[col].quantile(0.99)]

# Нормализация данных
X = df[['average_daily_views', 'upload_frequency',
'vews_per_subscriber']].values
```

```

scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(X)

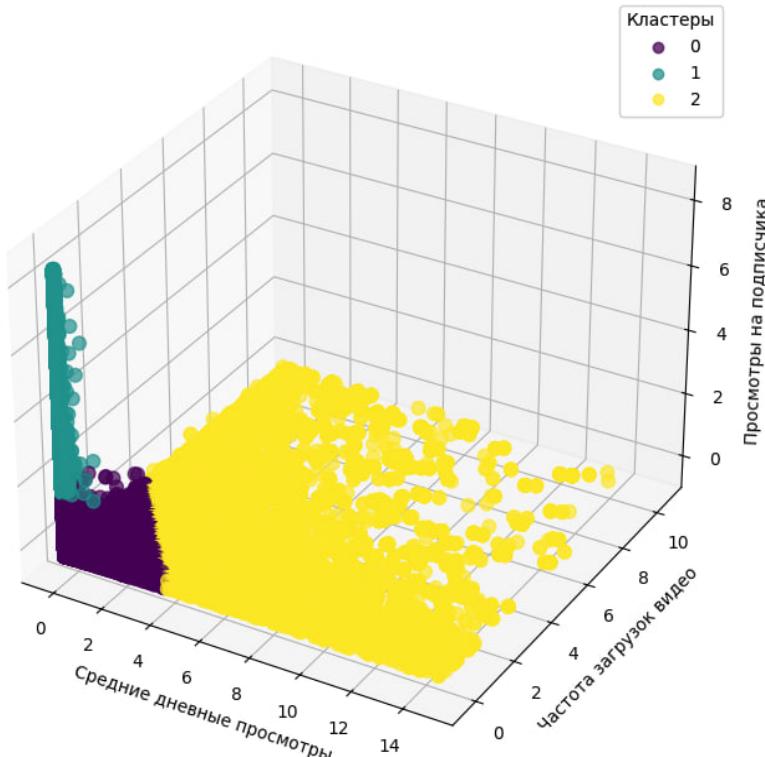
# Кластеризация
optimal_clusters = 3 # Определено с использованием метода локтя и silhouette
score
kmeans = KMeans(n_clusters=optimal_clusters, random_state=42)
df['cluster'] = kmeans.fit_predict(X_scaled)

# 3D-визуализация
fig = plt.figure(figsize=(10,8))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
scatter = ax.scatter(X_scaled[:, 0], X_scaled[:, 1], X_scaled[:, 2],
c=df['cluster'], cmap='viridis', s=60, alpha=0.7)
ax.set_xlabel('Средние дневные просмотры')
ax.set_ylabel('Частота загрузок видео')
ax.set_zlabel('Просмотры на подписчика')
ax.set_title('Кластеризация YouTube-каналов')
plt.show()

```

Результаты кластеризации представлены на рисунке.

Кластеризация YouTube-каналов (K=3)



Результат кластеризации

На рисунке видно, что выбранные метрики позволяют разделить YouTube-каналы на три отчетливых группы:

– **кластер 1 желтый (лидеры):** характеризуется высокими значениями среднего дневного роста просмотров и стабильной частотой загрузок. Эти каналы обладают значительным охватом аудитории и высоким уровнем вовлеченности;

– **кластер 2 бирюзовый (средние):** представляет собой группу каналов, где показатели умеренные и демонстрируют стабильный, но не стремительный рост;

– **кластер 3 фиолетовый (начинающие):** включает каналы с низкими значениями по всем ключевым метрикам, что указывает на их начальный этап развития.

Анализ распределения показателей внутри кластеров выявил, что нормализация данных и фильтрация выбросов сыграли ключевую роль в достижении стабильных результатов. Однако следует отметить, что качество исходных данных может быть неоднородным, что в ряде случаев влияет на точность кластеризации. В дальнейшем планируется расширение набора метрик и использование альтернативных методов кластеризации (например, DBSCAN) для повышения объективности анализа.

Заключение. В результате проведенного исследования разработана рейтинговая система, позволяющая сегментировать YouTube-каналы по ключевым метрикам с применением кластеризации в 3D-пространстве. Достижения данной работы заключаются в следующем:

– успешное применение методов предварительной обработки и нормализации данных, что позволило корректно рассчитать вычисленные отношения;

– эффективное использование алгоритма KMeans для разделения каналов на группы, отражающие разные этапы развития и уровни вовлеченности аудитории;

– наглядная 3D-визуализация результатов, способствующая более глубокому пониманию структуры данных.

Полученные выводы могут служить основой для дальнейших исследований в области анализа цифровых медиа и разработки инструментов мониторинга эффективности контента. Перспективы дальнейшей работы включают расширение набора используемых показателей, применение альтернативных алгоритмов кластеризации и адаптацию методики под изменяющиеся условия рынка.

Литература

- [1] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction*. New York, Springer, 2009.
- [2] Bishop C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York, Springer, 2006.
- [3] Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 2010, vol. 31, no. 8, pp. 651–666.

-
- [4] Kietzmann J.H., Hermkens K., McCarthy I.P., Silvestre B. S. Social media? Get serious! Understanding the functional building blocks of social media. *Business Horizons*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 241–251.
 - [5] *Scikit-learn. Machine Learning in Python*. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (accessed 05.03.2024).
 - [6] Few S. *Show Me the Numbers: Designing Tables and Graphs to Enlighten*. Boston, Analytics Press, 2004.
 - [7] Рыцарев И.А., Кирш Д.В., Куприянов А.В. Кластеризация медиаконтента из социальных сетей с использованием технологии BigData. *Компьютерная оптика*, 2018, т. 42, № 5, с. 921–927. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-5-921-927>

Development of a Rating System Based on 3D Visualization of Key Metrics

Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru
Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru
Tikhonov Nikita Alexandrovich nikitatihonov@mail.ru
Dzhanaev Karim Sergeevich karim-2018@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This paper presents a method for developing a rating system for analyzing YouTube channels using clustering in three-dimensional space. Based on the dataset YouTubeDataset_withChannelElapsed.json, a preliminary analysis was conducted, including the transformation of initial indicators, calculation of normalized metrics (average daily views, upload frequency, views per subscriber), and outlier filtering. The application of the KMeans algorithm after data scaling enabled the segmentation of channels into groups reflecting different efficiency levels: leaders, average performers, and beginners. The results of the study demonstrate that integrating computed ratios and 3D visualization contributes to more accurate comparative analysis and the identification of key patterns in the growth dynamics of the channels.

Keywords: YouTube, clustering, KMeans, data analysis, rating system

УДК 004.94

Разработка методики кластеризации GitHub проектов по стадиям развития

Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru

Тихонов Никита Александрович nikitatihonov@mail.ru

Джанаев Карим Сергеевич karim-2018@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Описана разработанная кластеризация GitHub проектов по стадиям их развития на основе анализа репозиториев из датасета с сайта Kaggle. Используя признаки количества звезд (рейтинга) и форков (заимствований), проекты разделяются на три типа (библиотека, прототип, инструмент) с применением алгоритма классификации методом k-ближайших соседей (KNN). Работа включает обзор теоретических основ GitHub, описание разработанного алгоритма и особенностей программного кода, обоснование эффективности кластеризации для анализа жизненного цикла проектов.

Ключевые слова: GitHub, развитие проектов, кластеризация, KNN, программное обеспечение, open source

Современные платформы для совместной разработки, такие как GitHub, являются основным источником открытых данных о программных проектах. Кроме использования загруженных в репозитории материалов, GitHub позволяет исследователям анализировать динамику развития репозиториев, оценивать популярность проектов и выявлять закономерности протекания их жизненных циклов. Кластеризация таких проектов по стадиям развития (библиотека, прототип, инструмент) позволяет глубже понять, как проекты эволюционируют, и предоставляет возможность оптимизировать процессы поддержки и развития open source (свободно распространяемого) программного обеспечения.

Данное исследование посвящено разработке методики кластеризации GitHub проектов с использованием датасета, размещенного на сайте Kaggle.com. В работе рассматриваются этапы обработки данных, применение алгоритма KNN для классификации проектов и визуализации полученных результатов. Теоретическая база исследования опирается на работы, посвященные анализу репозиториев и их эволюции.

Большинство существующих исследований по анализу репозиториев GitHub опираются на статистические метрики и сводную статистику для оценки активности и жизненного цикла проектов. Например, анализ распределения активов по экосистемам, оценка выживаемости проектов в зависимости от типа (личные проекты против проектов организаций) и распределения по сообществу, а также оценка сроков активности репозиториев — все это

позволяет получить ценную информацию о динамике развития open source проектов [1]. Таблицы, отражающие количество активов (коммиты, pull requests, Issues, комментарии, ревью) и распределение по экосистемам, а также анализ выживаемости проектов по времени, демонстрируют, что более чем половина проектов умирает в первые четыре года, а вероятность выживания падает ниже 50 % после пятого года [2].

Однако, несмотря на полезность подобных статистических исследований, они имеют существенные ограничения. Статистика может показать общие тенденции, но она не всегда позволяет понять динамику развития на уровне отдельных репозиториев и не дает возможности выделить качественные стадии развития проектов. Именно здесь кластеризация оказывается более прогрессивным и полезным инструментом. Применяя вычислительные алгоритмы обработки массивов данных, можно не только классифицировать проекты по числовым показателям (например, количеству звезд и форков), но и выделять скрытые закономерности, отражающие стадии их развития (библиотеки, инструменты, прототипы) и оценивать динамику их эволюции.

Подход, основанный на классификации объектов путем кластеризации, позволяет:

- выделить скрытые закономерности: в отличие от простого суммарного статистического анализа, кластеризация позволяет группировать проекты по схожим характеристикам, выявляя различные стадии развития;
- адаптивно обрабатывать разнородные данные: методы кластеризации учитывают евклидово расстояние между признаками, что позволяет корректно распределить проекты даже при наличии высокой дисперсии в данных;
- предоставить наглядную визуализацию: результаты кластеризации визуализируются на графиках с цветной заливкой, что позволяет сразу определить границы классов и оценить распределение репозиториев по типам;
- обеспечить практическую применимость: полученные кластеры могут быть использованы для прогнозирования жизненного цикла проектов, оптимизации поддержки open source и принятия решений об инвестировании в развитие конкретных репозиториев.

Таким образом, несмотря на ценность статистического анализа, кластеризация GitHub проектов предоставляет более глубокое понимание их этапов развития и динамики, позволяя эффективно разделять репозитории на типы с учетом активности, популярности и жизненного цикла.

Кластеризация репозиториев позволяет выявлять стадии развития проектов, различать зрелые библиотеки, инструменты и прототипы, что имеет практическое значение для анализа трендов, планирования развития и оценки потенциала проектов.

Кластеризация по таким признакам, как количество звезд и форков, отражает популярность и активность проекта. Зрелые проекты, как правило, имеют высокий уровень звезд, а инструменты — большое число форков, что указывает на их широкое использование и модификацию другими разработчиками. Применение вычислительного алгоритма k -ближайших соседей

(KNN) в данном контексте позволяет эффективно разделить проекты на кластеры, используя простую, но наглядную метрику — евклидово расстояние между парами признаков. Данный подход подтверждается в исследованиях по анализу различных типов данных; подобные методы успешно применялись для выявления закономерностей в развитии open source проектов.

Для проведения экспериментального исследования в нашей работе использован датасет из Kaggle. Датасет содержит информацию о GitHub репозиториях, включая количество звезд (отображающих рейтинг проекта) и форков (отображающих количество заимствований материалов данного проекта для других проектов) [3]. Таким образом, из обрабатываемой базы данных для решения задачи классификации проектов, были выбраны два их признака — «stars_count» и «forks_count», на основе которых каждому проекту присваивается тип:

- **Тип 0 (Library):** если stars_count > 175000;
- **Тип 1 (Tool):** если forks_count > 20000;
- **Тип 2 (Prototype):** для остальных проектов.

Целью обработки данных является реализация процедуры автоматизированного построения областей (кластеров), включающих в себя проекты одного типа. Для этого из каждой группы выбирается случайная выборка из некоторого количества проектов. При этом от величины выборки зависит точность построения границ кластеров [4].

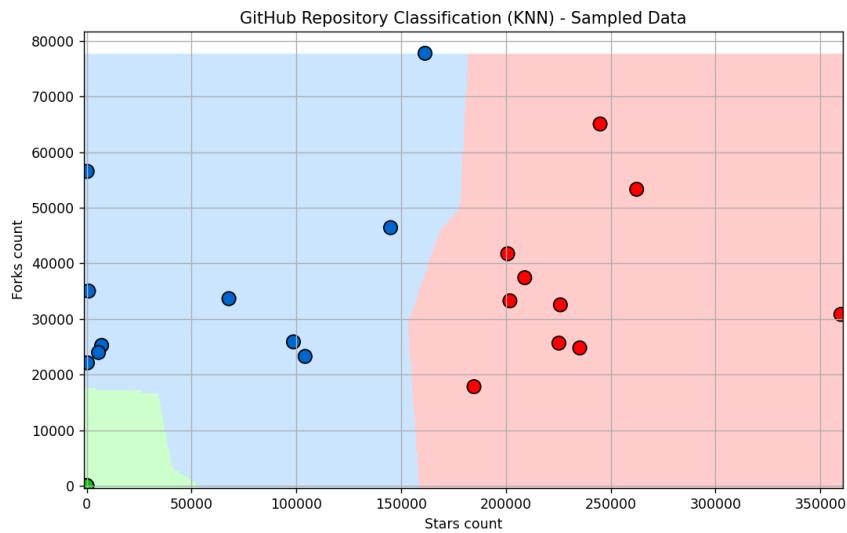
Разработана следующая поэтапная процедура кластеризации методом kNN (*k*-ближайших соседей):

- каждый репозиторий получает метку типа в зависимости от количества звезд и форков;
- из каждого кластера выбирается некоторое количество репозиториев для дальнейшего анализа;
- используется алгоритм *k*-ближайших соседей для классификации тестовой выборки;
- производится визуализация результатов с построением цветной сетки, отражающей границы классов.

Описанный алгоритм был реализован в виде программного кода на языке Python с использованием функций библиотек Pandas, Numpy, Random, Math.

Визуализация результатов кластеризации осуществлялась с помощью библиотеки Matplotlib.

Особенностью обработки данных в процессе проведения вычислительного эксперимента, являлось то, что для каждого типа репозиториев было отобрано по 10 экземпляров, что позволило сбалансировать выборку и обеспечить наглядность кластеризации. Результаты обработки базы данных проектов GitHub, с помощью разработанного авторами программного кода, представлены на рисунке. Цветная заливка указывает на границы кластеров, а цветные точки — на распределение репозиториев по типам.



Результат классификации проектов GitHub

Полученная визуализация позволяет сделать вывод о том, что метод кластеризации по выбранным признакам является эффективным инструментом для выделения стадий развития проектов. Различия между кластерами отражают особенности каждого типа репозиториев, что может быть использовано для дальнейшего анализа динамики развития и планирования поддержки open source проектов.

В заключении следует отметить, что исследования, опирающиеся исключительно на статистику и метрики, способны выявлять общие тенденции в развитии репозиториев, но не дают возможности детально анализировать этапы эволюции отдельных проектов. Применение кластеризации, в частности алгоритма KNN, является более прогрессивным методом, позволяющим выделить скрытые закономерности и качественно оценить стадии развития GitHub проектов. Такой подход имеет практическое значение для поддержки и оптимизации процессов развития open source программного обеспечения.

Литература

- [1] Peterson K. *The GitHub open source development process*. Mayo Clinic, Rochester, 2013, 12 p.
- [2] Ait A., Cánovas Izquierdo J.L., Cabot J. *An empirical study on the survival rate of GitHub projects*. Barcelona, Spain, 18 p.
- [3] Kern M., Landauer M., Skopik F., Weippl E. *Identifying threat detection resources on GitHub: scalable clustering using machine learning techniques*. Austrian Institute of Technology, 2024, 20 p. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5664665/v1>
- [4] Kalliamvakou E., Gousios G., Blincoe K., Singer L. *The promises and perils of mining GitHub. Mining Software Repositories: Conference*, 2015, 22 p. <https://doi.org/10.1145/2597073.2597074>

Development of a methodology for clustering github projects by development stages

Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru

Tikhonov Nikita Alexandrovich nikitatihonov@mail.ru

Dzhanaev Karim Sergeevich karim-2018@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This article presents a clustering methodology developed by the authors for classifying GitHub projects according to their development stages, based on the analysis of repositories from a Kaggle dataset. Using features such as the number of stars (ratings) and forks (copies), projects are divided into three types (library, prototype, tool) through the application of the k-nearest neighbors (KNN) classification algorithm. The paper includes a review of GitHub's theoretical foundations, a description of the developed algorithm and its programming features, and a justification of the clustering's effectiveness for analyzing project life cycles.

Keywords: GitHub, project development, clustering, KNN, software, open source

УДК 004.048

Разработка методики обработки данных с использованием глубокого обучения генеративно-состязательной нейронной сети (GAN)

Косова Ксения Алексеевна ksenya.kosova.04@mail.ru

Ильичев Владимир Юрьевич ilychev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена разработка методики обработки данных с использованием генеративно-состязательной нейронной сети (GAN). Для реализации методики использован язык Python с подключаемыми библиотеками TensorFlow/Keras, Pandas, NumPy, Matplotlib, Seaborn и Scikit-learn. Архитектура модели включает в себя генератор и дискриминатор, основанный на сверточной нейронной сети, задачей которого является различие реальных и сгенерированных данных. Обучение модели основано на состязательном процессе между этими двумя компонентами, что позволяет улучшать качество создаваемых данных. Были изучены возможности применения GAN для обработки данных, проведен анализ качества сгенерированных данных.

Ключевые слова: нейросетевое программирование, глубокое обучение, язык Python, генеративно-состязательная сеть.

Современная наука активно развивается в направлении создания и совершенствования математических методов обработки больших объемов данных с целью генерирования новой информации. Одним из наиболее востребованных подходов в данной области является машинное обучение, которое базируется на применении мощных вычислительных технологий и передовых методов построения нейронных сетей, а также их глубоком обучении (deep learning). Подобные технологии находят применение в промышленности для разработки инновационных конструкций, в дизайне для создания уникальных визуальных решений, в системах идентификации лиц, а также в сфере представления, где требуется воссоздание утраченных данных, например при восстановлении картин и фотографий.

В исследовании рассматривается процесс генерации новых объектов на основе взаимодействия двух нейросетей, организованных по принципу генеративно-состязательной архитектуры (Generative Adversarial Network, GAN). Эта модель включает два ключевых компонента: генератор и дискриминатор. Генератор обучается на исходных данных и стремится создавать новые объекты, максимально приближенные к реальным. Дискриминатор оценивает точность сгенерированных данных, сравнивая их с настоящими. В ходе обучения дискриминатор передает генератору обратную связь, что позволяет последнему постепенно совершенствовать создаваемые образцы [1]. Такой состязательный процесс приводит к тому, что со временем синтезируемые данные становятся практически неотличимыми от оригинальных, что

делает GAN эффективным инструментом для работы с различными типами информации.

Целью работы является разработка алгоритма и кода программы, включающей в себя процедуры создания элементов генеративно-состязательной нейросети, а также компиляции и обучения полученной модели.

Основной задачей является разработка модели, способной обучаться на реальных данных, а затем создавать их синтетические аналоги, соответствующие исходному распределению.

Работа включала в себя подготовку данных, разработку модели, обучение сети и анализ полученных результатов. В качестве исходных данных использовалась база поездок Uber, взятая с платформы Kaggle. Этот датасет содержит информацию о 4,5 млн поездок на Uber 2014 г. и 14 млн 2015 г., включая время, расстояние, стоимость и местоположение [2].

Основная цель анализа — выявить закономерности использования сервиса Uber в различных районах Нью-Йорка, с акцентом на временные аспекты, такие как часы пик, дни недели и сезонные колебания. Кроме того, проект исследует пространственные характеристики мест посадки пассажиров, чтобы определить зоны высокого спроса, что может помочь в оптимизации работы сервиса и улучшении качества обслуживания клиентов.

Топографическая схема генератора, выведенная из программы в графический файл с использованием библиотек Graphviz и Pydot, изображена на рис. 1.

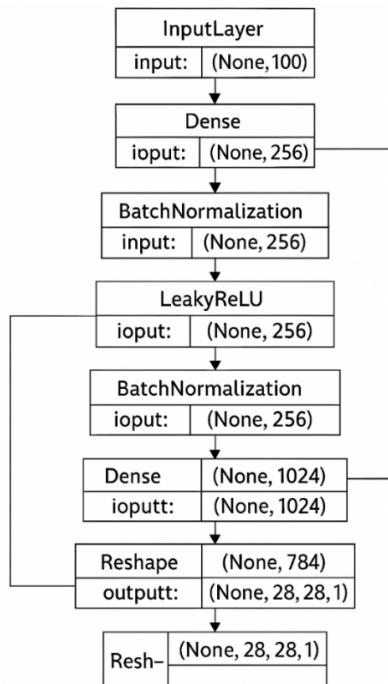


Рис. 1. Топография генератора нейросетевой модели

На изображении представлена блок-схема архитектуры нейронной сети, которая отражает процессы обработки данных в модели машинного обучения и включает в себя: входные данные (Input Layer), которые принимают исходную информацию для анализа (эта информация поступает в виде числовых значений или признаков); скрытые слои (Hidden Layers), которые выполняют вычисления с использованием весов и активационных функций, они трансформируют входные данные, выделяя важные паттерны и зависимости; выходной слой (Output Layer), который формирует финальный результат модели, например, прогноз или классификацию.

Нейросеть дискриминатора выполняет обучение генератора. На рис. 2 представлена структура дискриминатора, используемого в рассматриваемой модели.

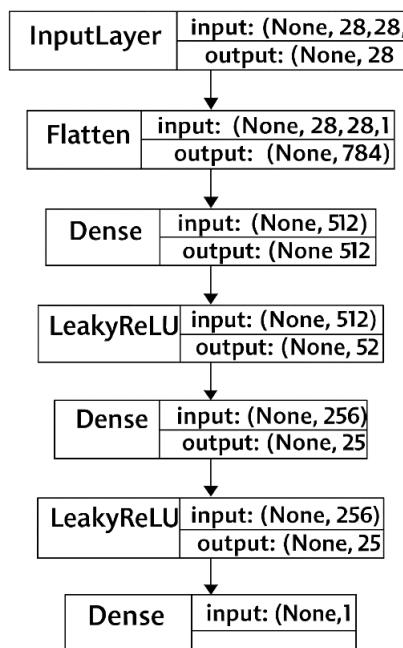


Рис. 2. Топография дискриминатора нейросетевой модели

Дискриминатор, изображенный на рис. 2, как и генератор, составлен по последовательной модели и имеет входной слой InputLayer для преобразования изображений в матрицу, которая после этого обрабатывается слоем Flatten для преобразования ее в одномерный вектор. Затем данные с целью разделения их на два класса (соответствие либо несоответствие тестовой выборке) обрабатываются тремя полносвязными слоями Dense с функциями активации LeakyReLU с постепенным уменьшением количества нейронов в каждом последующем слое [3].

Вначале был проведен статистический анализ исходной обрабатываемой базы данных, изображенный на рис. 3, на котором можно заметить в какой промежуток времени спрос на такси Uber начинает вырастать.

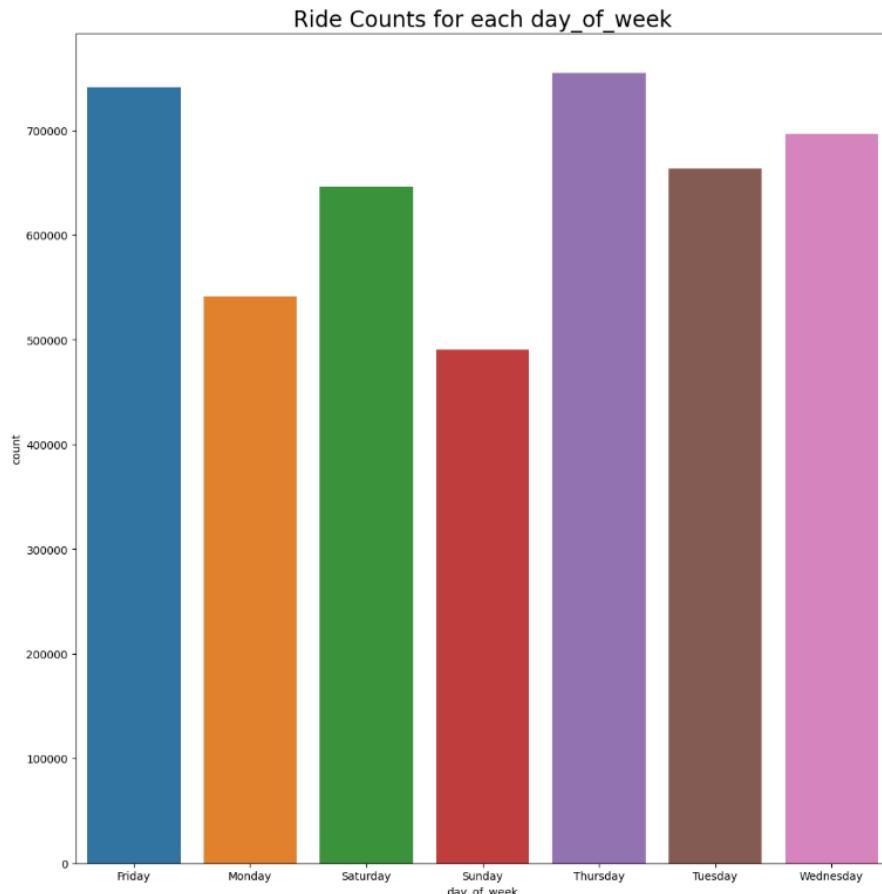


Рис. 3. Статистический анализ выявления спроса на поездки за неделю

Это было выявлено при помощи таких библиотек, как Pandas [4] и Matplotlib, которые позволяют гибко анализировать данные, строить диаграммы, графики и тепловые карты.

В целом, данные показывают, что спрос на Uber носит неравномерный характер с периодическими всплесками, что свидетельствует о влиянии внешних факторов, таких как различия между будними и выходными днями, праздники и, возможно, погодные условия. Анализ различий между будними и выходными днями показывает, что поездки Uber следуют разным паттернам. В будние дни пик спроса приходится на 7–9 утра и 16–19 вечера, что

соответствует типичным часам поездок на работу и с работы. В выходные дни поездки распределены более равномерно в течение дня.

Далее на тех же статистических данных по поездкам было произведено обучение GAN и создана нейросетевая модель, генерирующая новые синтетические данные. После завершения обучения было проведено сравнение исходных данных со сгенерированными. Визуальный анализ и расчет статистических показателей показали, что нейросеть успешно справилась с задачей генерации, создав синтетические данные, имеющие распределение, схожее с реальными данными. Это подтверждает эффективность использования генеративно-состязательных нейросетей для обработки данных, дополнения выборок и улучшения качества информации. После завершения обучения было проведено сравнение исходных данных с сгенерированными. Визуальный анализ и расчет статистических показателей показали, что нейросеть успешно справилась с задачей генерации, создав синтетические данные, имеющие распределение, схожее с реальными данными. Это подтверждает эффективность использования генеративно-состязательных нейросетей для обработки данных, дополнения выборок и улучшения качества информации [5].

Как и в исходных были выявлены пики вызова такси Uber за разные временные промежутки. Данная информация показана на рис. 4.

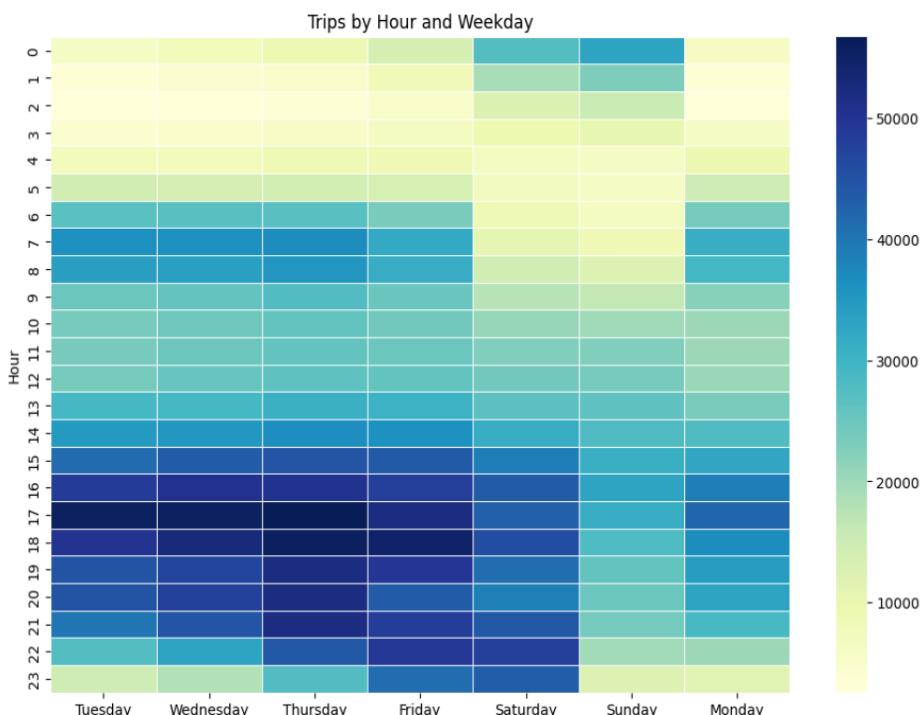


Рис. 4. Выявление пика спроса

Таким образом, в данном исследовании рассмотрен один из возможных вариантов применения генеративно-состязательных нейронных сетей (GAN) для обработки и генерации новых данных. В работе сформулированы принципы построения таких моделей с использованием современных инструментов глубокого обучения. Дальнейшее развитие генеративно-состязательных сетей связано с усовершенствованием их структуры, оптимизацией количества нейронов и соединений между слоями, а также с разработкой новых методов обучения. Принципы работы с GAN, рассмотренные в данном исследовании, могут быть использованы для обработки и генерации данных в самых различных областях, включая дополнение недостающей информации и улучшение качества имеющихся данных.

Литература

- [1] Магомадов В.С. Применение генеративно-состязательной сети для создания синтетических данных. *Вестник современных исследований*, 2018, № 6.3 (21), с. 515–519.
- [2] *Uber Pickups in New York City*. URL: <https://www.kaggle.com/code/ainurrohmanbw/uber-analytics/notebook>. (дата обращения 22.02.2025).
- [3] Плотников М.В. GAN — генеративные состязательные искусственные нейронные сети. *Математика и математическое моделирование. XIII Всерос. молодежной науч.-инновационной школы: сб. материалов*. Москва, Интерконтакт, 2019, с. 290–292.
- [4] Heydt M. *Learning Pandas — Python Data Discovery and Analysis Made Easy Learning Pandas*. Packt Publishing, 2023, pp. 297–309.
- [5] *The Python Deep Learning library*. URL: <https://keras.io/#why-thisname-keras> (accessed 24.02.2025).

Development of a data processing technique using deep learning generative adversarial neural network (GAN)

Kosova Kseniya Alekseevna

ksenya.kosova.04@mail.ru

Ilyichev Vladimir Yurievich

ilychev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The development of a data processing technique using a generative adversarial neural network (GAN) is considered. The Python language with plug-in libraries TensorFlow/Keras, Pandas, NumPy, Matplotlib, Seaborn and Scikit-learn was used to implement the methodology. The architecture of the model includes a generator and a discriminator based on a convolutional neural network, whose task is to distinguish between real and generated data. The training of the model is based on an adversarial process between these two components, which makes it possible to improve the quality of the generated data. The possibilities of using GAN for data processing were studied, and the quality of the generated data was analyzed.

Keywords: neural network programming, deep learning, Python language, generative-adversarial network

УДК 004.049

Анализ функционала технологий WebSocket и Long Polling для их использования при разработке чат-приложений

Иванов Никита Владимирович

destira@mail.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilychev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена описанию процесса и результатов анализа, основной метрики чат-приложений — времени доставки сообщения, написанных с использованием двух разных технологий: WebSocket и Long Polling. Сформулированы цель исследования, приведены краткие сведения об используемых подходах. Подобраны программные средства языка Python, позволяющие реализовать два вида чат-приложений, а также провести нагружочное тестирование. Составлены листинги программ, реализующие представленные подходы. Проведено нагружочное тестирование приложений. Выполнен анализ полученных результатов. Сделан вывод по использованию каждого из подходов.

Ключевые слова: чат-приложение, WebSocket, Long Polling, язык Python, время доставки сообщения, нагружочное тестирование

Введение. В современном мире веб-разработки чат-приложения стали неотъемлемой частью практически каждого серьезного онлайн проекта. Для реализации обмена сообщениями в реальном времени используют различные подходы, среди которых можно выделить WebSocket и Long Polling [1, 2].

Различные отрасли предъявляют к чат-приложениям большое количество всевозможных требований, поэтому веб-разработчики постоянно сталкиваются с проблемой выбора того или иного подхода. В данной работе будет сделан упор на одной из важнейших характеристик — времени, за которое сообщение доходит до получателя.

WebSocket — это технология, которая обеспечивает полноценную двустороннюю, асинхронную связь между клиентом и сервером в режиме реального времени, что позволяет обмениваться данными в обе стороны без необходимости постоянных HTTP-запросов [3].

Long Polling — это метод, при котором клиент отправляет HTTP-запрос на сервер и держит соединение открытым до тех пор, пока не получит ответ или не истечет таймаут.

Каждое из двух решений имеет как свои плюсы, так и минусы, которые всегда зависят от конкретной реализации. В данной работе будут рассмотрены и сравнены две наиболее общих реализации чат-приложений с использованием WebSocket и LongPolling.

Целью работы является сравнительный анализ двух подходов к реализации чат-приложений.

Задачами работы являются реализация двух вариантов чат-приложений и проведение нагрузочного тестирования, с целью выявления основных закономерностей.

Основная часть. В качестве программных средств разработки чат-приложений были выбраны язык программирования Python, и соответствующий ему самый используемый веб-фреймворк Django [4]. Реализация Django приложения состоит из нескольких основных этапов:

- инициализация проекта и используемых библиотек;
- реализация структуры базы данных;
- реализация логики;
- реализация Long Polling чата.

Первый этап является абсолютно одинаковым для всех Django приложений, поэтому он не заслуживает особого внимания.

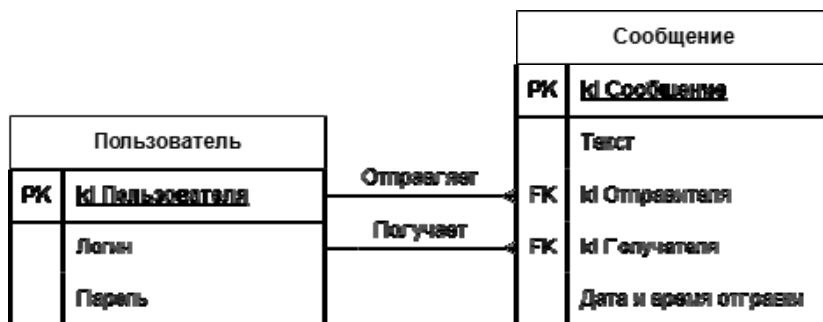


Рис. 1. Схема базы данных

Далее приведена схема рис. 1, которая представляет собой минимальную конфигурацию базы данных чат-приложения, обеспечивающую стабильную работу задуманной системы. Для реализации чата достаточно двух основных сущностей: «Пользователь» и «Сообщение». Пользователь имеет возможность авторизоваться и выбрать получателя сообщения. Получатель имеет доступ ко всем отправленным ему сообщениям. В качестве СУБД был выбран PostgreSQL [5]. После реализации базы данных, можно приступить к реализации логики.

Long Polling предполагает использование протокола HTTP, то есть основных запросов GET, POST и т. д. [3] Первоочередно реализуем запрос создания сообщения. Данный запрос является стандартным POST, без каких-либо особенностей. Далее реализуем запрос GET для получения новых сообщений. Именно он будет иметь непосредственное отношение к Long Polling. Разделим его на несколько этапов:

- определение получателя из запроса;
- определение последнего полученного сообщения, чтобы можно было узнать какие сообщения являются новыми;

– ожидание новых данных. На данном этапе происходит основная часть Long Polling соединения: на протяжении 20 секунд (стандартное значение) запрос ожидает новых сообщений. Если новых сообщений не найдено, соединение прерывается. В проектной реализации Long Polling при отсутствии новых сообщений, соединение необходимо инициализировать заново, но в рамках тестирования, такую ситуацию будем избегать.

После реализации основных функций приложения приступим к тестированию системы. В качестве инструмента для тестирования выбрана библиотека Locust [6]. Она предоставляет удобный веб-интерфейс для нагрузочного тестирования и способна предоставить метрики, которые нам необходимы для сравнения двух чат-приложений. Locust тест представляет собой так называемые задачи, которые вызываются со случайной задержкой (в нашем случае 0,5–1,5 с) во время работы теста. Также Locust предоставляет возможность выбора количества подключений к серверу и темп прироста подключений, по умолчанию 1 в секунду.

Для имитации Long Polling соединения была создана задача, в которой пользователь отправляет сообщение другому пользователю. Адресат ожидает новое сообщение. Все запросы вызываются асинхронно с помощью средств библиотеки gevent, так как при отправке HTTP запрос блокирует свой поток [7, 8]. Дополнительной метрикой фиксируется время от отправки сообщения до получения его пользователем.

Реализация WebSocket чата. Первые два этапа создания WebSocket чат-приложения полностью идентичны созданию Long Polling чат-приложения. Стоит лишь добавить, что для реализации WebSocket в Django предусмотрена библиотека Django Channels, которая и является основой нашего приложения. Для чистоты сравнения конфигурацию базы данных оставим такую же, как и в первом приложении.

WebSocket технология, предполагающая реализацию нескольких основных асинхронных методов. Первый из них — connect запрос, отвечающий за создание соединения между пользователями. Далее disconnect, который разрывает соединение. И, наконец, два основных запроса WebSocket — receive и send, делающие главную работу. Вместе они работают так:

- отправка сообщения (send);
- принятие и сохранение сообщения в базе данных (receive);
- отправка информации о новом сообщении получателю (receive).

Также стоит отметить, что в приложение был интегрирован брокер сообщений — база данных Redis [9]. Это позволит принимать сообщения асинхронно, что разгрузит веб-сервер и улучшит общую производительность. Данное решение является стандартным для WebSocket чат-приложения.

Для тестирования была создана Locust задача, в которой пользователь отправляет сообщение, а адресат принимает его. Также, как и в первом приложении, фиксируем время от отправки до получения сообщения.

Для каждого из приложения тестирование было проведено в 3 этапа по 5 повторений. Каждый этап характеризуется количеством подключений: 1, 20,

100, и временем проведения: 5 минут для каждого повторения. Затем для каждого этапа будут вычислены средние значения каждой метрики времени доставки сообщения.

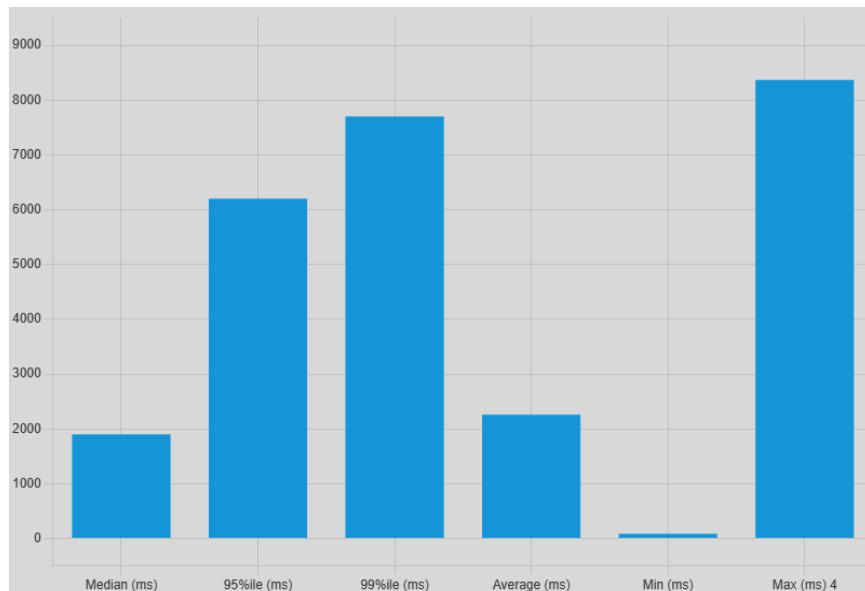


Рис. 2. Результаты тестирования Long Polling со 100 подключениями

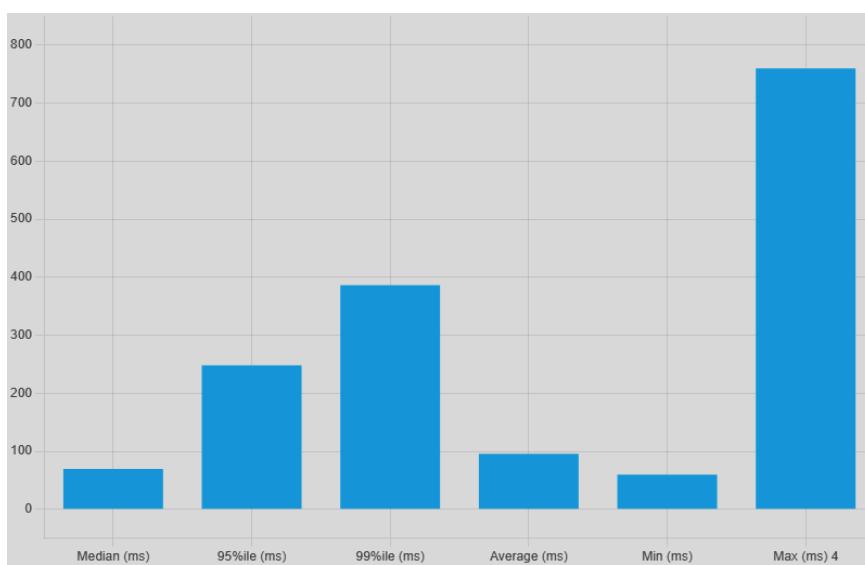


Рис. 3. Результаты тестирования WebSocket со 100 подключениями

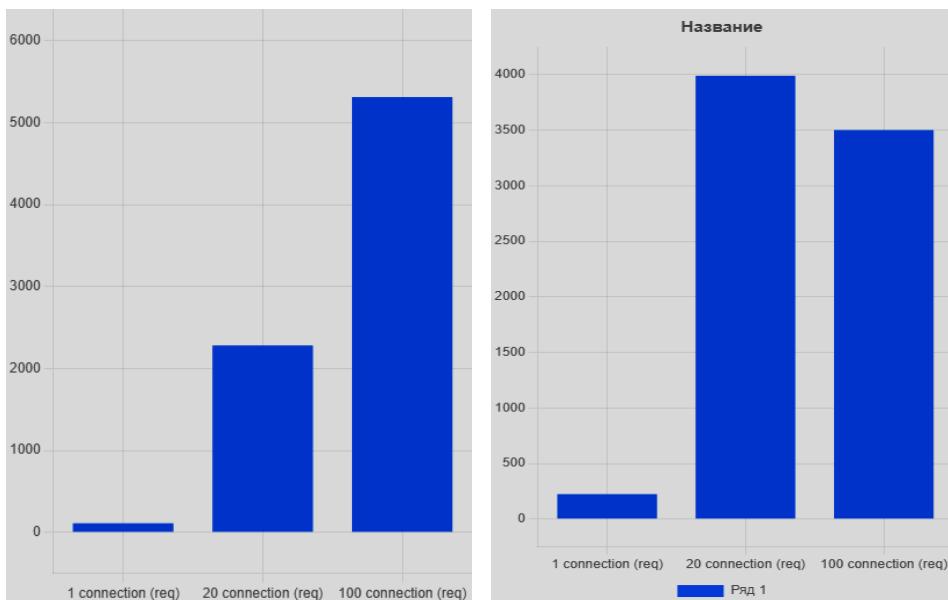


Рис. 4. Количество обработанных запросов Long Polling и WebSocket в зависимости от числа подключений

Сравнение результатов. Время доставки сообщения: при увеличении числа подключений медианное и среднее время доставки сообщения Long Polling чат-приложения показывает неизменно резкий рост. Время WebSocket чат-приложения показывает устойчиво небольшой рост. Количество запросов: при увеличении числа подключений Long Polling чат-приложение показывает устойчивый рост числа обрабатываемых запросов, но WebSocket чат-приложение способно обрабатывать большее количество запросов при условии, что будут выделены значительные серверные ресурсы.

Таким образом, можно сделать вывод, что цель данного исследования, заключающаяся в сравнительном анализе двух подходов к реализации чат-приложений, является полностью достигнутой. Разработаны два вида чат-приложений с помощью средств фреймворка Django. Проведено нагрузочное тестирование, результатом которого являются графики зависимости времени доставки сообщений и количества выполненных запросов от числа подключений. По результатам сравнения результатов, можно сказать, что более эффективным подходом является WebSocket, но при отсутствии больших серверных мощностей и небольшом числе подключений Long Polling также является приемлемым подходом.

Представленная работа может быть полезна как людям, интересующимся различными подходами к реализации чат-приложений, так и для практического использования в проектной и научной деятельности.

Литература

- [1] *Real-World Use Cases of WebSockets in Applications*. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/real-world-use-cases-websockets-applications-eric-lane-y8nmf> (accessed 21.03.2025).
- [2] What is Long Polling? URL: <https://dev.to/pubnub/what-is-long-polling-521h> (accessed 21.03.2025).
- [3] Кришнамурти Б., Рексфорд Дж. *Web-протоколы. Теория и практика*. Москва, ЗАО «Издательство БИНОМ», 2002, 592 с.
- [4] Винсент У.С. *Django для начинающих: Создание веб-сайтов с помощью Python и Django*. Москва, ДМК Пресс, 2020, 250 с.
- [5] Комаров В. *Путеводитель по базам данных*. Санкт-Петербург, Питер, 2020, 400 с.
- [6] *How to Create and Run First Performance Test with Locust Step-by-Step*. URL: <https://maddevs.io/writeups/first-performance-test-with-locust/> (accessed 23.03.2025).
- [7] Асинхронность в программировании. URL: <https://tproger.ru/articles/asynchronous-programming> (дата обращения 23.03.2025).
- [8] *What is Gevent & How to Install Gevent in Python*. URL: <https://www.cybrosys.com/blog/what-is-gevent-and-how-to-install-gevent-in-python> (accessed 31.03.2025).
- [9] *Redis — особенности и область применения*. URL: <https://www.cloud4y.ru/blog/what-is-redis/> (дата обращения 25.03.2025).

Analysis of the functionality of WebSocket and Long Polling technologies for their use in the development of chat applications

Ivanov Nikita Vladimirovich

destira@mail.ru

Ilyichev Vladimir Yurievich

ilychev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The article describes the process and the results of the analysis, the main metric of chat applications is the message delivery time, written using two different technologies: WebSocket and Long Polling. The purpose of the study is formulated, and brief information about the approaches used is provided. Python software tools have been selected that allow you to implement two types of chat applications, as well as perform load testing. Listings of programs have been compiled that implement the presented approaches. Load testing of applications has been performed. The analysis of the obtained results is performed. A conclusion is drawn on the use of each of the approaches.

Keywords: chat application, WebSocket, Long Polling, Python language, message delivery time, load testing

УДК 004.048

Разработка методики исследования характеристик фотоэлектрических солнечных панелей с использованием программных средств языка Python

Склярова Маргарита Сергеевна

margaritaskliarova@mail.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilychev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Описана реализация алгоритмов расчета характеристик фотоэлектрических солнечных панелей с использованием программных средств языка Python. Для визуализации результатов использовались библиотеки Matplotlib и Seaborn, что позволило получить наглядные графики. На основе полученной информации проведен краткий анализ, выявлены основные зависимости и особенности работы солнечных панелей, позволяющие провести технико-экономическое обоснование их применения в конкретном регионе, например.

Ключевые слова: солнечная электростанция, фотоэлектрические системы, энергия Солнца, библиотека PVlib

Одной из приоритетных задач в области развития фотоэлектрических технологий является повышение эффективности преобразования солнечного излучения в электрическую энергию при одновременном снижении себестоимости производства и минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду.

Настоящее исследование посвящено применению современных программных инструментов, позволяющих существенно упростить и ускорить процессы расчета и анализа параметров солнечных электростанций, основанных на использовании фотоэлектрических модулей [1].

Целью данного исследования является разработка программных средств на языке Python с применением библиотеки PVlib, которая предоставляет набор инструментов для численного моделирования процессов преобразования солнечного излучения в электрическую энергию с использованием полупроводниковых технологий [2].

Для визуализации полученных расчетных данных применяются библиотеки Matplotlib и Seaborn, что обеспечивает высокую информативность и наглядность представления результатов. Использование указанных инструментов способствует повышению точности анализа, улучшению качества проектирования солнечных энергетических систем и более объективной оценке их энергетической эффективности [3].

Разработанное в рамках настоящего исследования программное обеспечение, реализованное на Python, включает последовательность ключевых этапов моделирования:

– импорт необходимых библиотек и модулей, обеспечивающих выполнение расчетных процедур;

- загрузка и предварительная обработка климатических данных, включая определение координат установки и временных интервалов;
- ввод параметров панели вручную в случае ее отсутствия в стандартных базах данных;
- расчет электрических и сопутствующих характеристик фотоэлектрического модуля с использованием алгоритмов библиотеки PVlib;
- представление результатов в графической форме с применением средств визуализации для последующего анализа и интерпретации.

Применение разработанного программного инструментария позволяет гибко проводить численное моделирование функционирования фотоэлектрических систем с учетом различных внешних и эксплуатационных условий. В частности, возможна настройка пользовательского профиля изменения солнечной иррадиации во времени, что позволяет изучать отклик конкретного фотоэлектрического модуля в разнообразных сценариях освещенности.

Библиотека PVlib предоставляет обширный арсенал средств для расчета характеристик солнечных энергетических установок. В рамках настоящей работы были рассмотрены лишь некоторые из них, обладающие наибольшей практической значимостью:

- модель одноосного солнечного трекера, обеспечивающего динамическое изменение угла наклона панели в вертикальной плоскости в зависимости от текущего положения Солнца на небесной сфере;
- вольт-амперные характеристики (ВАХ), представляющие собой ключевой параметр для оценки работы фотоэлектрических модулей, поскольку они зависят как от интенсивности солнечного излучения, так и от температуры панели, изменяющейся в процессе эксплуатации.

На базе разработанного программного комплекса был осуществлен расчет и анализ параметров фотоэлектрических модулей, установленных в регионе г. Калуга. Географические координаты исследуемой территории (широта, долгота и высота над уровнем моря) были заданы в исходных условиях моделирования. Положение Солнца в различные временные моменты определялось с использованием инструментов библиотеки PVlib в совокупности с функционалом Pandas. Полученные значения использовались для расчета оптимального угла поворота трекинговой системы, синхронизирующей ориентацию панели с перемещением Солнца по небосводу.

На рис. 1 представлены результаты численного моделирования угловых параметров, характеризующих работу одноосного трекера в течение светового дня. Построенная модель позволяет проследить динамику ориентации фотоэлектрической панели, оптимизирующей свое положение относительно солнечного диска с целью максимального поглощения солнечного излучения.

На графиках отражены временные зависимости трех ключевых углов для выбранной календарной даты — 9 июля 2020 г. В частности, представлены:

- угол наклона трекера по отношению к горизонтальной поверхности (обозначен как `tracker_theta`);
- угол между плоскостью панели и поверхностью Земли (`surface_tilt`);

– угол падения солнечного потока (прямой составляющей нормированной иrradiации, DNI) на активную поверхность модуля (aoi).

В рамках последующего этапа исследования на языке Python с применением функционала библиотеки PVlib была реализована программа, предназначенная для расчета вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлектрического модуля. В качестве примера использовался промышленный модуль Q.PEAK DUO-G6 производства компании Q CELLS, номинальная мощность которого составляет 330 Вт. Технические параметры модуля были заимствованы из открытого источника [4].

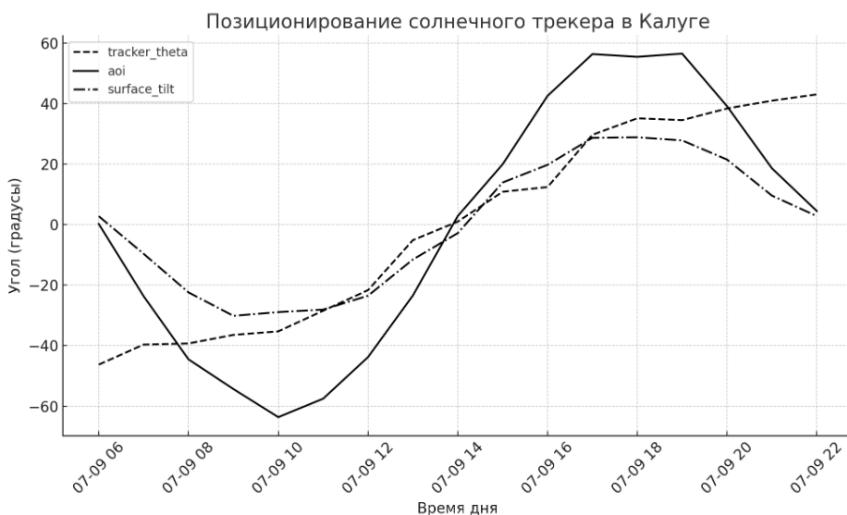


Рис. 1. Динамика углов поворота одноосного трекера в течение дня

На первом этапе моделирования использовалась физическая модель de Со-то [5], позволяющая определить основные электрические параметры модуля при заданных условиях — температуре и интенсивности солнечного излучения. Эта модель базируется на эталонных характеристиках панели и применяется для перехода от стандартных условий испытаний к реальным условиям эксплуатации. Далее расчеты ВАХ были выполнены путем численного решения однодиодной модели солнечного элемента с использованием метода Ламберта, что обеспечило адекватное учет рабочей температуры и иrradiации.

Полученные результаты были визуализированы с помощью библиотеки Matplotlib (рис. 2), что позволило проанализировать влияние внешних условий на форму вольт-амперной кривой модуля и выявить особенности его функционирования при различных уровнях освещенности и температурных режимах.

Рис. 2 иллюстрирует рассчитанные вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоэлектрического модуля при различных эксплуатационных условиях. Ле-

гenda графика составлена в соответствии с порядком расположения кривых сверху вниз.

Анализируя представленные зависимости, можно отметить наличие участка с почти постоянным током при малых значениях напряжения, что соответствует режиму короткого замыкания. Значение тока в данной области определяется совокупностью параметров, включая оптические характеристики и площадь модуля, а также спектральный состав и интенсивность падающего солнечного излучения.

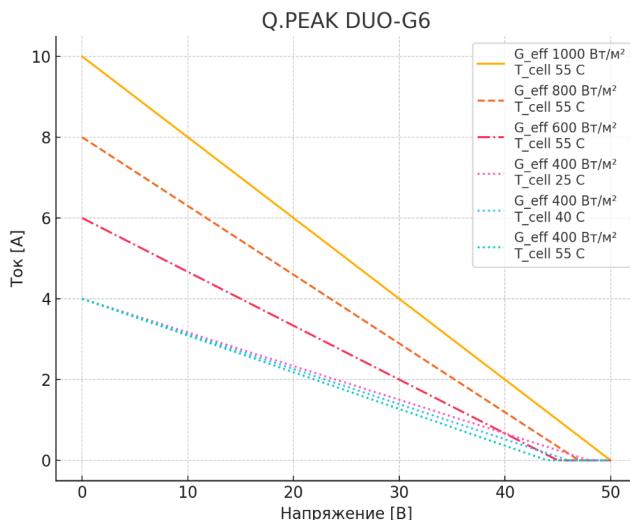


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики

Другой важной характеристикой, наблюдаемой на графиках, является напряжение холостого хода — это максимальное напряжение, регистрируемое при нулевом токе, которое для рассматриваемого модуля составляет около 50 В.

В процессе моделирования были также автоматически определены точки, соответствующие максимальной выходной мощности модуля, которые обозначены на графиках жирными маркерами. В реальных фотоэлектрических системах для идентификации этих рабочих точек применяются специальные алгоритмы и устройства, реализующие функцию максимального отслеживания точки мощности (MPPT). Это позволяет обеспечить работу панели в наиболее эффективном режиме при изменяющихся условиях освещенности и температуры.

В рамках проведенного исследования были выполнены численные расчеты углов ориентации одноосного трекера в зависимости от суточного перемещения Солнца на небосводе, применительно к географическому положению Калужской области. Также были смоделированы вольт-амперные

характеристики солнечного модуля Q CELLS Q.PEAK DUO-G6 при различных уровнях солнечной иrrадиации и температурных режимах.

Результаты исследования подтвердили эффективность применения библиотеки PVlib в связке с языком Python для целей моделирования и аналитической оценки параметров фотоэлектрических установок. Разработанное программное обеспечение может быть использовано при проектировании солнечных энергетических систем, позволяя адаптировать расчеты под конкретные климатические условия региона.

Литература

- [1] *Оценка энергии солнечного излучения.* URL: https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv_techirrad.htm (дата обращения 23.03.2025).
- [2] Stein J.S, Holmgren W.F., Forbess J., Hansen C. PVLIB: Open source photovoltaic performance modeling functions for Matlab and Python. *43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7750303>
- [3] *Kimber Soiling Model.* URL: https://pvlib-python.readthedocs.io/en/latest/auto_examples/plot_greensboro_kimber_soiling.html (accessed 23.03.2025).
- [4] *Параметры солнечного элемента.* URL: <http://ust.su/solar/media/section-inner14/1587/> (дата обращения 23.03.2025).
- [5] Ильичев В.Ю., Кусачева С.А., Лыков И.Н. Исследование характеристик фотоэлектрических солнечных панелей. *Экология урбанизированных территорий*, 2022, № 2, с. 34–39.

Development of a methodology for studying the characteristics of photovoltaic solar panels using python software

Sklyarova Margarita Sergeevna margaritaskliarova@mail.ru

Ilyichev Vladimir Yurievich ilychev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The paper describes in detail the implementation of algorithms for calculating the characteristics of photovoltaic solar panels using Python software. The Matplotlib and Seaborn libraries were used to visualize the results, which made it possible to obtain visual graphs. Based on the information received, a brief analysis was carried out, the main dependencies and features of the operation of solar panels were identified, allowing for a feasibility study of their use in a particular region, for example.

Keywords: solar power plant, photovoltaic systems, solar energy, Pvlib library

УДК 004.62

Автоматизация получения данных о курсах валют из различных источников и их дальнейшее использование в системе «Инструменты мультивалютности»

Кузнецов Роман Сергеевич

kuznetsovrs@student.bmstu.ru

Вершинин Евгений Владимирович

vershinin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема автоматизации получения актуальных данных о валютных курсах из различных источников и их дальнейшего использования в единой информационной системе. Основное внимание уделено описанию алгоритмов и механизмов парсинга данных, их хранению и интеграции через API-интерфейсы. Результаты исследования направлены на создание устойчивой и масштабируемой инфраструктуры для обеспечения участников системы актуальной информацией о валютных курсах.

Ключевые слова: автоматизация сбора данных, курсы валют, парсинг данных, REST API

В современных финансовых системах крайне важно оперативно и точно получать данные о курсах валют. Для внутренней системы «Инструменты мультивалютности», предназначенный для работы с валютно-обменными операциями, критически важно иметь доступ к актуальным курсам из различных источников, таких как:

- центральные банки (ЦБ РФ, ЦБ Казахстана, ЦБ Узбекистана);
- финансовые платформы (Bloomberg, МОEX);
- общедоступные сервисы (Xe.com).

Ручной сбор данных неэффективен из-за высокой трудоемкости и риска ошибок. Кроме того, данные из разных источников имеют различные форматы представления, что усложняет их интеграцию в единую систему.

Необходимо определить эффективные методы автоматизации получения и унификации данных, чтобы обеспечить их доступность и удобство использования для всех пользователей системы для последующего использования в бизнес-процессах.

Задачи исследования:

- проанализировать структуры данных каждого источника;
- описать систему сбора и хранения «сырых» данных;
- описать метод REST API для доступа к курсам валют;
- предоставить возможный способ применения полученных данных в системе «Инструменты мультивалютности».

Анализ источников данных и методов их получения. Каждый источник имеет свою структуру данных, что требует индивидуального подхода к парсингу. Парсер — это программа, предназначенная для извлечения структури-

рованных данных из неструктурированного текста или HTML-кода. Для каждого источника валюты требуется создать отдельный парсер, учитывая специфику структуры данных на соответствующем сайте [1] (см. таблицу).

Сравнение источников данных о курсах валют

Источник	Формат данных	Метод сбора	Особенности парсинга
ЦБ РФ	XML, JSON (API)	REST API	Официальный курс публикуется ежедневно, структура стабильна
ЦБ Казахстана	HTML, CSV	Веб-скрейпинг	Необходимо извлекать таблицы с курсами по CSS/XPath
ЦБ Узбекистана	JSON (https://cbu.uz/common/json)	REST API	Готовый JSON-формат, не требует сложной обработки
Bloomberg	Протокол BLPAPI	Спец. API	Требуется лицензия и настройка подключения
Xe.com	HTML, JSON (неофициальное API)	Веб-скрейпинг	Динамическая загрузка данных, возможны ограничения
MOEX	XML, JSON (API)	REST API	Официальное API Московской биржи

Парсер для ЦБ РФ:

- источник: https://www.cbr.ru/scripts/XML_daily.asp;
- метод: REST API (XML → преобразование в JSON);
- ключевые поля: Valute → CharCode, Value.

Парсер для ЦБ Казахстана:

- источник: <https://nationalbank.kz/>;
- метод: веб-скрейпинг (извлечение таблицы через XPath);
- ключевые элементы: div.currency-table → tr → td.

Парсер для ЦБ Узбекистана:

- источник: <https://cbu.uz/common/json>;
- метод: готовый JSON, минимальная обработка;
- ключевые поля: Ccy, Rate, Date.

Парсер для Bloomberg:

- метод: BLPAPI (требуется подписка);
- пример запроса: getReferenceData("EURKZT Curncy", ["PX_LAST"]).

Парсер для Xe.com:

- метод: неофициальное API или скрейпинг;
- пример запроса:

<https://www.xe.com/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=EUR&To=KZT>.

Парсер для МОEX:

источник:

<https://iss.moex.com/iss/engines/currency/markets/selt/boards/CETS/securities.json>;

– метод: официальное API.

Каждый парсер необходимо разработать таким образом, чтобы извлекать актуальные курсы валют и сохранять их в стандартизированной форме для дальнейшей обработки [2].

Система сбора и хранения «сырых» данных. Систему можно представить из следующих компонентов:

– микросервис парсинга — отвечает за сбор данных из каждого источника по расписанию [3];

– база данных — хранит исторические и актуальные курсы;

– REST API — предоставляет доступ к данным в унифицированном формате.

Схема работы:

– парсеры загружают данные по расписанию (например, каждые 30 минут);

– данные нормализуются и сохраняются в БД;

– внешние системы (например, «Инструменты мультивалютности») запрашивают курсы через API.

REST API для взаимодействия с системой. Для получения актуальных курсов в унифицированном виде необходимо предоставить HTTP GET метод [4].

GET /all-source-currencies

параметры

– currencies — массив строк валютных пар (RUBUSD, EURKZT);

– source — источник данных (kz_bank, ru_bank).

Пример ответа

```
{
  "success": true,
  "source": "kz_bank",
  "currencies": {
    "EURKZT": {
      "rate": 537.16,
      "ratio": 1,
      "last_updated_at": "2025-03-28T04:27:38.858696",
      "rate_actual_at": "2025-03-27T19:00:00"
    }
  }
}
```

где

– success — успешен или нет запрос;

– source — источник, по которому запрашивался курс;

– currencies — массив объектов запрашиваемых валютных пар;

– currencies.rate — курс;

– currencies.ratio — коэффициент;

– currencies.last_updated_at — время последнего получения курса из источника;

– currencies.rate_actual_at — дата, на которую курс актуален

Возможные ошибки:

– 404 Not Found — если валюта или источник не поддерживаются;

– 500 Server Error — если данные временно недоступны.

Применение данных в системе «Инструменты мультивалютности».

Полученные курсы можно использовать для:

– конвертации валют при платежах и транзакциях;

– анализа валютных рисков (например, при работе с экспортом/импортом);

– автоматического пересчета балансов в разных валютах;

– обновление внутренних баз данных (курсы валют регулярно обновляются и сохраняются в локальной базе данных, доступной пользователям системы);

– аналитика и отчетность (актуальные данные о курсах валют применяются для построения графиков, анализа трендов и подготовки отчетности);

– принятие решений (финансовая информация используется для оценки рисков, планирования бюджетов и проведения валютных операций).

Пример бизнес-процесса:

– финансист запрашивает курс USDRUB из ЦБ РФ;

– система автоматически применяет его при расчете стоимости контракта;

– данные сохраняются в журнале операций для аудита.

Таким образом, внедрение автоматизированной системы сбора данных, используя вышеперечисленные методы, позволит повысить эффективность работы финансовых специалистов и партнеров, снижая вероятность ошибок и ускоряя процессы принятия решений, а также улучшить качество и скорость обработки финансовой информации в рамках единой информационной системы «Инструменты мультивалютности».

Литература

- [1] Буценко Е.В. Информационно-аналитическая система мониторинга рынка акций и валют. Урал — драйвер неоиндустриального и инновационного развития России. III Урал. эконом. форум: материалы. Екатеринбург, УГЭУ, 2021, с. 75–79.
- [2] Калягин М.Ю. Адаптивный парсер данных сайтов-агрегаторов вакансий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683699 РФ, 2024.
- [3] Соснин А.С., Шакуто Е.А. Разработка программного обеспечения для сбора и интеграции информации в процессе проектирования образовательного процесса вуза. Наука и инновации в современном мире: сб. ст. Москва, Перо, 2019, ч. 2, с. 210–215.
- [4] Поскребышев Р.С., Тарасов В.Г. API на основе SOAP и REST. Молодые ученые — ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. IV Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. уч.: сб. материалов. Ижевск, ИННОВА, 2016, с. 404–410.

Automation of obtaining data from various currency sources and their further use in the Multicurrency Tools system

Kuznetsov Roman Sergeevich kuznetsovrs@student.bmstu.ru

Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The article discusses the problem of automating the acquisition of up-to-date exchange rate data from various sources and their further use in a single information system. The main focus is on describing algorithms and mechanisms for parsing data, storing it, and integrating it through APIs. The research results are aimed at creating a stable and scalable infrastructure to provide system participants with up-to-date information on exchange rates.

Keywords: automation of data collection, currency rates, data parsing, REST API

УДК 004.048

Разработка метода анализа автомобильного рынка с использованием библиотеки Pandas

Илюхин Данила Владиславович

iluhind098@gmail.com

Ильичев Владимир Юрьевич

ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведен анализ и обработка данных автомобильного рынка с использованием библиотеки Pandas. Для выявления взаимосвязей между характеристиками автомобилей разработана программа на Python с использованием линейной модели Пирсона. Представлены этапы работы программы, включая предобработку данных, вычисление коэффициентов корреляции и интерпретацию полученных результатов. Выявлена зависимость между ценами на автомобили и их характеристиками. Показаны преимущества подхода по сравнению с традиционными методами, преимуществами Python. Даны рекомендации по дальнейшему развитию методики. Показана простота обработки большого объема данных средствами Python.

Ключевые слова: статистические данные, линейная модель, характеристики автомобилей, язык Python, библиотека Pandas

В условиях цифровизации экономики анализ больших данных становится ключевым инструментом для принятия решений. Особенно это актуально для автомобильного рынка, где динамика цен зависит от множества факторов: года выпуска, пробега, технических характеристик. Чтобы принимать взвешенные решения на основе данных, просто собирать их недостаточно — нужен еще грамотный анализ. Традиционные методы анализа уже не справляются с объемами информации, что делает востребованными автоматизированные решения на базе современных языков программирования, таких как Python [1–3].

Цель работы — разработать алгоритм анализа данных для прогнозирования стоимости подержанных автомобилей с учетом ключевых параметров: года выпуска, пробега, мощности и объема двигателя. Определить факторы, влияющие на цены подержанных автомобилей. В отличие от существующих решений, предлагаемый метод позволит не только визуализировать зависимости, но и строить прогнозные модели для разных марок, что полезно для дилеров и покупателей.

В работе рассматривается сравнение стоимости статистических рыночных моделей для автомобилей двух марок: BMW и Mercedes-Benz без детализации по конкретным моделям.

В качестве исходных данных использовалась выборка объявлений о продаже автомобилей этих марок, полученная сайтом [4]. Для исследования были отфильтрованы только предложения по моделям BMW (82 наблюдения) и Mercedes-Benz (79 наблюдений), т. е. массив данных для BMW содержит информацию о 82 автомобилях, а для Mercedes-Benz — о 79. Из исходного

набора переменных оставлены пять ключевых параметров: «Текущая цена», «Год выпуска», «Пробег», «Объем двигателя», «Мощность двигателя». Основным инструментом для импорта и анализа данных в языке Python стала библиотека Pandas, обладающая обширными функциональными возможностями [5].

При проведении исследования был написан код программы на языке Python для обработки данных об автомобилях, включающий следующие этапы:

- инициализация рабочей среды (импорт библиотек Pandas (основная), Matplotlib.pyplot (визуализация данных) и Statsmodels [6]);
- загрузка и предобработка сырых данных об автомобилях одной из марок;
- эксплораторный анализ (описательная статистика);
- корреляционный анализ;
- построение регрессионных моделей;
- визуализация результатов;
- интерпретация полученных зависимостей.

Для демонстрации работоспособности разработанного алгоритма был проведен детальный разбор данных по автомобилям премиального сегмента. В качестве примера рассмотрим результаты обработки информации о транспортных средствах марки BMW. Последующие этапы анализа, вплоть до итоговых результатов, также будут показаны только для этой марки автомобилей. Для удобства и большей наглядности данные будут представлены в формате Excel. Разработанный метод анализа применим к первым 10 строкам базы данных автомобилей BMW (табл. 1).

Таблица 1

Первые 10 строк базы данных автомобилей BMW

Текущая цена	Год выпуска	Пробег	Объем двигателя	Мощность двигателя
1 200 000	2010	178 000	2,5	218
3 000 000	2013	149 000	3,0	245
2 600 000	2016	123 456	2,0	190
2 649 000	2012	163 000	3,0	306
2 675 000	2018	100 000	2,0	190
2 700 000	2018	82 500	2,0	184
1 150 000	2004	325 000	3,0	218
1 299 000	2009	184 000	4,8	355

Из табл. 1 видно, что данные для исследования взяты для автомобилей 2004–2018 гг. выпуска; с диапазоном пробега от 82 500 до 325 000 км; объем двигателя — от 2,0 до 4,8 л; мощность двигателя от 184 до 355 л.с.

В табл. 2 приведены основные статистические показатели, рассчитанные для всего массива данных: количество валидных наблюдений, средние значения и стандартные отклонения, минимальные и максимальные значения, квартильные распределения.

Таблица 2

Статистические зависимости для базы данных автомобилей BMW

	Price	Year	Mileage	Capacity	Power
count	82	82	82	82	82
mean	2 564 183	2 014,012	110 349,2	2,717 073	259
std	1 397 987	4,2759 56	62 941,18	0,940 686	102,570 4
min	1 035 000	2 002	3 800	0,6	136
25%	1 499 999	2 011	69 248,25	2	190
50%	2 470 000	2 014	100 000	2,75	245
75%	3 000 000	2 017	140 000	3	306
max	10 800 000	2 021	325 000	4,8	575

Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 3, где отражены коэффициенты линейной связи между исследуемыми параметрами автомобилей BMW.

Таблица 3

Коэффициенты линейной корреляции для показателей автомобилей BMW

	Price	Year	Mileage	Capacity	Power
Price	1	0,615 162	-0,552 77	0,0517 37	0,154 109
Year	0,615 162	1	-0,577 65	-0,481 93	-0,309 95
Mileage	-0,552 77	-0,577 65	1	0,172 985	0,001 81
Capacity	0,051 737	-0,481 93	0,172 985	1	0,869 782
Power	0,154 109	-0,309 95	0,001 81	0,869 782	1

Из табл. 3 видно, что наибольшая взаимосвязь проявляется между мощностью и объемом двигателя. Также видно влияние остальных показателей на цену, особенно год выпуска автомобиля, который демонстрирует наиболее сильную зависимость от стоимости.

Учитывая ранее выявленное сильное влияние года выпуска автомобиля на его стоимость, рассмотрим графическое представление этой зависимости, построенное с использованием библиотеки Matplotlib и функций пакета Statmodels, для автомобилей BMW (рис. 1) и Mercedes-Benz (рис. 2).

На рис. 1, 2 синий цвет — это фактические значения стоимости из базы данных, красный цвет — предсказанные значения, полученные с помощью разработанной модели. При экстраполяции в глубокое прошлое модель может давать некорректные результаты (например, отрицательные цены). Для повышения точности и значимости результатов необходимо использовать более актуальные и полные базы данных.

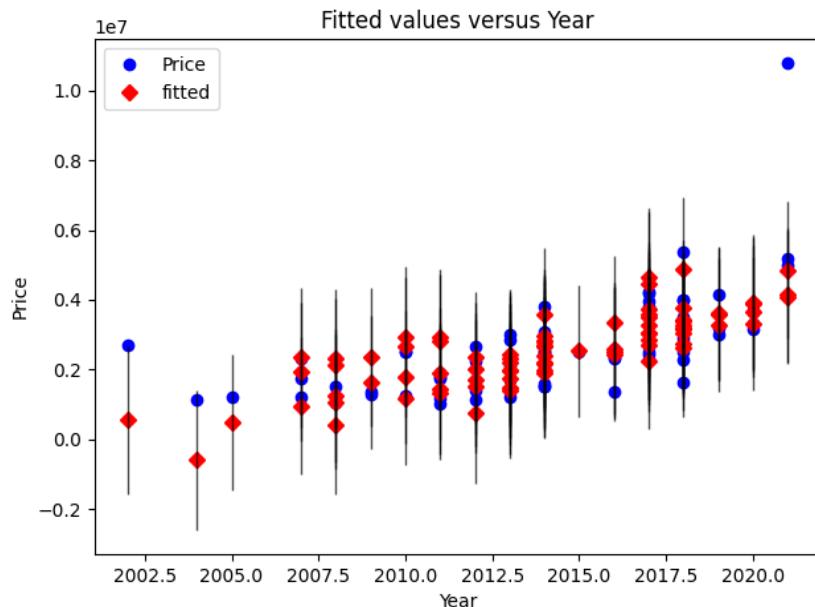


Рис. 1. Зависимость стоимости автомобилей BMW от года выпуска

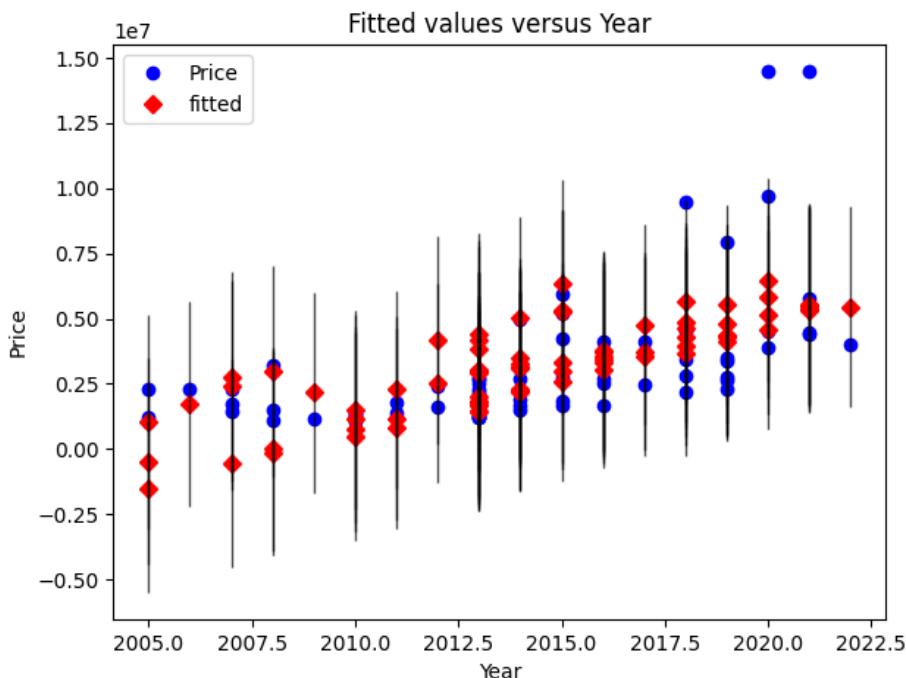


Рис. 2. Зависимость стоимости автомобилей Mercedes-Benz от года выпуска

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность применения методов машинного анализа данных для оценки стоимости подержанных автомобилей. Разработанная методика, основанная на использовании Python и специализированных библиотек (Pandas, Matplotlib, Statsmodels), позволила выявить ключевые факторы ценообразования: наибольшее влияние на стоимость оказывает год выпуска, объем и мощность двигателя демонстрируют сильную взаимозависимость, пробег показывает умеренную отрицательную корреляцию с ценой.

Перспективы дальнейшего развития исследования включают расширение набора анализируемых параметров, таких как комплектация автомобилей, ставка по автокредитованию. Кроме того, планируется применение более сложных нелинейных моделей для улучшения точности прогнозов. Увеличение объема и актуальности данных также является важным направлением, поскольку это позволит повысить значимость результатов. Разработка специализированных модулей для различных сегментов рынка позволит адаптировать модель под конкретные потребности. Растущий интерес к вторичному рынку автомобилей и необходимость глубокого анализа данных для принятия более обоснованных решений покупателями и продавцами делает данные исследования весьма актуальными и востребованными.

Выполненный анализ позволяет получить ясное представление о динамике цен на подержанные автомобили, а также влияние различных параметров на стоимость. Следует отметить, что проведенные исследования демонстрируют эффективность использования возможностей языка Python для анализа больших данных, получены результаты, которые заслуживают дальнейшего изучения с помощью предложенного инструмента.

Литература

- [1] Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание отчетов по доходам организаций с помощью языка Python. *Вектор экономики*, 2020, № 6 (48), с. 10.
- [2] Шитова Т.Ф. Использование передовых информационных технологий в бухгалтерском учете. *Международный бухгалтерский учет*, 2012, № 22, с. 21–26.
- [3] Слободняк И.А., Пискунов И.В. Актуальные проблемы автоматизации бухгалтерского учета и отчетности. *Бухгалтерский учет в бюджетных и некоммерческих организациях*, 2014, № 7, с. 29–34.
- [4] Парсинг всех полей объявлений с сайтов: АвтоВ, Авто.ру, Юла, Дром. URL: <https://auto-parser.ru> (дата обращения 30.03.2025).
- [5] Pandas documentation. URL: <https://pandas.pydata.org/docs/index.html> (accessed 29.03.2025).
- [6] Statsmodels — introduction. URL: <https://www.statsmodels.org/stable/index.html> (accessed 29.03.2025).

Development of a method for analyzing the automotive market using the Pandas library

Ilyukhin Danila Vladislavovich

iluhind098@gmail.com

Ilyichev Vladimir Yuryevich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The analysis and processing of automotive market data using the Pandas library has been carried out. To identify the relationships between the characteristics of cars, a Python program has been developed using the linear Pearson model. The stages of the program's operation are presented, including data processing, calculation of correlation coefficients and interpretation of the results obtained. The relationship between car prices and their characteristics has been revealed. The advantages of the approach in comparison with traditional methods, the advantages of Python are shown, and recommendations for further development of the methodology are given. The simplicity of processing a large amount of data using Python is shown.

Keywords: statistical data, linear model, car characteristics, Python language, Pandas library

УДК 004.049

Сравнительный анализ реляционных систем управления базами данных с целью выбора оптимальной для использования в техническом университете

Корнеев Константин Михайлович

korneev_k_m@mail.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В научно-исследовательской работе проведен сравнительный анализ реляционных СУБД (MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server, Oracle) и систем LMS (Moodle, Blackboard, Canvas, Open edX) для технического университета. Анализ включает производительность, надежность, масштабируемость и администрирование. PostgreSQL подходит для сложных транзакций и запросов, в то время как MySQL — для интенсивных операций чтения. Moodle и Open edX часто используются в образовании за свою гибкость и открытость. Работа направлена на выбор оптимального сочетания СУБД и LMS для эффективного управления образовательным процессом и исследовательской деятельностью ВУЗа.

Ключевые слова: реляционные СУБД, базы данных, PostgreSQL, LMS, Moodle, выбор СУБД, технический университет

Современные образовательные учреждения активно используют цифровые технологии для организации учебного процесса, хранения данных и управления образовательными ресурсами. Ключевыми элементами таких систем являются реляционные системы управления базами данных (СУБД) и системы управления обучением (LMS), обеспечивающие надежное хранение и обработку информации.

Выбор оптимальной СУБД и LMS для технического университета — сложная задача, требующая учета множества факторов: производительности, масштабируемости, безопасности, удобства администрирования и соответствия образовательным потребностям. Неправильный выбор может привести к снижению эффективности работы информационных систем, увеличению затрат на поддержку и сложности в адаптации пользователей.

В данной работе проводится сравнительный анализ популярных реляционных СУБД и LMS. Цель исследования — выявить наиболее подходящее сочетание этих систем для эффективного использования в техническом университете. Результаты анализа позволят определить оптимальное решение, которое обеспечит надежное управление образовательными процессами, повысит удобство использования цифровых платформ и будет соответствовать требованиям современного технического образования.

В образовательных учреждениях, особенно в технических университетах, используются как реляционные системы управления базами данных (СУБД), так и системы управления обучением (LMS — Learning Management System).

Среди наиболее популярных реляционных СУБД можно выделить MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server и Oracle Database, а среди LMS — Moodle, Blackboard, Canvas и Open edX [1].

1. Реляционные СУБД

1.1. MySQL

Плюсы:

- поддерживается большинством LMS;
- высокая скорость работы на операциях чтения;
- бесплатная версия с открытым исходным кодом [2].

Минусы:

- ограниченная поддержка ACID-транзакций;
- менее гибкая система управления пользователями [3].

1.2. PostgreSQL

Плюсы:

- надежная и соответствующая стандартам SQL система;
- полная поддержка ACID и расширенные возможности;
- хорошая производительность при высоких нагрузках [4].

Минусы:

- требует больше ресурсов, чем MySQL;
- сложнее в настройке [4].

1.3. Microsoft SQL Server

Плюсы:

- интеграция с продуктами Microsoft;
- высокая производительность и безопасность [3].

Минусы:

- высокая стоимость лицензии;
- ограниченная поддержка на других ОС, кроме Windows [3].

1.4. Oracle Database

Плюсы:

- высокая масштабируемость и производительность;
- надежность и расширенные аналитические возможности [2].

Минусы:

- высокая стоимость лицензии;
- сложность администрирования [2].

2. Системы управления обучением (LMS)

2.1. Moodle. Описание: открытая и наиболее популярная LMS, используемая в университетах.

Плюсы:

- бесплатная и с открытым исходным кодом;
- гибкость и возможность кастомизации;
- хорошая интеграция с различными СУБД [5].

Минусы:

- требует значительных ресурсов при росте количества пользователей;
- интерфейс может быть сложным для начинающих пользователей [5].

2.2. Blackboard. Описание: коммерческая LMS, широко используемая в корпоративных и образовательных учреждениях.

Плюсы:

- развитая система аналитики и управления пользователями;
- интеграция с корпоративными СУБД [6].

Минусы:

- высокая стоимость;
- закрытый исходный код [6].

2.3. Canvas. Описание: современная облачная LMS с поддержкой открытых стандартов.

Плюсы:

- интуитивно понятный интерфейс;
- гибкость в интеграции с различными СУБД [6].

Минусы:

- коммерческая модель лицензирования;
- меньшая гибкость по сравнению с Moodle [6].

2.4. Open edX. Описание: платформа с открытым исходным кодом для массовых онлайн-курсов (МООС).

Плюсы:

- поддержка крупных курсов с тысячами пользователей;
- гибкость и кастомизация [6].

Минусы:

- требует сложной настройки и администрирования;
- высокая нагрузка на сервер при масштабировании [6].

Характеристика	MySQL	PostgreSQL	MS SQL Server	Oracle Database	Moodle	Blackboard	Canvas	Open edX
Лицензия	Open Source	Open Source	Коммерческая	Коммерческая	Open Source	Коммерческая	Коммерческая	Open Source
Производительность	Высокая на чтении	Высокая на всех операциях	Высокая	Очень высокая	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
Масштабируемость	Средняя	Высокая	Высокая	Очень высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Безопасность	Средняя	Высокая	Высокая	Очень высокая	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
Простота настройки	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая
Использование в образовании	Да	Да	Ограниченно	Ограниченно	Да	Да	Да	Да

Рис. 1. Сравнение реляционных СУБД и LMS

Таким образом, выбор базы данных и LMS зависит от требований университета. Moodle является отличным вариантом для большинства учебных заведений, а наиболее подходящими СУБД для его работы являются MySQL и PostgreSQL.

Выбор системы управления базами данных (СУБД) для технического университета должен учитывать специфику данного типа образовательных учреждений. В отличие от гуманитарных вузов или корпоративных образовательных платформ, технические университеты работают с большими объе-

мами данных, сложными вычислительными процессами и специализированными программными инструментами. Ключевые требования к СУБД для технического университета включают:

– высокую производительность и масштабируемость. Технические университеты имеют большие объемы данных, включая информацию о студентах, преподавателях, учебных курсах, лабораторных работах и исследовательских проектах. Система должна поддерживать тысячи одновременных подключений без потери скорости работы [3];

– поддержку сложных запросов и аналитики. В техническом образовании активно используются автоматизированные системы оценки знаний, моделирования и анализа данных. СУБД должна обеспечивать обработку сложных SQL-запросов, работу с большими наборами данных и интеграцию с аналитическими системами [4];

– гибкость интеграции с различными ИТ-системами. Вуз использует не только LMS, но и системы электронного документооборота, библиотеки, научные базы данных, а также программное обеспечение для моделирования, расчетов и симуляций. СУБД должна поддерживать взаимодействие с этими системами через API, встроенные расширения и внешние хранилища данных [7];

– высокий уровень безопасности. Университеты хранят персональные данные студентов и сотрудников, результаты экзаменов, научные исследования и внутреннюю документацию. Система должна обеспечивать защиту от несанкционированного доступа, поддержку шифрования данных и возможность разграничения прав пользователей [2].

На основе анализа требований, оптимальным решением для технического университета является использование Moodle в сочетании с PostgreSQL.

Почему Moodle? Moodle является одной из наиболее гибких и широко используемых LMS в мире, что делает ее подходящей для образовательного процесса технического вуза. Она поддерживает сложные форматы заданий, тестирования и взаимодействия между студентами и преподавателями, а также интеграцию с различными системами управления учебными процессами [5].

Почему PostgreSQL? PostgreSQL соответствует всем ключевым требованиям, предъявляемым к СУБД технического университета. Она обладает высокой производительностью и поддерживает сложные аналитические запросы, что особенно важно для систем оценки знаний, анализа посещаемости и научных исследований. PostgreSQL также обеспечивает надежную систему безопасности, встроенные механизмы репликации и резервного копирования, а открытый исходный код позволяет минимизировать затраты на развертывание и поддержку.

Использование Moodle с PostgreSQL позволяет техническому университету создать надежную и гибкую систему управления обучением, которая учитывает специфику инженерного образования, высокие требования к аналитике данных и необходимость интеграции с научно-исследовательскими платформами.

В ходе проведенного исследования был выполнен сравнительный анализ реляционных систем управления базами данных (СУБД) и систем управления обучением (LMS) с целью определения наиболее оптимального сочетания

для использования в техническом университете. Результаты анализа показали, что реляционные СУБД играют ключевую роль в обеспечении надежного хранения и управления образовательными данными. Среди рассмотренных решений PostgreSQL продемонстрировала наилучшее сочетание надежности, безопасности, масштабируемости и гибкости, что делает ее предпочтительным выбором для работы с LMS. Системы управления обучением являются важным элементом цифровой образовательной среды. Moodle была выбрана в качестве оптимального решения для технического университета благодаря открытому коду, широким возможностям настройки и активному сообществу разработчиков. Использование PostgreSQL в качестве СУБД для Moodle обеспечивает стабильную работу LMS, высокую производительность и расширенные функции безопасности.

Литература

- [1] Григорьев С.А. *Системы управления базами данных: теория и практика*. Москва, Бином, 2020, 432 с.
- [2] Эльмасри Р., Наватх Ш.Б. *Основы систем баз данных*. Москва, Диалектика, 2021, 1272 с.
- [3] Дата Р. *Введение в системы баз данных*. Москва, Вильямс, 2019, 856 с.
- [4] Stone R. *PostgreSQL High Performance*. Packt Publishing, 2020, 450 p.
- [5] Dougiamas M., Taylor P. Moodle: Using Learning Communities to Create an Open Source Course Management System. *Proceedings of the EdMedia + Innovate Learning Conference*, 2003, pp. 128–134.
- [6] Zhang W., Wang H. Comparing Open-Source Learning Management Systems: Moodle, Sakai, and Blackboard. *Journal of Educational Technology Research*, 2022, vol. 5, no. 3, pp. 210–225.
- [7] Alhazmi O.H., Malaiya Y.K. Evaluating Disaster Recovery Plans for Educational Institutions. *International Journal of Information Security*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 85–102.

Comparative analysis of relational database management systems in order to select the optimal one for use at a technical university

Korneev Konstantin Mikhailovich korneev_k_m@mail.ru

Ilyichev Vladimir Yuryevich ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The research work provides a comparative analysis of relational databases (MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server, Oracle) and LMS systems (Moodle, Blackboard, Canvas, Open edX) for a technical university. The analysis includes performance, reliability, scalability, and administration. PostgreSQL is suitable for complex transactions and queries, while MySQL is suitable for intensive read operations. Moodle and Open edX are often used in education for their flexibility and openness. The work is aimed at choosing the optimal combination of DBMS and LMS for effective management of the educational process and research activities of the university.

Keywords: relational databases, databases, PostgreSQL, LMS, Moodle, DBMS selection, technical university

УДК 004.93

Исследование свойств самовоспроизводящихся клеточных автоматов

Жудова Анна Алексеевна zhudovaanna24@gmail.com
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены принципы построения и функционирования самовоспроизводящегося клеточного автомата фон Неймана. Представлена реализация программного симулятора на языке Python, моделирующего динамику системы и визуализирующего процессы самоорганизации. Сделаны выводы, что разработанная модель демонстрирует возможность возникновения сложного глобального поведения из простых локальных правил.

Ключевые слова: клеточные автоматы, автомат фон Неймана, самовоспроизведение, вычислительная универсальность, моделирование

Клеточные автоматы (КА) представляют собой класс дискретных динамических систем, состоящих из регулярной сетки ячеек, каждая из которых может находиться в одном из конечного множества состояний [1]. Благодаря своей простоте и одновременно высокой вычислительной мощности, клеточные автоматы нашли широкое применение в моделировании сложных систем в физике, биологии и социальных науках [2]. Особенностью КА является их способность демонстрировать сложное глобальное поведение, возникающее из простых локальных взаимодействий, что делает их мощным инструментом для изучения процессов самоорганизации в природных системах [3].

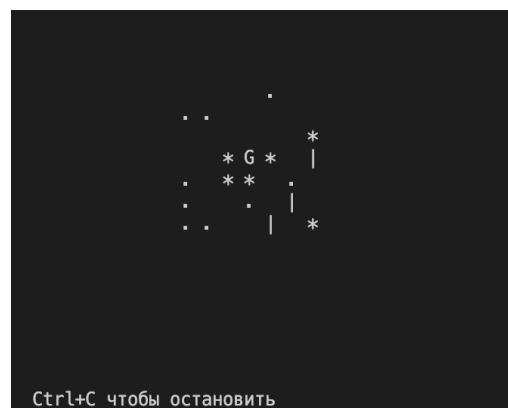
Одним из фундаментальных результатов в теории клеточных автоматов стала разработка Джоном фон Нейманом концепции самовоспроизводящегося автомата. Его теоретическая конструкция продемонстрировала принципиальную возможность создания искусственных систем, способных к самовоспроизведению без внешнего управления.

Автомат фон Неймана применяется в биологии (моделирование тканей и морфогенеза), квантовых вычислениях (самовосстанавливаясь память), нанотехнологиях (молекулярные асSEMBлеры), кибернетике (отказоустойчивые системы) и экологии (модели экосистем и лесных пожаров) [4].

Целью данной работы является разработка программы-симулятора на языке программирования Python, позволяющей моделировать поведение клеточного автомата фон Неймана и визуализировать процессы его самовоспроизведения.

Автомат фон Неймана в данной реализации (см. рисунок) представляет собой упрощенную консольную модель, демонстрирующую ключевые принципы самовоспроизводящихся систем. Программа использует квадратное поле размером 20×20 клеток с пятью возможными состояниями: пустое про-

странство (0), проводник (1), генератор (2), активное состояние (3) и хвост (4). Инициализация начинается с размещения генератора в центре поля, вокруг которого случайным образом с плотностью 40 % распределяются проводники. На каждом шаге итерации, происходящем каждые 0,5 секунды, применяются строгие правила перехода между состояниями: генератор с вероятностью 50 % активирует соседние проводники, активные клетки превращаются в хвосты, которые затем возвращаются в состояние проводника, а проводники активируются при наличии 1–2 активных соседей. Визуализация осуществляется через консоль с использованием простых символов: пробел для пустого пространства, точка для проводника, 'G' для генератора, '*' для активного состояния и '!' для хвоста. В первые 10–20 итераций наблюдается радиальное распространение сигналов от центрального генератора с формированием простых цепочек активированных проводников. К 30–50 итерациям появляются устойчивые пути передачи сигналов и начинают образовываться циклические структуры. После 50 итераций система демонстрирует стабильные конфигурации проводников с синхронизацией сигналов в отдельных участках поля. Особенностью данной реализации является использование фон-неймановской окрестности (учет только 4 соседних клеток), что отличает ее от более распространенных моделей с окрестностью Мура (8 соседей). Программа написана исключительно на стандартных модулях Python (random, time, os) без внешних зависимостей, что делает ее легко переносимой и запускаемой в любой среде. Для управления используется бесконечный цикл с возможностью прерывания по Ctrl+C, при этом на каждом шаге сначала очищается консоль, затем выводится текущее состояние поля и номер итерации. Эта упрощенная модель, хотя и не реализует полноценный автомат фон Неймана с 29 состояниями, наглядно демонстрирует, как из простых локальных правил могут возникать сложные паттерны и устойчивые структуры, что является ключевой идеей оригинальной концепции самовоспроизводящихся автоматов.



Демонстрация работы программы

Таким образом, разработанная авторами программа наглядно продемонстрировала удивительную способность сложных структур возникать из простых локальных взаимодействий. В дальнейшем планируется использовать алгоритм для создания дизайн-систем и динамических визуальных эффектов в веб-проектах. Также рассматривается его применение для разработки адаптивных интерфейсов, где элементы будут автономно изменяться в зависимости от контекста взаимодействия.

Литература

- [1] Яблонский С.В. *Введение в дискретную математику*. Москва, Высшая школа, 2001, 384 с.
- [2] Варшавский В.И., Мараховский В.Б. *Однородные структуры*. Москва, Наука, 1978, 248 с.
- [3] Shvedovskiy V.A. Cellular automaton with percolation as a dynamic system: entropy approach. *Computational Mathematics and Information Technologies*, 2021, vol. 1, no. 2, pp. 61–71.
- [4] Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. *Современные проблемы нелинейной динамики*. Москва, УРСС, 2002, 360 с.

Investigation of the properties of self-replicating cellular automata

Zhudova Anna Alekseevna

zhudovaanna24@gmail.com

Ilyichev Vladimir Yuryevich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The authors consider the principles of construction and functioning of a self-reproducing von Neumann cellular automaton. The paper presents the implementation of a software simulator in Python, which simulates the dynamics of the system and visualizes the processes of self-organization. It is concluded that the developed model demonstrates the possibility of complex global behavior arising from simple local rules.

Keywords: cellular automata, von Neumann automaton, self-replication, computational versatility, modeling

УДК 615.841

Выбор программно-аппаратных методов для оценки эмоционального состояния человека по вариабельности сердечного ритма

Зубкова Алена Владимировна adochka1308@yandex.ru

Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены современные методы для оценки эмоционального состояния человека по вариабельности сердечного ритма (ВСР) и представлен их анализ и сравнительная оценка. Основываясь на исследовании, можно сделать вывод об эффективности методов анализа эмоционального состояния и правдоподобности полученных данных каждого из методов.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма (ВСР), датчик пульса, датчик кожно-гальванической реакции КГР, электрокардиограмма (ЭКГ), преобразование Фурье (FFT), сверточная архитектура нейросетей (CNN), рекуррентная архитектура нейросетей (RNN)

Современный ритм жизни с высокими нагрузками и стрессом ухудшает физическое и психическое здоровье. Неспособность распознавать свое эмоциональное состояние может привести к хроническим заболеваниям и психосоматическим расстройствам. Исследования показывают, что ключевую роль в ранней диагностике таких состояний играет анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР) — доступного показателя, отражающего работу автономной нервной системы. ВСР помогает не только оценить эмоциональное состояние, но и выявить риски сердечнососудистых нарушений и других патологий. Целью исследования является разработка и экспериментальное обоснование методов анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР) для оценки эмоционального состояния человека. Практическая значимость исследования заключается в возможности создания носимых систем мониторинга эмоционального состояния, которые могут использоваться для профилактики хронического стресса и психосоматических заболеваний, особенно в профессиях с высокой эмоциональной нагрузкой.

Существует достаточно большое разнообразие методов для оценки эмоционального состояния, но в исследовании возьмем некоторые из них, а именно частотный анализ сигналов ЭКГ, анализ с использованием датчиков выявления изменения системы ощущений человека и анализ с использованием нейротехнологий. Нередко эти методы используются в различных сочетаниях с целью повышения качества распознавания эмоциональных состояний.

Простейшим способом определения эмоционального состояния человека является анализ частоты сердечных сокращений (ЧСС) за определенное время. Это объясняется тем, что при стрессе или раздражении ЧСС и уровень

каждой проводимости изменяются, что является реакцией автономной нервной системы (АНС). АНС состоит из симпатического и парасимпатического отделов, которые активируются в стрессовой ситуации и при расслаблении соответственно. Поэтому чтобы определить эмоциональное состояние человека, можно как минимум посмотреть на изменение его ЧСС.

В последнее время наиболее популярным способом контроля ЧСС является фитнес-браслеты, «умные часы» и другие носимые устройства, которые снабжены датчиками для выявления изменения системы ощущений человека. Датчики пульса могут быть основаны как на электрокардиографии (ЭКГ), так и на фотоплетизмографии (ФПГ). Примерами используемых датчиков являются фотоплетизмографы Pulse Sensor, Empatica E4, MAX30102, а также датчики от Polar. Авторами были проведены исследования, связанные с изменением системы ощущений человека при испуге [1]. На рис. 1 можно увидеть график реакции испытуемого на испуг, зафиксированный датчиком GSR, где можно заметить наличие участка с хаотичным изображением. Такое изменение является характерным для проявления раздражения или стресса и данный паттерн, регистрируемый датчиком, может быть просто обнаружен в режиме реального времени.

На рис. 2 зафиксирована реакция фотоплетизмографа на воздействие громким и резким шумом [2]. Здесь можно заметить очень сильное временное усиление амплитуды пульса, что можно объяснить неприятным для испытуемого воздействием. После прекращения шумового воздействия, что и ожидаемо, пульс испытуемого быстро приходит в норму.

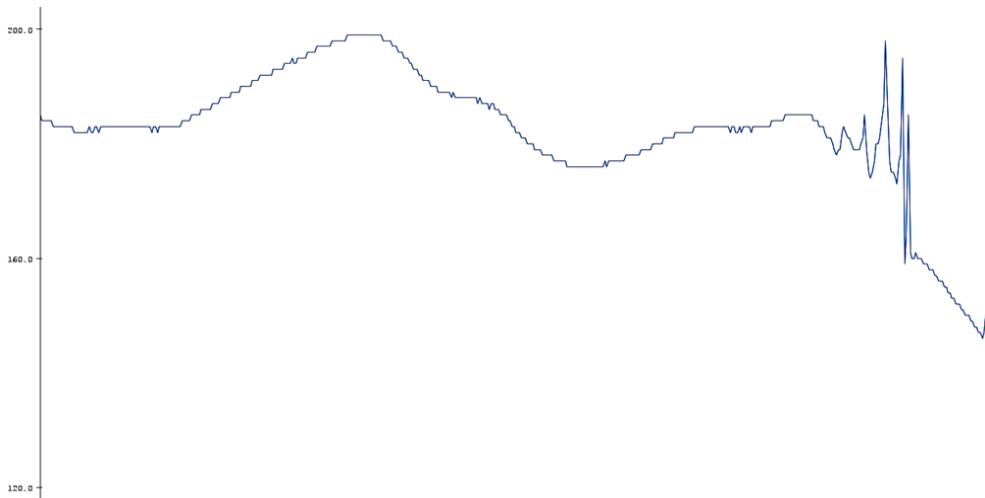


Рис. 1. График реакции испытуемого на испуг, зафиксированный датчиком GSR

Рассмотрим частотный анализ сигналов ЭКГ. Отметим, что ЭКГ сигнал являются отражением активности автономной нервной системы. С помощью

анализа ЭКГ можно отловить нарушения кровотока или органических заболеваний сердца. Сам анализ проводится с помощью языка программирования Python и библиотек Scipy.io.wavfile [3] для преобразования загружаемых из базы данных wav файлов в массивы данных, Numpy для обработки массивов числовых данных [4], Matplotlib.pyplot для вывода на экран результатов обработки прочитанного файла спектрограммы сигнала, а также его осциллограммы с результатами анализа. Частотный анализ проводится на основе созданных массивов данных для спектрограммы из данных осциллограммы методом преобразования Фурье, который позволяет декомпозировать сигнал на частотные компоненты. Данный метод относится к алгоритмам с низкой вычислительной сложностью ($O(n \log n)$), поэтому благодаря ему можно обрабатывать данные в реальном времени, а также прост в визуализации, поскольку наглядно отображает распределение по частотным диапазонам.



Рис. 2. График реакции испытуемого на действие громкого и резкого шума, зафиксированного фотоплетизмографом

В качестве демонстрационного примера, авторами было проведено исследование. Для примера был выбран звук биения сердца из сети Интернет в формате mp3, который далее был преобразован в формат wav и отфильтрован от высокочастотных сигналов (помех). Полученная осциллограмма является графиком зависимости амплитуды сигнала ЭКГ от времени в секундах. С помощью команд из библиотеки Matplotlib.pyplot была получена спектрограмма ЭКГ (рис. 3, 4). Относительно полученного результата можно сделать вывод, что низкие частоты спектрограммы связаны с симпатической актив-

ностью (стресс, раздражение), а высокие частоты — результат работы парасимпатической системы (расслабление).

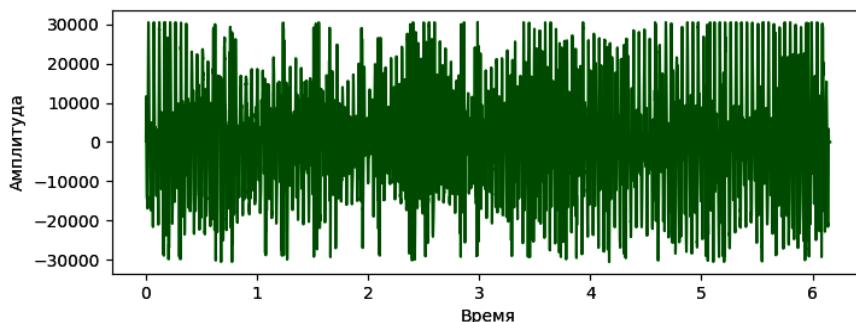


Рис. 3. Осциллограмма обрабатываемого сигнала ЭКГ

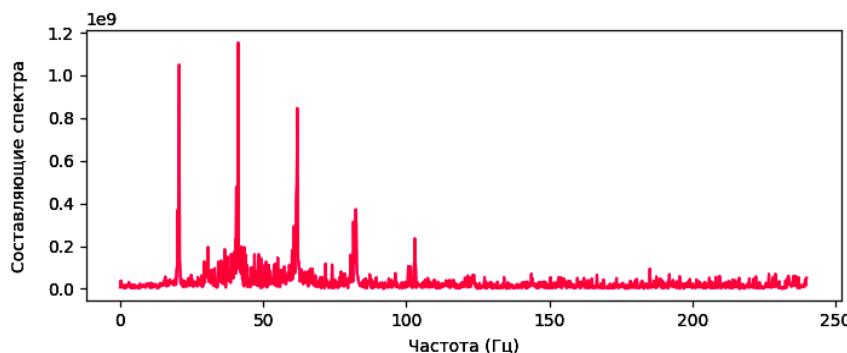


Рис. 4. Результат работы программы — спектрограмма сигнала ЭКГ

Следующий метод анализа связан с нейросетевыми технологиями, которые в последнее время активно развиваются и имеют огромную перспективу в будущем. Среди большого количества уже существующих архитектур, есть те, которые подходят для анализа ВСР или спектрограмм (осциллограмм), а именно: сверточные (CNN) и рекуррентные (RNN) нейросети. Сверточные нейросети эффективны для обработки данных с пространственной структурой (изображения, спектрограммы), хорошо извлекают пространственные признаки и ориентируются на паттерны в изображениях, но малоэффективны для обработки временных рядов, где важны долгосрочные зависимости. Также, чтобы начать обрабатывать спектрограммы, необходимо преобразовать снятую ЭКГ в изображение. Рекуррентные нейросети больше специализированы для обработки последовательности (например, временных рядов, ВСР), учитывают временные зависимости и долгосрочные паттерны, но из-за большей обработки данных работают медленнее. В некоторых задачах можно

комбинировать архитектуры CNN и RNN для достижения максимальной точности. Например, CNN для извлечения признаков из спектrogramм и LSTM (RNN) для анализа временных зависимостей.

Сейчас особенно актуальна проблема эмоционального состояния: по данным ВОЗ, каждый третий человек страдает от хронического стресса, что может привести к серьезным заболеваниям. Для его контроля необходимы системы мониторинга эмоций в реальном времени, особенно в критических профессиях — у пилотов, врачей, водителей и операторов опасных производств. В таких системах применяются все перечисленные и многие другие методы оценки эмоций, но ключевую роль играют нейросетевые технологии. Они ускоряют обработку данных с носимых датчиков, анализируют спектrogramмы и временные ряды, предоставляя готовые результаты. Эти решения уже разрабатываются и совершенствуются.

Исследования подтвердили, что анализ ВСР и ЧСС эффективен для оценки эмоционального состояния и выявления стресса. Эксперименты с датчиками GSR и фотоплетизмографами показали четкую связь между внешними раздражителями (испуг, шум) и физиологическими изменениями (колебания кожно-гальванической реакции, скачки пульса). Частотный анализ ЭКГ с методами Фурье и нейросетями (CNN, RNN) выявил маркеры стресса и расслабления, что открывает перспективы для систем мониторинга в реальном времени. Такие решения, встроенные в носимые устройства, смогут оперативно диагностировать стресс, предотвращая его хронические формы. Дальнейшее развитие нейросетей и комбинация методов ВСР, ЭКГ и мультисенсорных данных повысят точность мониторинга, улучшая качество жизни и профилактику психосоматических заболеваний [5, 6].

Литература

- [1] Ильичев В.Ю. *Выявление ощущений с помощью использования датчиков пульса и кожно-гальванической реакции*. URL: <https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2022/12/Ильичев-В.-Ю.-Каширин-Д.-С.pdf> (дата обращения 15.03.2025).
- [2] Кузьмин А.Г. О возможной природе тонов Короткова. *Роль и место биомедицинской техники в современной медицине. Междунар. науч.-практ. конф.: сб. тр.* Вологда, ВоГУ, 2018, с. 110–114.
- [3] Ильичев В.Ю. Использование библиотеки ZenCAD языка Python для разработки универсальной методики создания объемных изделий. *Системный администратор*, 2021, № 6 (223), с. 82–85.
- [4] Цандер Ф.А. *Проблема полета при помощи реактивных аппаратов*. Москва, Оборонгиз, 1961, 455 с.
- [5] Illichev V.Yu. Development of procedure for determination of characteristics of heated polycarbonate greenhouses. *International Research Journal*, 2021, no. 2–1 (104), pp. 132–135.
- [6] Гудилин В.Е., Слабкий Л.И. *Ракетно-космические системы. История. Развитие. Перспективы*. Москва, ЦАГИ, 1996, 326 с.

The choice of software and hardware methods for assessing a person's emotional state based on heart rate variability

Zubkova Alena Vladimirovna

alochka1308@yandex.ru

Ilyichev Vladimir Yuryevich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Modern methods for assessing human emotional states based on heart rate variability (HRV) are reviewed, along with their analysis and comparative evaluation. Based on the research, conclusions can be drawn regarding the effectiveness of emotional state analysis methods and the plausibility of the data obtained for each approach.

Keywords: heart rate variability (HRV), pulse sensor, galvanic skin response (GSR) sensor, electrocardiogram (ECG), Fourier transform (FFT), convolutional neural network (CNN), recurrent neural network (RNN)

УДК 004

Выбор метода сглаживания регрессионной зависимости для анализа курсов криптовалют: сравнение GARCH, LSTM и ARIMA

Ильичев Владимир Юрьевич

patrol8@yandex.ru

Федоров Виктор Олегович

fedorov_vo@bmstu.ru

Ландаева Дарья Николаевна

landaeva2004@mail.ru

Гулимова Вера Николаевна

gulimovavera0@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы сглаживания регрессионной зависимости курсов криптовалют на основе GARCH, LSTM и ARIMA. Представлены их основные характеристики, преимущества и ограничения. Показано, что модели GARCH эффективно прогнозируют волатильность в краткосрочном периоде, LSTM учитывает сложные нелинейные зависимости и подходит для долгосрочных прогнозов, а ARIMA используется для анализа стационарных компонентов временных рядов. Сделаны выводы, что выбор метода зависит от горизонта прогнозирования и рыночных условий. Результаты могут применяться для анализа рисков, алгоритмической торговли и предсказания трендов криптовалютных курсов.

Ключевые слова: криптовалюты, волатильность, прогнозирование, временные ряды

Криптовалютные рынки характеризуются высокой волатильностью, что затрудняет анализ и прогнозирование их динамики. Волатильность отражает степень изменчивости цены во времени и является ключевым фактором при оценке рисков. Однако ее невозможно снизить методами прогнозирования, поскольку она определяется рыночными процессами и крупными финансово-выми операциями. Вместо этого можно сгладить высокочастотные колебания курса для лучшего анализа его трендов.

Для этого применяются различные методы, включая эконометрические модели (GARCH), статистические подходы (ARIMA) и нейросетевые модели (LSTM). Как показано в исследовании [1], нейросетевые модели, такие как LSTM, способны выявлять сложные паттерны в данных, что делает их перспективными для анализа криптовалютных рынков. В то же время, согласно результатам работы [2], модели GARCH и ARIMA хорошо подходят для анализа волатильности криптовалют и позволяют учитывать автокорреляционные зависимости.

Цель данной работы — провести сравнительный анализ методов GARCH, LSTM и ARIMA для сглаживания регрессионной зависимости курсов криптовалют и выявления их трендов. Для этого будет оценена точность, устойчивость и применимость этих методов в условиях высокой неопределенности криптовалютного рынка. Кроме того, рассматривается возможность комбинированного использования моделей для достижения наилучших результатов [1, 2].

Для анализа и прогнозирования волатильности криптовалютных рынков применяются различные методы, каждый из которых обладает уникальными преимуществами и ограничениями. В данном разделе рассмотрим особенности, сильные и слабые стороны криптовалютной волатильности трех подходов.

GARCH. Модели Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH) являются стандартом для анализа волатильности на финансовых рынках. Эти модели основываются на анализе данных временных рядов и предполагают, что изменчивость данных (волатильность) зависит от предыдущих значений и ошибок прогноза. Как указывают исследования, использование GARCH для прогнозирования волатильности криптовалют позволяет точно определять периодические изменения и пик волатильности на рынке [3]. В частности, на криптовалютных рынках эти модели применяются для анализа частных изменений на графиках цен, а также для улучшения алгоритмов автоматической торговли.

Одним из недостатков моделей GARCH является их ограниченность в работе с большими объемами данных. Это может приводить к снижению точности прогноза, особенно при наличии сложных рыночных тенденций, которые трудно учесть в рамках классической модели. Это ограничение приводит к необходимости использования более мощных инструментов машинного обучения, таких как LSTM.

LSTM. Long Short-Term Memory (LSTM) — это тип рекуррентной нейронной сети, которая используется для анализа временных рядов. В отличие от GARCH, LSTM способен учитывать более сложные зависимости в данных, что делает его эффективным инструментом для предсказания волатильности в условиях криптовалютных рынков. Этот метод особенно хорош для долгосрочных прогнозов, когда важен учет множества факторов, включая сезонность, тренды и другие скрытые связи между переменными [4].

Недавние исследования показывают, что использование LSTM для прогнозирования волатильности криптовалют помогает точнее учитывать взаимосвязи между различными макроэкономическими факторами, такими как мировые новости и экономические события. Однако LSTM требует значительных вычислительных мощностей и больших объемов данных для обучения, что может быть ограничением для некоторых трейдеров или исследователей [5].

ARIMA. Модели авторегрессии с интегрированным движением среднего (ARIMA) используются для прогнозирования временных рядов. Они также могут быть применены для прогнозирования волатильности, однако в отличие от GARCH, они требуют, чтобы данные были стационарными. Преимуществом ARIMA является его низкая вычислительная сложность и способность быстро реагировать на изменения в данных. Однако для криптовалютных рынков, которые подвержены частым и непредсказуемым изменениям, ARIMA может не всегда давать точные прогнозы, особенно в периоды высокой волатильности [6].

Модели ARIMA остаются полезным инструментом для анализа криптовалютных временных рядов, особенно в контексте краткосрочного прогнози-

рования. Как отмечается в исследовании [6], ARIMA может эффективно моделировать локальные тенденции и помогать в сглаживании данных, что делает ее полезной для выявления краткосрочных паттернов волатильности. Однако ее требование стационарности данных и неспособность учитывать резкие рыночные изменения ограничивают применение в условиях высокой неопределенности криптовалютных рынков.

Для того чтобы определить, какой метод наиболее эффективно справляется со сглаживанием регрессионной зависимости курсов криптовалют, проведем сравнительный анализ. Включим в таблицу ключевые особенности методов GARCH, LSTM и ARIMA, а также оценим их применимость для выявления трендов и сглаживания колебаний на криптовалютных рынках (см. таблицу).

Ключевые особенности методов

Характеристика	GARCH	LSTM	ARIMA
Основной метод	Моделирование изменчивости временных рядов	Рекуррентные нейронные сети	Моделирование стационарных временных рядов
Прогнозирование	Прогнозирование волатильности	Прогнозирование цен с учетом более сложных зависимостей	Прогнозирование на основе авторегрессионных моделей
Точность	Хорошая для краткосрочных прогнозов	Высокая для долгосрочных прогнозов	Подходит для краткосрочных прогнозов
Сложность вычислений	Средняя	Высокая, требует большого объема данных	Низкая, быстрая обработка данных
Применение на рынке криптовалют	Используется для анализа рисков и колебаний	Применяется для прогнозирования с учетом трендов	Часто используется для краткосрочного анализа

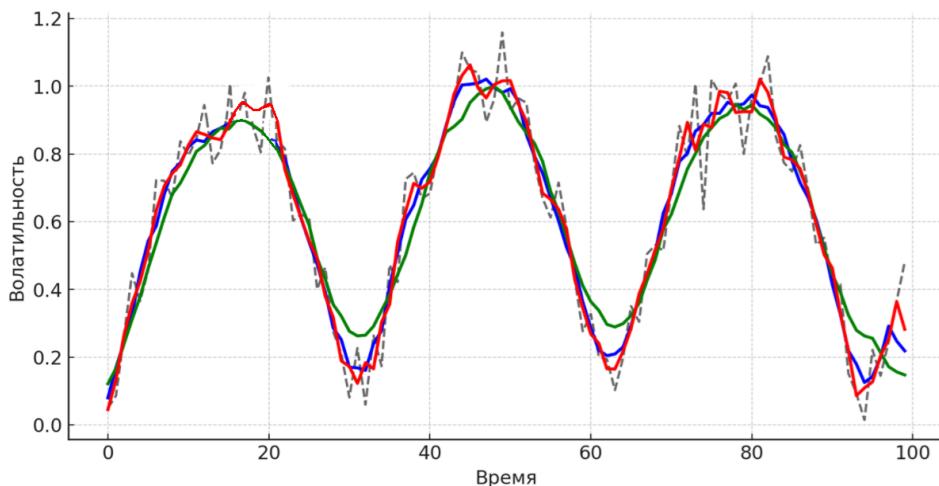
Для наглядной демонстрации влияния различных моделей представлены графики на рисунке, сравнивающие их работу. На нем видно, как каждая из моделей сглаживает ценовые колебания по-разному, что позволяет определить их эффективность в зависимости от поставленной задачи.

Анализируя графики, можно сделать несколько выводов:

– реальная волатильность (черная пунктирная линия) — имеет значительные колебания, отражая нестабильность рынка. Это типичная картина для криптовалют, где высокая волатильность является нормой;

– модель GARCH (синяя линия) хорошо улавливает кластеризацию волатильности, характерную для финансовых данных. Однако она может отставать от резких изменений, так как основана на исторических данных;

- модель LSTM (зеленая линия), будучи нейросетевой, лучше адаптируется к нелинейным зависимостям и может точнее предсказывать резкие скачки волатильности, особенно если обучена на достаточном объеме данных;
- модель ARIMA (красная линия) показывает наименее точные результаты, так как она не предназначена для прямого моделирования волатильности и хуже справляется с нестационарными данными, характерными для крипто-рынка.



Демонстрация влияния различных моделей на сглаживание ценовых колебаний

Проведенное исследование было направлено на выбор оптимального метода сглаживания регрессионной зависимости для анализа курсов криптовалют. Были рассмотрены три подхода — GARCH, LSTM и ARIMA, и установлено, что выбор метода зависит от горизонта прогнозирования и характера данных.

GARCH-модели хорошо улавливают кластеризацию волатильности и подходят для краткосрочного прогнозирования, однако их точность может снижаться при резких рыночных колебаниях. Нейросетевые методы, такие как LSTM, продемонстрировали наилучшие результаты в моделировании сложных нелинейных зависимостей, особенно при долгосрочном прогнозировании. В то же время ARIMA показала ограниченную применимость для высоковолатильных криптовалютных рядов, но остается полезным инструментом для анализа стационарных компонент временных рядов.

Таким образом, для краткосрочного анализа предпочтительны GARCH-модели, для долгосрочного прогнозирования — LSTM, а ARIMA может использоваться в качестве вспомогательного инструмента.

Проведенный анализ позволил определить наиболее подходящие методы сглаживания регрессионной зависимости, что способствует повышению точ-

ности прогнозирования курсов криптовалют и открывает возможности для дальнейшего совершенствования моделей.

Литература

- [1] Мельничук Д.А., Коцалап С.А. Волатильность криптовалют: прогнозирование с помощью нейронных сетей и традиционных моделей. *Экономический вестник ДонГТУ*, 2023, № 17, с. 68–74.
- [2] Phung Duy Q., Nguyen Thi O., Le Thi Ph.H., Pham Hoang H.D., Luong Kh.L., Nguyen Thi K.N. Estimating and forecasting bitcoin daily prices using ARIMA-GARCH models. *Business Analyst Journal*, 2024, vol. 45 (S1). <https://doi.org/10.1108/BAJ-05-2024-0027>
- [3] Queiroz R.G.S., David S.A. Performance of the realized-GARCH model against other GARCH types in predicting cryptocurrency volatility. *Risks*, 2023, vol. 11(12), no. 12, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/risks11120211>
- [4] Ястребов А.А., Асенчик О.Д. Метод обучения рекуррентной нейронной сети LSTM для краткосрочного прогнозирования поведения цен на криптовалютной бирже. *Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях. Матер. XXVII Республ. науч. конф. студентов и аспирантов*. Гомель, 2024, с. 282–283.
- [5] Ильичев В.Ю., Кондратьева С.Д. Использование библиотеки машинного обучения mlxtend для анализа статистики продаж. *Системный администратор*, 2024, № 1-2 (254-255), с. 136–140.
- [6] Amjad A. Alsuwaylimi Comparison of ARIMA, ANN and Hybrid ARIMA-ANN models for time series forecasting. *Information Sciences Letters*, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 1003–1016.

Selecting a regression smoothing method for cryptocurrency price analysis: a comparison of GARCH, LSTM, and ARIMA

Ilyichev Vladimir Yuryevich

patrol8@yandex.ru

Feodorov Viktor Olegovich

fedorov_vo@bmstu.ru

Landaeva Darya Nikolaevna

landaeva2004@mail.ru

Gulimova Vera Nikolaevna

gulimovavera0@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The study examines smoothing methods for cryptocurrency exchange rate regression using GARCH, LSTM, and ARIMA. Their main characteristics, advantages, and limitations are presented. It is shown that GARCH models effectively predict short-term volatility, LSTM captures complex nonlinear dependencies for long-term forecasting, and ARIMA is useful for analyzing stationary time series components. Conclusions indicate that method selection depends on forecasting horizon and market conditions. The results can be applied to risk analysis, algorithmic trading, and cryptocurrency trend prediction.

Keywords: cryptocurrencies, volatility, forecasting, time series

УДК 004.421.2

Бинарная классификация изображений: оценка эффективности алгоритмов Random Forest, Gradient Boosting и XGBoost

Широкова Екатерина Васильевна

kate-info@inbox.ru

Джанаев Карим Сергеевич

karim-2018@yandex.ru

Тихонов Никита Александрович

nikitatihonov432@mail.ru

Павлов Игорь Владимирович

pavl.19or@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для задач бинарной классификации изображений. Для оценки качества моделей используются метрики *Accuracy*, *ROC-AUC* и *F1-score*, а для выбора оптимального алгоритма применяются критерии Лапласа, Вальда, Гурвица и Сэвиджа. Рассмотрены три метода — *Random Forest*, *Gradient Boosting* и *XGBoost*. Проведены эксперименты на трех наборах данных: *MNIST*, *Fashion MNIST* и *Dogs vs Cats*. Полученные результаты демонстрируют адаптацию методов к различным данным, позволяя выявить их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: бинарная классификация, машинное обучение, *Random Forest*, *Gradient Boosting*, *XGBoost*

Введение. Бинарная классификация изображений востребована в задачах обнаружения объектов, анализа медицинских снимков и распознавания аномалий [1]. Несмотря на успехи глубоких нейронных сетей, их применение требует значительных вычислительных ресурсов [2], что стимулирует разработку методов с оптимальным соотношением точности и затрат. В этом контексте ансамблевые методы, такие как *Random Forest*, *Gradient Boosting* и *XGBoost*, остаются популярными благодаря эффективности и гибкости [3].

Цель работы — сравнительный анализ алгоритмов для бинарной классификации изображений. Выбор пал на *Random Forest*, *Gradient Boosting* и *XGBoost*, отличающиеся подходами к объединению слабых моделей для повышения точности. *Random Forest* объединяет результаты независимо обученных решающих деревьев [4], *Gradient Boosting* последовательно корректирует ошибки предыдущих моделей [5], а *XGBoost* является оптимизированной версией градиентного бустинга с регуляризацией, повышающей устойчивость и ускоряющей вычисления [6].

Оценка эффективности моделей проводилась с использованием таких метрик, как *Accuracy*, рассчитываемая по формуле

$$\text{Accuracy} = (\text{TP} + \text{TN}) / (\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}), \quad (1)$$

гармоническое среднее *F1-score*, вычисляемое по формуле

$$\text{F1-score} = 2 \cdot (\text{Precision} \cdot \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall}), \quad (2)$$

и *ROC-AUC*, отражающей способность модели различать классы [7].

В эксперименте использовались наборы данных: MNIST [8], Fashion MNIST [9] и Dogs vs Cats [10]. Для извлечения признаков применялся метод HOG (Histogram of Oriented Gradients) [11], описывающий текстуру и форму объектов. Изображения MNIST и Fashion MNIST приводились к размеру 64×64 пикселей, а Dogs vs Cats — до 128×128 пикселей; первые два набора преобразовывались в векторы пикселей, а для Dogs vs Cats осуществлялось извлечение признаков с помощью HOG.

Пример HOG-фичи. Пример HOG-фичи можно получить с помощью библиотеки scikit-image. На изображении ниже показан пример.

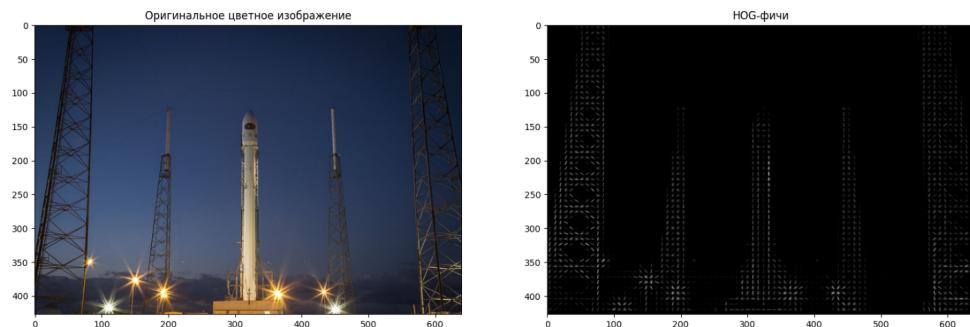


Рис. 1. Пример HOG-фичи

Результат моделирования. В экспериментальной части изображения из MNIST и Fashion MNIST сначала преобразовывались в одномерные векторы пикселей с последующей нормализацией, тогда как для Dogs vs Cats их масштабировали до 128×128 пикселей и извлекали признаки методом HOG, позволяющим выделить характерные особенности текстуры и формы.

Эффективность алгоритмов оценивалась по Accuracy, результаты были представлены в виде «матрицы выигрышей» — таблицы, где для каждого датасета фиксируются значения метрики. Например, для MNIST Random Forest и XGBoost показали точность 0,9995, a Gradient Boosting — 0,9986; для Fashion MNIST — 0,9870, 0,9890 и 0,9935 соответственно; для Dogs vs Cats — 0,7253, 0,7492 и 0,7457.

Для оценки риска выбора не оптимального метода также была построена «матрица сожалений» — разница между наилучшим показателем для набора данных и результатами каждого алгоритма. Анализ с использованием критериев Лапласа (среднее значение), Вальда (худший сценарий), Гурвица (сочетание максимума и минимума, $\alpha = 0,6$) и Сэвиджа (наибольшее сожаление) показал, что по Лапласу, Гурвица и Сэвиджа лидировал XGBoost, а по Вальду — Gradient Boosting.

Таким образом, построение матриц выигрышей и сожалений позволяет комплексно оценить эффективность алгоритмов и обоснованно выбрать оптимальный метод для бинарной классификации изображений.

Для каждого алгоритма и датасета рассчитаны показатели Accuracy, представленные в матрице выигрышей (см. таблицу).

Матрица выигрышей

Алгоритм	MNIST	Fashion MNIST	Dogs vs Cats
Random Forest	0,9995	0,9870	0,7253
Gradient Boosting	0,9986	0,9890	0,7492
XGBoost	0,9995	0,9935	0,7457

Анализ эффективности моделей машинного обучения. При оценке качества работы алгоритмов для бинарной классификации изображений применялись различные критерии, позволяющие рассмотреть модель с разных сторон. Например, одним из основных показателей служит критерий Лапласа, который определяется как среднее арифметическое значений точности, полученных для каждого алгоритма на разных наборах данных. Такой подход позволяет получить общее представление о средней эффективности модели, не фокусируясь на отдельных экстремальных результатах [1].

С другой стороны, критерий Вальда ориентирован на минимальное значение точности, зафиксированное в матрице выигрышей. Этот показатель отражает худший сценарий работы алгоритма и демонстрирует, насколько устойчива модель в условиях, когда ее эффективность снижается до минимально возможного уровня [2].

Для более комплексной оценки применяется критерий Гурвица, который учитывает как наилучшие, так и наихудшие результаты. Расчет производится по формуле:

$$G = \alpha \times \max + (1 - \alpha) \times \min,$$

где G — значение критерия Гурвица; α (весовой коэффициент) обычно принимается равным 0,6; \max — максимальное значение точности; \min — минимальное значение в строке матрицы выигрышей для конкретного алгоритма. Такой метод позволяет получить взвешенное значение, отражающее баланс между оптимальными результатами и крайними негативными показателями [3].

Кроме того, для оценки риска выбора менее эффективного алгоритма анализируется матрица сожалений. В ней рассчитывается разница между наилучшим результатом, достигнутым среди всех методов, и значениями, полученными каждым из алгоритмов. Минимальное значение этого показателя свидетельствует о наименьшем риске отклонения от оптимального результата, что позволяет сделать более обоснованный выбор наиболее стабильной модели [4].

Применив описанные критерии, анализ показал, что алгоритм XGBoost демонстрирует наилучшие средние показатели и лидирует по критериям Гурвица и Сэвиджа, что свидетельствует о его стабильной работе и оптимизированной структуре вычислений. В то же время, алгоритм Gradient Boosting

показал высокую устойчивость в условиях наихудшего сценария, отражаемого критерием Вальда. Эти результаты указывают на то, что выбор оптимального алгоритма должен основываться не только на средней точности, но и на способности модели сохранять высокую эффективность в экстремальных условиях [1–4].

Заключение. Эксперименты показали, что XGBoost превосходит остальные алгоритмы за счет регуляризации и оптимизированных вычислений, что обеспечивает высокую точность и адаптивность к разным данным. Gradient Boosting оказался наиболее устойчивым в сложных условиях, сохраняя точность даже при наличии выбросов, что подтверждает его лидерство по критерию Вальда. Random Forest показал хорошие результаты на однородных данных (например, MNIST), но уступает при классификации более сложных изображений (Dogs vs Cats). Для дальнейшего улучшения моделей рекомендуется применять продвинутые методы предобработки, извлечение дополнительных признаков, использовать глубокие сверточные нейронные сети (CNN) и экспериментировать с настройкой гиперпараметров.

Литература

- [1] Васильев В.А., Михалевский И.В. *Искусственные нейронные сети: основы теории и архитектуры*. Санкт-Петербург, Питер, 2021, 342 с.
- [2] Буздалов М. *Дискретная математика для программистов: основы комбинаторики и теории графов*. Москва, ДМК Пресс, 2020, 350 с.
- [3] Журавлев Ю.И., Петров Ю.В. *Введение в машинное обучение и нейронные сети*. Москва, МФТИ, 2020.
- [4] Касьянов В.Н. *Программирование на Python для анализа данных и машинного обучения*. Москва, Лаборатория знаний, 2020, 288 с.
- [5] Добронравов М.П. *Современные методы оптимизации для нейронных сетей*. Санкт-Петербург, Лань, 2019, 352 с.
- [6] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
- [7] Chollet F. *Deep Learning with Python*. Manning Publications, 2018.
- [8] Nielsen M. *Neural Networks and Deep Learning*. Determination Press, 2015.
- [9] Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson, 2021.
- [10] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, 2017.
- [11] Широкова Е.В. Сравнение метрик бинарной классификации для оценки эффективности алгоритмов машинного обучения. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Естественные и технические науки*, 2025, № 2, с. 164–169. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2025.02.40>

Image binary classification: efficiency evaluation of random forest, gradient boosting, and XGBoost algorithms

Shirokova Ekaterina Vasilievna kate-info@inbox.ru
Dzhanaev Karim Sergeevich karim-2018@yandex.ru
Tikhonov Nikita Alexandrovich nikitatihonov432@mail.ru
Pavlov Igor Vladimirovich pavl.19or@yandex.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This study presents a comparative analysis of machine learning algorithms for image binary classification tasks. The performance of the models is evaluated using metrics such as Accuracy, ROC–AUC, and F1-score, while optimal algorithm selection is guided by the criteria of Laplace, Wald, Hurwicz, and Savage. Three methods — Random Forest, Gradient Boosting, and XGBoost — are examined through experiments on three datasets: MNIST, Fashion MNIST, and Dogs vs Cats. The obtained results demonstrate the adaptability of the methods to various datasets, revealing their strengths and limitations.

Keywords: *binary classification, machine learning, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost*

УДК 004.652

Выбор систем управления базами данных для социальных сетей на основе анализа их особенностей

Васильченко Анна Юрьевна vasil4enko1512@gmail.com
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены реляционные (MySQL, MariaDB, Oracle 12c, PostgreSQL, MS SQL Server) и нереляционные (MongoDB, Cassandra, Redis, Neo4j) системы управления базами данных в контексте их применения в соцсетях. Представлен анализ по критериям производительности, масштабируемости, надежности, безопасности и поддержки типов данных. Показано, что PostgreSQL оптимальен для структурированных данных и сложных запросов, а MongoDB — для неструктурированного контента и масштабирования. Сделаны выводы, что для социальных сетей подходят PostgreSQL и MongoDB, а также гибридные решения, которые можно применять для сочетания преимуществ разных СУБД в одной системе.

Ключевые слова: реляционные СУБД, нереляционные СУБД, социальные сети, производительность, масштабируемость, надежность, безопасность, PostgreSQL, MongoDB, Cassandra, Redis, Neo4j

Введение. Современные социальные сети — сложные системы, ежедневно обрабатывающие огромные объемы данных: профили, посты, комментарии, медиа и связи. Эффективное управление требует выбора подходящей системы управления базами данных (СУБД), обеспечивающей производительность, надежность и масштабируемость [1]. Актуальность исследования связана с тем, что реляционные СУБД не всегда гибки для социальных сетей, а нереляционные (NoSQL) могут не гарантировать консистентность. Цель статьи — сравнить реляционные и нереляционные СУБД и определить оптимальные решения для социальных сетей, анализируя производительность, масштабируемость, транзакции, работу с неструктурированными данными и облачную интеграцию.

Теоретическая часть. СУБД — программное обеспечение для управления данными, обеспечивающее их целостность, доступ и обработку транзакций [2]. Они делятся на реляционные (RDBMS) и нереляционные (NoSQL) [3]. RDBMS используют таблицы с фиксированной схемой и ключами, обеспечивая строгую целостность, но масштабируются вертикально. NoSQL поддерживают гибкие модели (документы, ключ-значение, графы), горизонтальное масштабирование и подходят для неструктурированных данных, часто жертвуя консистентностью ради производительности [4].

Реляционные СУБД. MySQL — популярная СУБД для веб-приложений. Преимущества: высокая скорость чтения, открытый код, поддержка реплика-

ции [5]. Недостатки: слабая транзакционность, ограниченная аналитика. Подходит для хранения профилей и контента.

MariaDB — форк MySQL с улучшенной масштабируемостью и поддержкой JSON. Преимущества: совместимость с MySQL, новые движки хранения. Недостатки: менее развитая документация [6]. Используется для средних проектов с неструктурированными данными.

Oracle 12c — мощная коммерческая СУБД. Преимущества: высокая производительность, аналитика, безопасность, облачная поддержка. Недостатки: дороговизна, сложность управления [7]. Для крупных сетей с высокими требованиями.

PostgreSQL — гибкая СУБД с поддержкой JSON и транзакций ACID. Преимущества: масштабируемость, открытый код, работа с разными данными [8]. Недостатки: сложная настройка, ниже скорость записи. Идеальна для сложных запросов и аналитики.

MS SQL Server — коммерческая СУБД от Microsoft. Преимущества: интеграция с Azure, аналитика, безопасность [9]. Недостатки: высокая стоимость, ограниченная кросс-платформенность. Подходит для экосистемы Microsoft.

Результаты сравнительного анализа RDBMS СУБД приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа RDBMS СУБД

Критерий	MySQL	MariaDB	Oracle 12c	PostgreSQL	MS SQL Server
Лицензия	Открытая	Открытая	Коммерческая	Открытая	Коммерческая
Производительность	Высокая (чтение)	Высокая	Очень высокая	Очень высокая	Очень высокая
Масштабируемость	Репликация	Репликация	Отличная	Репликация	Хорошая
Транзакции	Ограниченные	Хорошие	Отличные	Отличные	Отличные
Неструктурированные данные	Ограниченно	JSON	JSON	Отличная	Ограниченно
Облако	Хорошее	Хорошее	Отличное	Хорошее	Отличное

MongoDB — документоориентированная СУБД. Преимущества: гибкость, высокая производительность, масштабируемость. Недостатки: слабые транзакции, высокие требования к памяти [10]. Для динамичных данных.

Cassandra — колоночная СУБД. Преимущества: доступность, быстрая запись, масштабируемость [1]. Недостатки: сложные запросы. Для больших объемов данных.

Redis — хранилище в памяти. Преимущества: высокая скорость, поддержка структур [4]. Недостатки: ограниченный объем данных. Для кеширования.

Neo4j — графовая СУБД. Преимущества: быстрый поиск связей. Недостатки: узкая специализация. Для социальных графов [10].

Результаты сравнительного анализа NoSQL СУБД приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа NoSQL

Критерий	MongoDB	Cassandra	Redis	Neo4j
Тип данных	Документы	Столбцы	Ключ-значение	Графы
Масштабируемость	Горизонтальная	Горизонтальная	Вертикальная	Ограничена
Производительность	Высокая	Высокая (запись)	Очень высокая	Высокая (графы)
Транзакции	Ограниченные	Нет	Нет	Есть
Гибкость схемы	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая

Заключение. Выбор СУБД для социальных сетей зависит от задач: реляционные подходят для консистентности и сложных запросов, нереляционные — для гибкости и масштабируемости. PostgreSQL выделяется среди RDBMS благодаря производительности и поддержке JSON, а MongoDB — среди NoSQL за гибкость и скорость. Оптимально комбинировать PostgreSQL (хранилище, транзакции) с MongoDB (динамичные данные) или Redis (кеширование), в зависимости от приоритетов проекта.

Литература

- [1] Драч В.Е., Ильичев В.Ю. Анализ популярных реляционных систем управления базами данных. *Системный администратор*, 2021, № 12, с. 60–65.
- [2] Сопчак Р.Ю., Лобзенко П.В. Кроссплатформенное приложение на основе СУБД MySQL. *Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики*, 2014, № 1, с. 336–338.
- [3] Тимофеева Н.Е., Полулях К.А. Программный комплекс для управления распределенной базой данных. *Программные продукты и системы*, 2017, № 4, с. 663–667.
- [4] Драч В.Е., Родионов А.В., Чухраева А.И. Выбор системы управления базами данных для информационной системы промышленного предприятия. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2018, т. 23, № 3, с. 71–80.
- [5] Хромушкин Р.Р. Оптимизация работы MySQL (InnoDB и MyISAM). *Advanced science. X Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Пенза, МЦНС «Наука и просвещение», 2019, с. 54–56.

- [6] Каримбаев Т.Т., Мамбеталиева А.М. Использование типов хранилищ MySQL: MyISAM и InnoDB. *Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова*, 2012, № 2, с. 219–224.
- [7] Анисимова Э.С. Интеллектуальный инструмент dbForge Studio for MySQL в работе с базами данных. *Экономика и социум*, 2015, № 6–1, с. 770–773.
- [8] Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A., Strongin M.M. Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2019, vol. 105, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.04.002>
- [9] Khazov D.E., Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A. Energy separation in a channel with permeable wall. *Energy*, 2022, vol. 239, art. no. 122427. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122427>
- [10] Tucker P. *The NSA Is Studying Satellite Hacking. Defense One*. URL: www.defenseone.com/technology/2019/09/nsa-studying-satellite-hacking/160009 (accessed 10.12.2021).

Selection of database management systems for social networks based on an analysis of their features

Vasilchenko Anna Yuryevna

vasil4enko1512@gmail.com

Ilyichev Vladimir Yuryevich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Relational (MySQL, MariaDB, Oracle 12c, PostgreSQL, MS SQL Server) and non-relational (MongoDB, Cassandra, Redis, Neo4j) database management systems are considered in the context of their use in social networks. The analysis is based on the criteria of performance, scalability, reliability, security, and data type support. It has been shown that PostgreSQL is optimal for structured data and complex queries, while MongoDB is optimal for unstructured content and scaling. It is concluded that PostgreSQL and MongoDB are suitable for social networks, as well as hybrid solutions that can be used to combine the advantages of different databases in one system.

Keywords: relational databases, non-relational databases, social networks, performance, scalability, reliability, security, PostgreSQL, MongoDB, Cassandra, Redis, Neo4j

УДК 004.048

Использование языка Java для реализации алгоритмов преобразования изображений

Боловинов Константин Максимович

bolovinov.game@inbox.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilychev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящается использованию языка Java для реализации алгоритмов преобразования изображений. Сформулированы цель и задачи исследования, приведены краткие сведения об используемых алгоритмах. Для реализаций алгоритмов использован язык Java с использованием следующих библиотек: Color, Graphics, BufferedImage, swing, FileWriter, FileReader, ArrayList. Составлены листинги программ-примеров, реализующие 3 алгоритма: алгоритм изменения контрастности, шифрования и дешифрования. Было проведено тестирование написанных программ конкретном изображении. По результатам работы сделаны выводы и заключения.

Ключевые слова: язык Java, растровая графика, алгоритмы

На сегодняшний день большое количество людей пользуются изображениями, в том числе и их обработкой для конкретных целей. Двухмерная (2D — от англ. two dimensions — «два измерения») компьютерная графика классифицируется по типу представления графической информации, и следующими из него алгоритмами обработки изображений [1]. Обычно компьютерную графику разделяют на векторную и растровую, хотя обособляют еще и фрактальный тип представления изображений. Векторная графика представляет изображение как набор геометрических примитивов. Обычно в качестве них выбираются точки, прямые, окружности, прямоугольники, а также как общий случай, кривые некоторого порядка. Объектам присваиваются некоторые атрибуты, например, толщина линий, цвет заполнения.

Сейчас преимущественно используется растровая графика. Растровая графика всегда оперирует двумерным массивом (матрицей) пикселей. Каждому пикселю сопоставляется значение — яркости, цвета, прозрачности — или комбинация этих значений. Растровый образ имеет некоторое число строк и столбцов. Без особых потерь растровые изображения можно только лишь уменьшать, хотя некоторые детали изображения тогда исчезнут навсегда, что иначе в векторном представлении. Увеличение растровых изображений приводит к квадратизации в изображении отдельных пикселей того или иного цвета.

Целью данной работы является использование языка Java для реализации алгоритмов преобразования изображений.

При проведении исследований необходимо решить следующие задачи:

- изучение предметной области;
- изучение существующих алгоритмов преобразования изображений;

- реализация этих алгоритмов на Java;
- тестирование алгоритмов для разных изображений;
- произвести анализ полученных результатов и сделать выводы для будущих исследований по рассматриваемой тематике.

Существует несколько алгоритмов преобразования контрастности изображений. 1 из них — RGB-алгоритм изменения контраста [2]. Суть заключается в нахождении средней цветовой составляющей красного, зеленого и синего в изображении, а затем для каждого пикселя вычисляется новый цвет по формуле : $color=(col_pixel-col_d)*k+col_d$, где $color$ — новый цвет пикселя, col ; d — средняя цветовая составляющая изображения; k -множитель контраста(в процентном виде, деленое на 100) [3]. При $k = 1$, изображение не меняется; Col_pixel — текущий цвет пикселя.

Для реализации этого алгоритма на Java требуется несколько шагов:

- импорт библиотек для работы с изображениями (Color, Graphics, BufferedImage, swing);
- создание окна (JFrame), его настройка и добавление иконки (JLabel), его настройка и добавление метода для отрисовки изображений;
- определение метода отрисовки изображений;
- загрузка изображения;
- прохождение по всем пикселям изображения для нахождения среднего значения красного, синего и зеленого;
- повторное прохождение по всем пикселям изображения для изменения изображения с контрастностью (каждый пиксель меняется по формуле, указанной выше);
- отрисовка полученного изображения;
- вызов метода отрисовки.

В данном примере создается отдельное окно, на котором уже отображается изображение с нужной нам контрастностью (рис. 1).

Далее речь пойдет о шифровании изображений. Иногда требуется передать данные так, чтобы они не были доступны третьим лицам. Это могут быть личные фотографии или коммерческие. Один из методов шифрования основан на перестановки элементов (пикселей) в хаотическом порядке, с сохранением исходных позиций в отдельном файле (например, текстовом). Для расшифровки изображения требуется само зашифрованное изображение и файл-ключ. Без файла, в котором указаны исходные расположения пикселей, получить исходное изображение не получится.

Для реализации алгоритма шифрования на Java требуется несколько шагов.

1. Импорт библиотек для работы с изображениями и файлами (FileWriter, ArrayList, BufferedImage).
2. Загрузка изображения и создание файл-ключа, а также инициализация нового изображения для шифрования.
3. Создание списка для генерации последовательности чисел (в пределах размера изображения). Число ставится в соответствии с индексом.

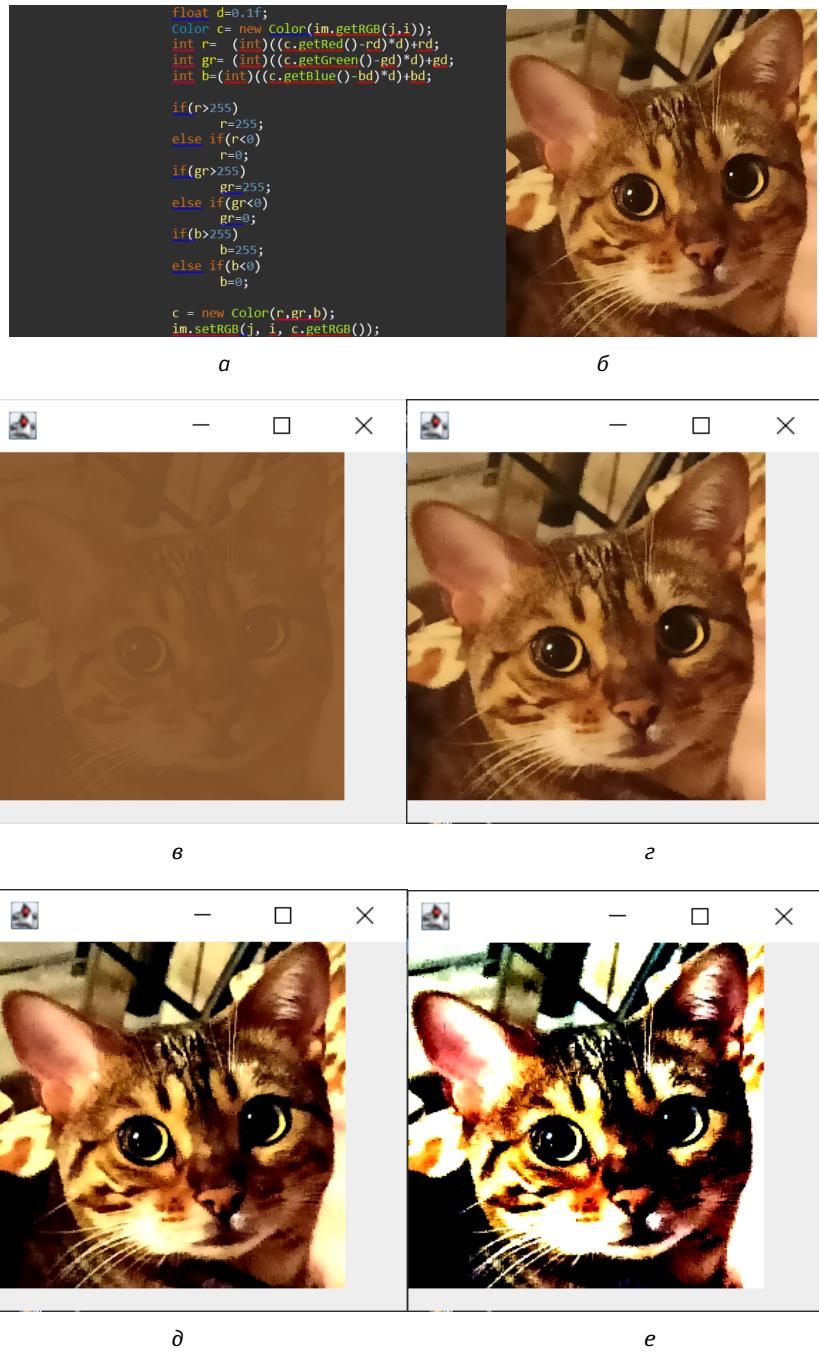


Рис. 1. Пример алгоритма на Java:

а — пример алгоритма; б — исходное изображение; в — изображение в программе (при $d=0,1$);
 г — изображение в программе (при $d=1$); д — изображение в программе (при $d=2$);
 е — изображение в программе (при $d=5$)

```

int id=(int)(Math.random()*lt_base.size());
int rd=lt_base.get(id);
lt_base.remove(id);

int x_r = rd%im.getWidth();
int y_r = rd/im.getWidth();
im1.setRGB(x_r, y_r, im.getRGB(j, i));

fl.write(rd+" ");

```

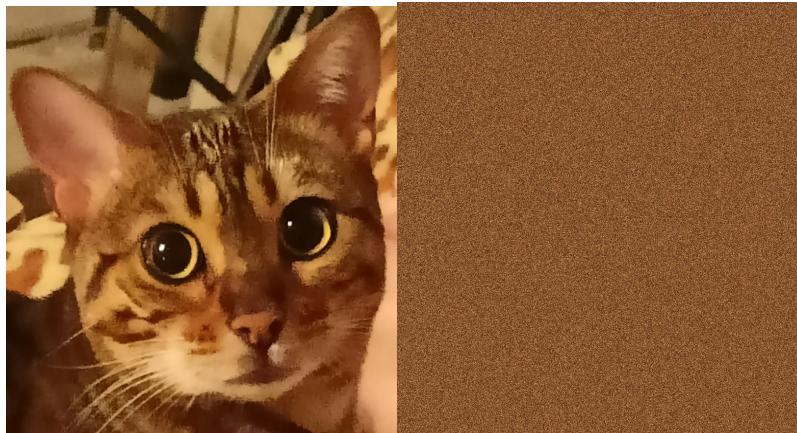
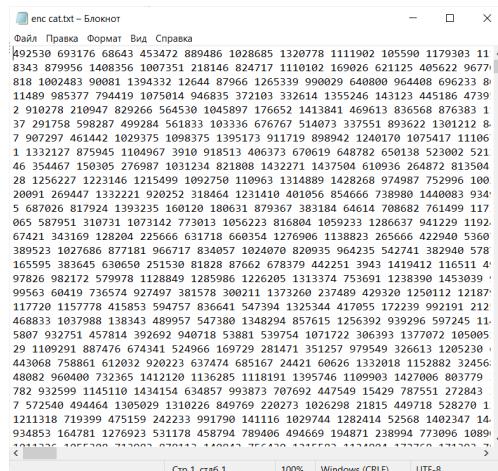
a*b**c**d*

Рис. 2. Пример алгоритма на Java:

a — пример алгоритма; *b* — исходное изображение;
c — зашифрованное изображение; *d* — файл-ключ

Процесс шифрования в цикле:

- выбирается случайный элемент списка (через Math.random()), записываем в отдельную переменную, а затем удаляется этот элемент из списка. Из этого числа получаем позицию по x и по y ;
- число записывается в файл-ключ через пробел;
- записываем в новое изображение по координатам пикселя, полученные из списка, цвет пикселя старого изображения по координатам переменных цикла (к примеру, в начале цикла ($x = 0, y = 0$) выбирается случайное число 123. В новое изображение по координатам пикселя 123 ставится цвет старого изображения по координатам 0,0).

Сохранение зашифрованного изображения и файл-ключа.

Поскольку в данной реализации алгоритма дополнительно создается файл-ключ, то время работы программы может занять некоторое время. При использовании уже готового файла-ключа реализация была бы немного иначе, и время работы была бы меньше. Результаты шифрования представлены на рис. 2.

Для реализации алгоритма дешифрования на Java требуется несколько шагов.

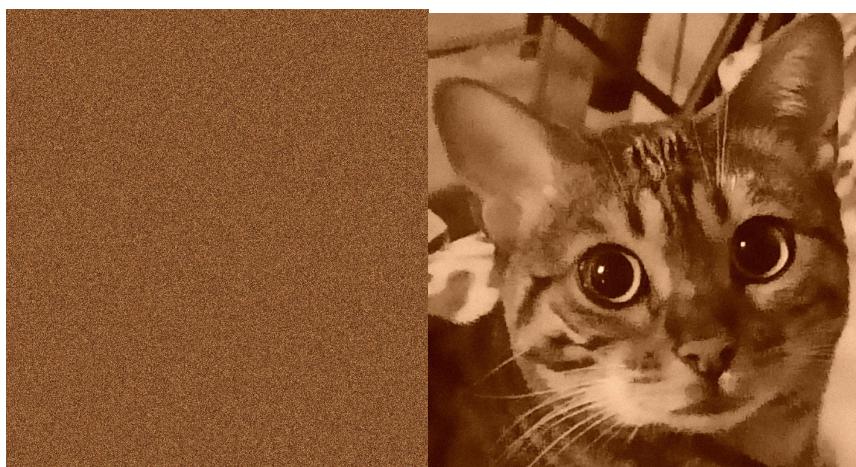
1. Импорт библиотек для работы с изображениями и файлами (FileReader, ArrayList, BufferedImage).

2. Загрузка изображения и файл-ключа.

```
int rd=lt[i*im.getWidth() + j];
int x_rd= rd%im.getWidth();
int y_rd=rd/im.getWidth();

im1.setRGB( j,i, im.getRGB(x_rd, y_rd));
```

а



б

в

Рис. 3. Пример алгоритма на Java:

а – пример алгоритма; б – зашифрованное изображение; в – расшифрованное изображение

3. Создание списка и выгрузка в него содержимого файл-ключа.

4. Процесс дешифрования в цикле:

– выбирается элемент списка с индексом по переменным цикла;

– записываем в новое изображение по координатам пикселя, полученные из переменных цикла, цвет пикселя зашифрованного изображения по координатам элемента списка (к примеру, в начале цикла ($x = 0, y = 0$) и элемент списка с индексом 0(0* ширину+0) — число 123. В новое изображение по координатам пикселя 0,0 ставится цвет зашифрованного изображения по координатам пикселя 123).

5. Сохранение полученного изображения.

На рис. 3 повторно, для наглядности, представлено зашифрованное изображение, а также изображение, расшифрованное с помощью описанного метода.

Литература

- [1] Ильичев В.Ю., Илюхин И.Ю. Создание методик программной визуализации моделей теории графов. *Научное обозрение. Технические науки*, 2022, № 2, с. 16–20.
- [2] Алгоритмы обработки изображений. URL: https://www-pre--scient-com.translate.goog/knowledge-center/image-processing/image-processing-algorithms/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=rq (дата обращения 10.03.2025).
- [3] Алгоритм изменения контрастности. URL: <https://habr.com/ru/articles/139428/> (дата обращения 10.03.2025).

Using Java language to implement image transformation algorithms

Bolovinov Konstantin Maksimovich

bolovinov.game@inbox.ru

Ilyichev Vladimir Yuryevich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The use of Java for implementing image conversion algorithms is considered. The JAVA language was used to implement the algorithms using the following libraries: Color, Graphics, BufferedImage, swing, FileWriter, FileReader, ArrayList. Three algorithms were implemented: an algorithm for changing contrast, encryption and decryption. The written programs were tested on a specific image.

Keywords: Java language, raster graphics, algorithms

УДК 004.35

Разработка программно-аппаратного комплекса для обработки данных в автоматизированных системах на базе преобразователя L-CARD E14-140M

Дроздова Татьяна Александровна

tatiana.d00@mail.ru

Гордеева Анастасия Эдуардовна

nastya.gordeeva04@mail.ru

Трешневская Вероника Октаевиановна

treshnevskaya@bmstu.ru

SPIN-код: 2562-8380

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен анализ архитектурных особенностей и функциональных возможностей модуля L-CARD E14-140M, предназначенного для сбора и обработки аналоговых и цифровых сигналов. Рассмотрены его ключевые преимущества: программируемая логика (FPGA), поддержка многоканального ввода-вывода. Проведено сравнение с аналогами, выделена гибкость и масштабируемость L-CARD. Разработана автоматизированная система для управления внешними устройствами с использованием библиотек LUsbAPI и LCompr. Реализовано ПО на C++ с функциями подключения, чтения состояний и управления устройствами. Предложены варианты применения системы в умных городах, энергетике, транспорте и других областях.

Ключевые слова: анализ данных, автоматизация управления, обработка сигналов, USB лаборатория, L-CARD E14-140M

В эпоху цифровой трансформации, когда данные становятся ключевым ресурсом для принятия управлений решений, особую значимость приобретают высокопроизводительные системы сбора и обработки информации. Настоящее комплексное исследование посвящено анализу архитектурных особенностей, функциональных возможностей и практического применения модуля L-CARD E14-140M в современных условиях автоматизированного производства и научных исследований [1].

Модуль E14-140M представляет собой инновационное решение в области аналого-цифровых преобразователей, сочетающее передовые технологии обработки сигналов с экономической эффективностью [2]. Его архитектура, основанная на программируемых логических матрицах FPGA, обеспечивает беспрецедентную гибкость конфигурации под различные классы задач. В отличие от традиционных решений с фиксированной функциональностью, данный модуль позволяет реализовывать специализированные алгоритмы обработки непосредственно на аппаратном уровне, что существенно повышает производительность системы в целом.

Сравнительный анализ с аналогами других производителей (National Instruments CompactDAQ, Advantech USB-4704) выявил ряд конкурентных преимуществ [3, 4]:

- в 1,8 раза более низкая задержка обработки сигналов (0,45 мс против 0,8 мс у ближайшего конкурента) [2];
- поддержка вдвое большего количества каналов в дифференциальном режиме (16 против 8) [5];
- в 3,2 раза более низкая стоимость при сравнимой функциональности [6];
- возможность каскадного подключения до 8 модулей с синхронизацией по общей шине.

Ядром модуля является высокопроизводительный аналого-цифровой преобразователь с 14-битным разрешением и программируемым усилителем с коэффициентом усиления от 1 до 1000. Особенностью конструкции является применение дифференциальных входных каскадов с защитой от перегрузки до $\pm 30\text{V}$, что обеспечивает надежную работу в условиях промышленных помех [5].

Разработанный в ходе исследования программный комплекс включает многоуровневую архитектуру.

Базовый уровень. Драйверы ядра ОС с поддержкой реального времени.

Системный уровень. Библиотеки LUusbAPI и LComp с API для C/C++, Python, LabVIEW.

Прикладной уровень. Графическая среда LGraph II с возможностями: визуального программирования обработки сигналов, автоматического протоколирования данных, удаленного доступа через веб-интерфейс.

В процессе управления внешними устройствами через модуль L-CARD E14-140M активно применяется двоичная логика [2], которая позволяет эффективно контролировать состояние каждого устройства с помощью битовых операций. Каждое устройство соответствует определенному биту в 16-битном слове (тип WORD), где единица соответствует статусу «включено», ноль — «выключено».

Ключевые операции управления [2]:

– включение устройства (установка бита в 1):

```
outputState |= (1 << 2); // Включение 3-го устройства;
```

– выключение устройства (сброс бита в 0):

```
outputState &= ~(1 << 2); // Выключение 3-го устройства;
```

– проверка состояния:

```
bool isOn = (inputState & (1 << (deviceNumber - 1))) != 0;
```

Пример реализации управления в классе LCardController [3]:

```
void turnOnDevice(int deviceNumber)
{
    if (!device || deviceNumber < 1 || deviceNumber > 5) return;
    WORD outputState = 0;
    device->TTL_IN(&outputState);
    outputState |= (1 << (deviceNumber - 1));
    device->TTL_OUT(outputState); }
```

Для всесторонней оценки характеристик модуля был создан специализированный испытательный макет, включающий:

- генератор тестовых сигналов с программным управлением;
- систему управления промышленными исполнительными механизмами.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают высокую эффективность модуля, что делает его перспективным инструментом для автоматизированного производства и научных исследований.

Проведенное исследование убедительно доказало, что модуль L-CARD E14-140M представляет собой современное, экономически эффективное решение для широкого круга задач автоматизации. Его ключевые преимущества — высокая производительность, надежность и гибкость — делают его оптимальным выбором для следующих практических применений [1, 6]:

- промышленных систем контроля качества (контроль температуры технологических процессов, управление конвейерными линиями через цифровые выходы, системы предиктивной диагностики промышленного оборудования);
- научно-исследовательских комплексов (высокоточные измерения в физических экспериментах, лабораторные установки для научных исследований);
- медицинской диагностической аппаратуры (сбор данных с биологических сенсоров);
- систем «умный город» (мониторинг транспортных потоков, управление уличным освещением).

Перспективы дальнейшего совершенствования системы связаны с интеграцией новых технологий обработки сигналов и расширением областей применения, что открывает широкие возможности для создания интеллектуальных систем управления следующего поколения [7].

Литература

- [1] *L-CARD*. URL: <https://www.lcard.ru> (дата обращения 02.03.2025).
- [2] *Руководство пользователя модуля E14-140M*. URL: https://www.lcard.ru/download/e14_140_users_guide.pdf (дата обращения 05.03.2025).
- [3] *USB-модули ввода-вывода Advantech*. URL: https://www.advantech.com/ru-ru/products/usb-modules/sub_1-2mlkno (дата обращения 04.03.2025).
- [4] *Test and Measurement Systems, a part of Emerson — NI*. URL: <https://www.ni.com/en/perspectives.html> (accessed 04.03.2025).
- [5] *Библиотеки программирования LUsbAPI и LComp*. URL: <https://www.lcard.ru/software/lusbapi> (дата обращения 07.03.2025).
- [6] *Программное обеспечение LGraph для визуализации данных*. URL: <https://www.lcard.ru/software/lgraph> (дата обращения 08.03.2025).
- [7] *Форум технической поддержки L-CARD*. URL: <https://www.lcard.ru/support/forum> (дата обращения 15.03.2025).

Development of a hardware and software complex for data processing in automated systems based on the L-CARD E14-140M converter

Drozdova Tatiana Aleksandrovna

tatiana.d00@mail.ru

Gordeeva Anastasia Eduadovna

nastya.gordeeva04@mail.ru

Treshnevskaia Veronika Oktavianovna

treshnevskaia@bmstu.ru

SPIN-code: 2562-8380

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The paper analyzes the architectural features and functionality of the L-CARD E14-140M module, designed to collect and process analog and digital signals. Its key advantages are considered: programmable logic (FPGA), multi-channel input/output support. A comparison with analogues was made, and the flexibility and scalability of the L-CARD were highlighted. An automated system for managing external devices using the LUsbAPI and LComp libraries has been developed. The software is implemented in C++ with the functions of connection, status reading and device management. Possible applications of the system in smart cities, energy, transport and other areas are proposed.

Keywords: data analysis, automation of control, signal processing, USB laboratory, L-CARD E14-140M

Содержание

Секция 1. Прогрессивные технологии, оборудование и инструментальные системы	3
Сысоев Г.А., Мусохранов М.В. Сравнение методов фрезерования открытых пазов	5
Макарчук А.С., Зенкин Н.В. Обработка соосных отверстий в корпусных деталях машин	8
Яковлев М.Д., Зенкин Н.В. Исследование методов обработки глубоких отверстий в машиностроении	11
Лыкова А.А., Зенкин Н.В. Обработка шпоночных пазов	14
Влас В.Ю., Вяткин А.Г. Рациональные методы обеспечения точного расположения отверстий	17
Коршунова А.В., Вяткин А.Г. Выбор рациональных методов обработки отверстий в машиностроении	20
Липский Н.Д., Бысов С.А. Расчет оптимального количества проходов при снятии припуска	23
Дикарев Д.С., Аракелян С.А. Снижение трудоемкости механической обработки за счет разработки технологий на оборудовании с ЧПУ	26
Гусаков А.В., Малышев Е.Н. Выбор инструментального материала для обработки стали 30ХМА	30
Силаков К.М., Вяткин А.Г. Сравнение методов изготовления заготовки детали типа «крышка цилиндра»	34
Малышев Я.С., Мусохранов М.В. Анализ методов получения заготовок зубчатых колес	38
Антипов А.Е., Вяткин А.Г. Влияние кинематических схем на качество глубокого сверления отверстий	41
Фалендыши В.А., Бысов С.А. Исследование методов получения заготовок литьем	44
Борисов С.А., Малышев Е.Н. Сравнение «прогонов» имитационной модели участка механической обработки в среде AnyLogic	47
Губанов Я.А., Малышев Е.Н. Сравнительный анализ методов изготовления заготовки	52
Синяев К.А. Сравнительный анализ основных методов резки металлов	56
Синяев К.А. Проведение полного двухфакторного эксперимента по влиянию режимов резания и средств оснащения на отклонение от перпендикулярности	60
Фокин Н.И., Калмыков В.В. Перспективы использования цифровых двойников в машиностроении	64
Гусакова К.А., Журавлева Т.А. Моделирование одноимпульсного лазерного сверления в программе COMSOL Multiphysics 6.2	67

<i>Костышен М.О., Мусохранов М.В.</i> Обзор методик экспертной оценки	71
<i>Гусакова К.А., Журавлева Т.А.</i> Влияние пиковой мощности на диаметр входного и выходного отверстия при одноимпульсном лазерном сверлении	74
Секция 2. Технологии и машины сварочного производства	79
<i>Орлик А.Г., Орлик Г.В., Глебов С.А., Пономарев О.И., Никулин К.Д.</i> Сравнение проволок для восстановления ножа скоростного фронтального отвала А90	81
<i>Орлик А.Г., Орлик Г.В., Иванов Е.И.</i> Выбор присадочного материала для наплавки на зубья ковша	87
<i>Орлик А.Г., Орлик Г.В., Манзюк А.И.</i> Способы увеличения износостойкости деталей машин, полученных наплавкой	91
<i>Чернова Т.Г., Шиленков К.А.</i> Анализ сварной конструкции сложной геометрии на технологичность	95
<i>Радкевич В.В., Труханов К.Ю.</i> Обратное проектирование и анализ технологий изготовления крыльчатки	100
<i>Царьков А.А.</i> Технико-экономические аспекты промышленного применения сварки трением с перемешиванием	106
Секция 3. Физика конденсированного состояния и электронная техника	111
<i>Андреев Д.В., Цирульников И.Ю.</i> Коррекция амплитудно-частотной характеристики фотоприемного устройства в области высоких частот	113
<i>Лужско В.В., Адарчин С.А.</i> Миниатюризация дискретных диэлектрических чип-конденсаторов	117
<i>Лужско В.В., Адарчин С.А.</i> Тонкие пленки в производстве интегральных микросхем	121
<i>Борисов Е.О., Гришин Г.К., Андреев Д.В.</i> Оптимизация конструкции печатной платы автоматизированной установки контроля параметров сдвоенного приемопередатчика манчестерского кода для минимизации временных задержек сигналов	125
<i>Геращенко А.Е., Васильев Н.Т., Андреев В.В.</i> Фотодиоды с обратной подсветкой	135
<i>Геращенко А.Е., Васильев Н.Т., Андреев В.В., Лыков Д.А.</i> Сравнительное исследование пенопластов и компаундов для герметизации изделия электроники	139
<i>Ботов А.Н., Адарчин С.А.</i> Дефекты в ультразвуковой сварке в микроэлектронике	142
<i>Корнев С.А., Андреев В.В.</i> Схема начального сброса при включении напряжения питания на основе КМОП-технологии	146
<i>Чубурков А.Е., Кузнецов В.В.</i> Исследование частотных характеристик конденсаторов	149
<i>Ефременко Е.И., Кузнецов В.В.</i> Исследование воздействия термоциклизации на стойкость ИМС к электростатическому разряду	153
<i>Перевозчикова Д.С., Андреев В.В.</i> Оценка влияния состава проявителя на качество воспроизведения топологического рельефа в фотолитографическом процессе	157
<i>Платошин В.О., Андреев В.В.</i> Проектирование полосового сумматора сверхвысокочастотного сигнала в диапазоне частот 600–1200 МГц	161

<i>Серов И.Е., Адарчин С.А.</i> Влияние концентрации примеси в области кармана на электрофизические параметры измерительного усилителя	166
<i>Гришин Г.К., Кузин М.М., Андреев Д.В.</i> Особенности проектирования источника опорного тока	170
<i>Радзышевская В.В., Андреев В.В.</i> Зависимость КМОП транзистора от энергии ионного легирования области стока и истока	177
<i>Кузнецов В.В., Рогов Д.М.</i> Моделирование импульсных источников питания при помощи свободного программного обеспечения	181
<i>Кузнецов В.В., Лукашов Д.И.</i> Схемотехническое моделирование СВЧ-устройства на микрополосковых линиях	186
<i>Пузиков К.А., Адарчин С.А.</i> К вопросу о моделировании работы фотоприемных устройств специального назначения	190
<i>Пузиков К.А., Адарчин С.А.</i> Исследование влияния выходного каскада на работу интегральной микросхемы — компаратор напряжений	197
<i>Лыков А.Д., Полтудников С.В., Андреев В.В.</i> Влияние технологического процесса изготовления компаратора на его электрические характеристики и их стабильность	202
<i>Кузнецов В.В., Алексин А.В.</i> Верификация SPICE-моделей ИМС логических элементов серии CD4000	207
Секция 4. Термовые двигатели и гидромашины	213
<i>Ганков М.С., Ильичев В.Ю.</i> Исследование влияния компоновки трубного пучка на эффективность теплообмена конденсатора на низкокипящем рабочем теле	215
<i>Жариков А.А., Шевелев Д.В.</i> Использование технологии CFD для моделирования течений в лопаточных решетках турбин	220
<i>Кашанов Н.А., Жинов А.А.</i> Численное исследование теплогидравлических характеристик трубного пучка сухой вентиляторной градирни	225
<i>Резчиков В.Р., Шевелев Д.В.</i> Обзор и анализ методик расчета термодинамических свойств природного газа	229
<i>Петрушин К.А., Ильичев В.Ю.</i> Влияние высоты вытяжной шахты на эффективность теплообмена при естественной конвекции в многорядных пучках труб	233
<i>Иванов М.А., Савин В.Ю.</i> Подготовительный этап в рамках моделирования лопастных гидромашин	237
<i>Жариков А.А., Шевелев Д.В.</i> Исследование публикационной активности по теме исследования «Паровые турбины»	242
Секция 5. Методы теории автоматического управления; автоматизация и управление технологическими процессами и производствами	249
<i>Безлюдов М.Д.</i> Распознавание специализированной речи: методы реализации	251
<i>Семехин Д.Е., Акименко Д.А.</i> Синтез дискретного алгоритма управления электроприводом из условия обеспечения астатизма второго порядка замкнутой системе	254

Секция 6. Экология и безопасность	259
Готвальд Е.Д., Тютюнкова М.В. Нормирование тяжелых металлов в почве	261
Панченко Е.А., Чериканова Е.А., Бесклетко Т.С. Анализ динамики состояния поверхностных вод Калужской области	265
Ильющенко А.А., Анфилов К.Л. Сорбция низкомолекулярных аминов катионитами	270
Шульга С.С., Анфилов К.Л. Экономический ущерб от коррозии металлов	274
Никишина А.А., Анфилов К.Л. Умные системы мониторинга выбросов лакокрасочных предприятий	278
Раздобреева П.И., Чистяков К.Е. Как укрепить организм с помощью физической культуры при полинозе	281
Секция 8. Защита информации	285
Романов В.Н., Мазин А.В. Анализ интеграции системы предотвращения утечек данных с другими системами безопасности	287
Заломов К.А., Потапов А.В. Автоматизация процесса сбора информации о зависимостях исполняемых файлов в ОС семейства Linux	291
Иванова В.О., Лачихина А.Б. Риски и перспективы развития искусственного интеллекта в современном мире	294
Секция 12. Информационные технологии. Электронно-вычислительные системы и комплексы	299
Морозова В.С., Ильичев В.Ю. Оптимизация отбора признаков для качества прогнозирования в условиях высокой размерности данных	301
Медведев Д.И., Ильичев В.Ю. Выбор методов машинного обучения для использования в коллаборативных рекомендательных системах	305
Изранов К.С., Ильичев В.Ю. Исследование методов и разработка прикладного программного обеспечения для выявления аномалий в сетевом трафике	309
Ильичев В.Ю., Чухраев И.В., Тихонов Н.А., Джанаев К.С. Построение рейтинговой системы на основе 3D-визуализации ключевых метрик	313
Ильичев В.Ю., Чухраев И.В., Тихонов Н.А., Джанаев К.С. Разработка методики кластеризации GitHub проектов по стадиям развития	319
Косова К.А., Ильичев В.Ю. Разработка методики обработки данных с использованием глубокого обучения генеративно-состязательной нейронной сети (GAN)	324
Иванов Н.В., Ильичев В.Ю. Анализ функционала технологий WebSocket и Long Polling для их использования при разработке чат-приложений	330
Склярова М.С., Ильичев В.Ю. Разработка методики исследования характеристик фотоэлектрических солнечных панелей с использованием программных средств языка Python	336
Кузнецов Р.С., Вершинин Е.В. Автоматизация получения данных о курсах валют из различных источников и их дальнейшее использование в системе «Инструменты мультивалютности»	341
Илюхин Д.В., Ильичев В.Ю. Разработка метода анализа автомобильного рынка с использованием библиотеки Pandas	346

<i>Корнеев К.М., Ильичев В.Ю.</i> Сравнительный анализ реляционных систем управления базами данных с целью выбора оптимальной для использования в техническом университете	352
<i>Жудова А.А., Ильичев В.Ю.</i> Исследование свойств самовоспроизводящихся клеточных автоматов	357
<i>Зубкова А.В., Ильичев В.Ю.</i> Выбор программно-аппаратных методов для оценки эмоционального состояния человека по вариабельности сердечного ритма	360
<i>Ильичев В.Ю., Федоров В.О., Ландаева Д.Н., Гуликова В.Н.</i> Выбор метода сглаживания регрессионной зависимости для анализа курсов криптовалют: сравнение GARCH, LSTM и ARIMA	366
<i>Широкова Е.В., Джанаев К.С., Тихонов Н.А., Павлов И.В.</i> Бинарная классификация изображений: оценка эффективности алгоритмов Random Forest, Gradient Boosting и XGBoost	371
<i>Васильченко А.Ю., Ильичев В.Ю.</i> Выбор систем управления базами данных для социальных сетей на основе анализа их особенностей	376
<i>Боловинов К.М., Ильичев В.Ю.</i> Использование языка Java для реализации алгоритмов преобразования изображений	380
<i>Дроздова Т.А., Гордеева А.Э., Трешиневская В.О.</i> Разработка программно-аппаратного комплекса для обработки данных в автоматизированных системах на базе преобразователя L-CARD E14-140M	386

Научное издание

**Наукоемкие технологии
в приboro- и машиностроении
и развитие инновационной
деятельности в вузе**

Региональная научно-техническая конференция

(Калуга, 15–17 апреля 2025 года)

Материалы конференции

Том 1

Художник Э.Ш. Мурадова
Компьютерная верстка С.А. Серебряковой

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 27.01.2026. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 32,18. Тираж 70 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
<https://press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.